
Sensorless BLDC Control with Back-EMF Filtering

Using a Majority Function

* Author: Daniel Torres

Microchip Technology Inc.

INTRODUCTION

본 App. Note 는 마이크로칩의 dsPIC[®] DSC(Digital Signal Controller)를 이용한 센서리스 BLDC (Brushless Direct Current) 모터 제어 알고리즘을 설명하는 것으로서 역기전력(Back-Electromotive Force)를 디지털 방식으로 필터링 하기 위해 Majority Function(다수결 함수)를 이용하고 있다. 모터의 각 상은 모터 구동 전압이 변경(Commutate) 될 때를 결정하기 위해 필터링 된다. 이 제어 기법은 기존의 방식 대비 디스크리트(Discrete) 소자, 저역 필터(LPF) 및 비교기(Comparator) 소자를 필요로 하지 않는다. 여기에서 소개되는 내용 및 소프트웨어는 3상 모터를 사용한 예이며 모터 제어알고리즘은 크게 6개의 주요 부분으로 아래와 같이 구성되어 있다.

- dsPIC[®] ADC를 이용한 사다리꼴형 역기전력(BEMF) 신호 샘플링
- 모터의 가장 중성점(Virtual Neutral Point)의 재구성
- ZCP(Zero Crossing Points) 검출을 위한 사다리꼴 역기전력 신호를 재구성된 가상 중성점과 비교
- Majority 함수 필터를 이용한 비교결과 신호의 필터링
- 모터 구동 전압의 변경(Commutate)
- 제어 루프 (Control Loop)

이 App. Note는 기본적인 심플한 형태의 새로운 센서리스 BLDC 모터 제어 기법의 수행에 대한 설명과 함께 역기전력(BEMF) 신호를 dsPIC[®] DSC 의 ADC 동작 전압의 범위로 변환하기 위한 몇 개의 저항소자 외에는 특별한 외부 하드웨어를 필요로 하지 않는 dsPIC[®] DSC 단일 칩 기반 솔루션에 대한 소개를 목적으로 하고 있다.

SENSORED CONTROL vs. SENSORLESS CONTROL

BLDC 모터는 컴팩트한 사이즈, 우수한 제어성능 및 높은 효율 등으로 인해 소비자 및 산업용 분야에 널리 적용되고 있으며 특히 자동차 산업분야에서는 벨트 및 유압 시스템의 제거, 기능 추가 및 연비 향상을 위한 전략의 일환으로서 각광을 받고 있다. BLDC 모터의 자석 및 제어를 위한 전자 부품의 지속적인 가격 하락으로 인해 그 응용분야 과 함께 출력 수준도 지속적으로 확대되고 있다.

BLDC 모터는 일반적으로 전기적 여자(Excitation)이 회전자의 위치와 동기 되어야 하기 때문에 하나 이상의 회전자 위치 검출 센서를 필요로 한다. 비용, 신뢰성 및 기계적 패키징 (특히 회전자가 유체 속에 담겨있는 경우) 문제로 인해 위치검출 센서 없이 모터를 구동시키는 것이 바람직하다. 이러한 기법을 센서리스 구동이라 부른다.

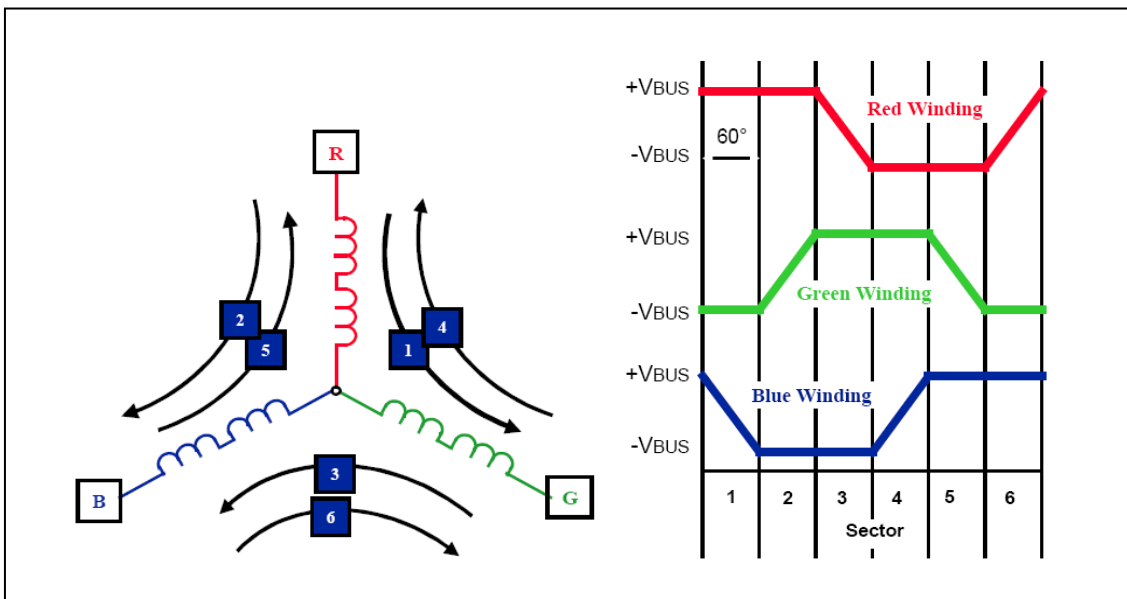
한 상의 모터 권선이 구동 중일 때 비구동(undriven) 권선에서 역기전력(BEMF) 전압을 감지함으로써 모터 구동 전압을 변경(Commutate)할 순간을 결정하는 것이 가능하다. 센서리스 제어의 가장 큰 장점은 위치 검출을 위한 홀 센서를 제거함으로써 얻는 비용의 절감이며, 아래와 같이 몇 가지 단점도 존재한다.

- 역기전력을 감지하기 위해서는 최소한의 특정 속도 이상으로 회전해야 한다.
(\therefore 역기전압 \propto 회전속도)
- 모터 부하의 급격한 변화로 인해 역기전력 구동 루프를 벗어날 수 있다.
- 역기전력 전압의 측정은 인가 전압대비 모터의 속도가 이상적인 커뮤테이션(Commutation) 속도의 제한된 범위 내에 존재할 때만 가능하다.
- 이상적인 속도보다 빠른 커뮤테이션은 불연속적인 모터 응답특성을 유발한다.

따라서, 만약 고려하고 있는 응용분야가 저비용이 주요 관심 사항이며, 모터의 저속 구동이 필요하지 않고, 모터에 인가되는 부하가 급격히 변하지 않을 것으로 예상된다면 센서리스 제어 기법은 좋은 대안이 될 수 있을 것이다. 또한 앞에서 언급된 단점들을 극복할 수 있는 특별한 알고리즘들이 존재하기 때문에 센서리스 역기전력(BEMF) 모터 제어 방법은 빠른 속도로 가장 인기 있는 솔루션으로 자리잡고 있다.

SIX-STEP (Trapezoidal) Commutation

본 App. Note에서 소개되는 센서리스 알고리즘에서 모터 권선의 여자방법은 6-스텝 사다리꼴 또는 120° 통전방식이며 그림 1은 6-스텝 커뮤테이션의 동작을 설명해주고 있다. 각 스텝(섹터)는 전기적으로 60° 이므로 6-스텝은 전기적으로 360° (전기적인 1회전)을 의미한다.



[그림 1] 6-스텝 커뮤테이션 (6-Step Commutation)

권선 그림에서 화살표는 각 6-스텝에 있어서 모터 권선을 통해 흐르는 전류의 방향을 의미하며, 그래프는 6-스텝 동안 모터의 리드선에 인가되는 전압을 의미한다. 이러한 6-스텝의 시퀀스는 모터가 전기적으로 1 회전하도록 한다. (기계적 회전은 자석의 극 수와 상관 있다.)

6-STEP COMMUTATION

• Step 1

- Red 권선 : Positive 전압 인가
- Green 권선 : Negative 전압 인가
- Blue 권선 : 전압 비인가

• Step 2

- Red 권선 : Positive 전압 유지
- Green 권선 : 전압 비인가
- Blue 권선 : Negative 전압 인가

• Step 3

- Red 권선 : 전압 비인가
- Green 권선 : Positive 전압 인가
- Blue 권선 : Negative 전압 유지

• Step 4

- Red 권선 : Negative 전압 인가
- Green 권선 : Positive 전압 유지
- Blue 권선 : 전압 비인가

• Step 5

- Red 권선 : Negative 전압 유지
- Green 권선 : 전압 비인가
- Blue 권선 : Positive 전압 인가

• Step 6

- Red 권선 : 전압 비인가
- Green 권선 : Negative 전압 인가
- Blue 권선 : Positive 전압 유지

모든 섹터에 있어서, 두 개의 권선이 여자 될 때 다른 한 개의 권선은 여자 되지 않는 점에 유의하자. 이러한 사실로부터 각 섹터에 있어서 여자 되지 않는 한 개의 권선이 센서리스 제어 알고리즘을 가능하게 해주는 6-스텝 제어의 중요한 특성을 제공해준다.

본 App. Note에서는 모터의 속도를 표현하기 위해 다음과 같이 두 가지로 표현한다.

- 1 분당 전기적 회전 수 (RPM_elec)
- 1 초당 전기적 회전 수 (RPS_elec)

모터의 속도는 모터의 극(Pole) 수에 상관없는 전기적 RPM이 기계적 RPM 보다 논의하기가 상대적으로 용이하다. 기계적 RPM 및 전기적 RPM과의 관계는 다음 3개의 수식과 같다.

EQUATION 1: Mech.-Elec. RPM RELATIONSHIP

$$RPM_electrical = \frac{2 \cdot RPM_mechanical}{\# \text{ of Motor Poles}}$$

EQUATION 2: Mech.-Elec. RPM RELATIONSHIP

$$RPM_electrical = \frac{RPM_mechanical \cdot \# \text{ of Motor Poles}}{2}$$

EQUATION 3: Mech.-Elec. RPM RELATIONSHIP

$$RPS_electrical = \frac{RPM_elec}{60}$$

BEMF Sensing Methods

BLDC 모터가 회전할 때, 각 권선은 렌츠의 법칙(Lenz' s Law)에 따라서 각 권선은 인가되는 주 전압과 반대의 극성을 갖은 역기전력(BEMF)을 발생시킨다. 이들 역기전력의 극성은 인가 전압의 방향과 반대가 되며 주로 다음 3개의 모터 파라미터에 의해 결정된다.

- 고정자(Stator) 권선의 턴(Turn) 수
- 회전자(Rotor)의 각 속도 (Angular Velocity)
- 회전자 자석에 의해 발생하는 자계

따라서, 역기전력은 모터 파라미터 및 회전자 각속도를 이용하여 Eqn. 4와 같이 계산될 수 있다.

EQUATION 4: BACK-EMF(BEMF)

$$BEMF = NlrB\omega$$

, where

N = 상(Phase)당 권선 수

l = 회전자의 길이

r = 회전자의 내측 반지름

B = 회전자의 자계

ω = 각 속도

수식 4에서와 같이, 역기전력을 결정하는 유일한 변수는 회전자의 각 속도(ω)이다. 그러므로, 역기전력(BEMF)은 회전자의 속도에 비례한다. 즉, 속도가 증가함에 따라서 역기전력도 증가한다는 말과 같다.

모터의 역기전력 파형은 회전자의 위치와 속도의 함수로 변화한다. 위치 검출은 역기전력이 제로(Zero)인 지점을 이용하여 검출하기 때문에 매우 낮은 속도에서는 위치 검출이 불가능 하지만 펌프 및 팬과 같은 많은 응용분야에서는 낮은 속도에서는 위치 검출 제어 또는 페-루프 제어를 필요로 하지 않는다. 이들 응용분야는 이러한 역기전력을 이용한 방식이 매우 적합하며, 역기전력을 이용한 다른 많은 방법들도 다음과 같이 요약할 수 있다.

- *모터의 터미널 전압 센싱*
 - 직접 측정 또는 추정 (스위치 상태 정보 및 DC 링크 전압 정보 이용)
- *중간점(Mid-Point) 전압 센싱*
 - Y 결선 및 Δ 결선 모터에 한함
 - 특정 결선은 불가
 - 4번째 권선은 실제 필요 없음. 3개의 모터 상(Phase)을 이용하여 Star Point를 만들 수 있음
- *버스(Bus) 전류의 경사도 센싱*
 - 회전자의 진상(Lead) 또는 지상(Lag)와 같은 커뮤니티션 변화로 인해 발생하는 버스(Bus) 전류의 독특한 모양에 의지
 - 빠른 버스전류 제어가 불가

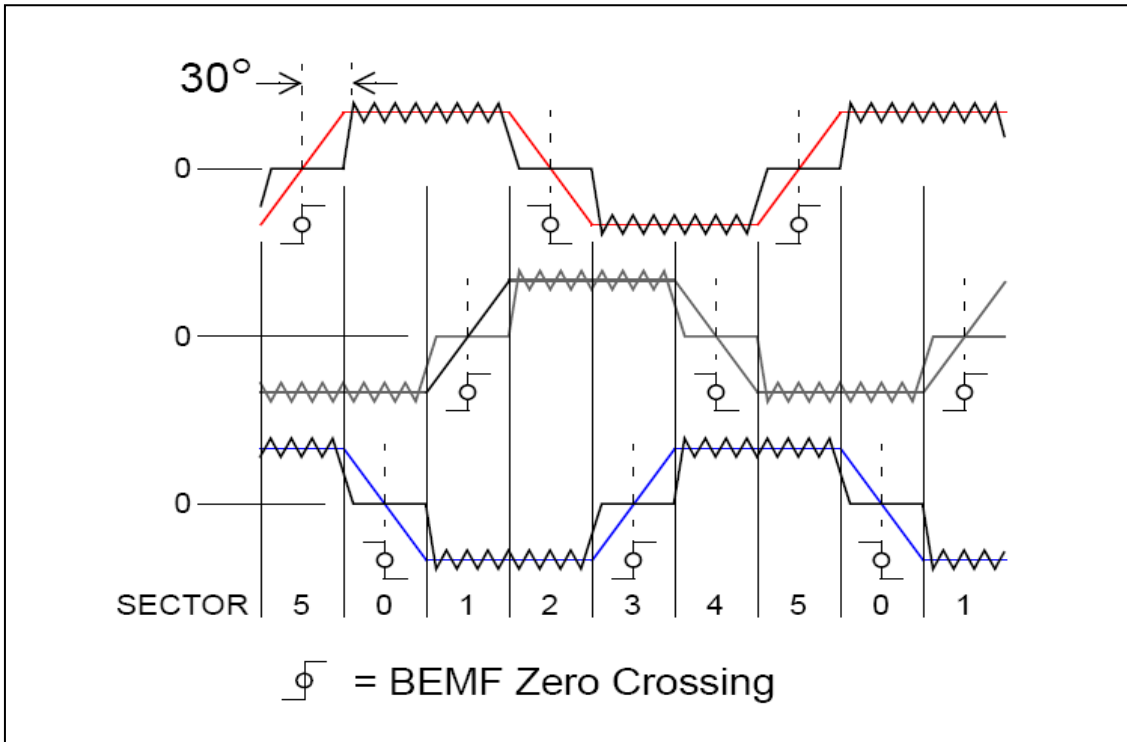
THE SELECTED BEMF SENSING METHOD

본 App. Note는 Mid-Point 전압 재구성에 기반하고 있으며 비활성화(Inactive) 된 상(Phase)의 역기전력이 제로가 되는 순간을 감지하는 기법을 근간으로 한다. 따라서, 본 App. Note에서 소개되는 역기전력 감지 방법은 제로 크로싱 이벤트를 가지기 위해서 사다리꼴의 역기전력 신호를 사용하는 경우에만 적용이 가능하다는 점에 유의해야 한다. 이러한 센싱 방법의 중요한 특징은 ZCP(Zero Crossing Point)를 결정하기 위해 요구되는 외부소자를 최소화 한다는 점이다. 역기전력 신호 컨디셔닝이나 파워 스위치 게이트 드라이버 외에 모든 제어기능을 제공하는 단일 dsPIC DSC 디바이스로 수행이 가능하다.

역기전력의 제로-크리싱 기법은 다음과 같은 이유로 인해 선택 되어 졌다.

- *다양한 모터에 적용 가능하다.*
- *이론적으로 Y-결선 및 Δ -결선의 3상 모터에 적용 가능하다. 특정 결선의 모터에는 적용 불가*
- *모터 특성에 대한 자세한 지식 없이도 수행 가능하다.*
- *모터 제조사의 공차 변수에 상대적으로 민감하지 않는 강인성을 갖는다.*
- *전압 및 전류 제어에 적용 가능하다.*
- *제로-크로싱 기법은 제로(0)에 가까운 낮은 속도에서 페-루프 제어를 필요로 하지 않는*

광범위한 응용분야에 적합하다. 만약 속도가 제로(0) 이상이면, 한 상(Phase)의 역기전력이 제로(0)가 될 때 전기적 사이클당 단 2개의 위치가 존재하며, 이들 위치는 그림 2에서 보여지는 바와 같이 제로-크로싱을 통해 역기전력의 기울기(부호)에 의해서 구분될 질 수 있다.



[그림2] Zero Crossing Detection

각 섹터는 전기적 사이클의 60° 구간에 해당하며 여기에서 섹터의 번호는 임의 결정된 것이다. 또한 커뮤테이션은 각 섹터의 경계지점에서 발생한다. 그러므로, 섹터의 경계지점을 검출하는 것이 필요하다. 역기전력의 제로-크로싱과 커뮤테이션 지점과는 30° 오프셋이 존재하므로, 모터의 효율 및 자연스러운 동작을 위해서는 이 값이 보상되어야 한다.

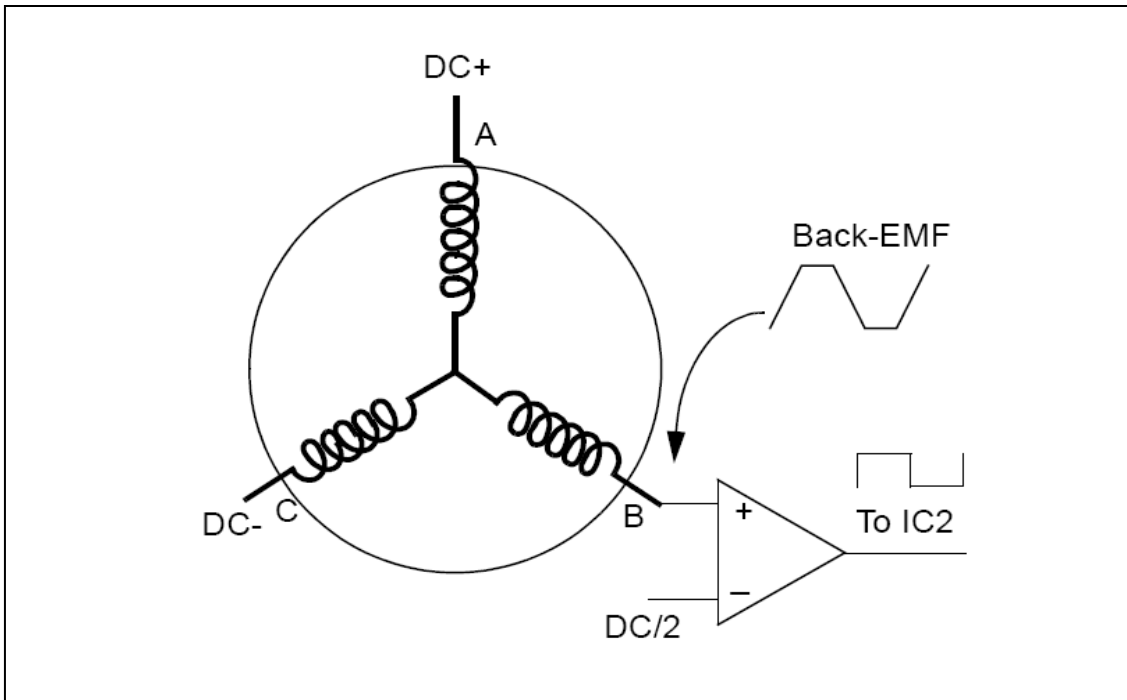
그림 2는 각각의 상의 이상적인 역기전력 파형을 보여주고 있다. 역기전력 센싱을 위해 3개의 모터 리드선 만이 존재한다면, 역기전력 파형은 스타 포인트(Star Point) 전압에 의해 오프셋이 존재하므로 스타 포인트의 전압이 결정되어야 한다.

BEMF ZERO CROSSING SENSING METHODS

역기전력 전압의 제로-크로싱 신호는 다른 방법에 의해서 검출될 수 있다. 이 섹션에서는 두 가지 다른 방법을 설명하고자 한다. 이들 모든 방법은 장점과 단점을 가지고 있으며 다음 섹션에서 논의하고자 한다. 이들 방법은 대부분의 모터의 경우 중성점(Neutral Point)이 외부로 유출되어 있지 않거나 Δ -결선 방식으로 되어 있기 때문에 중성점을 활용할 수 없다는 점에 근간을 두고 있다.

Comparing the BEMF Voltage to Half the DC Bus Voltage

이 방법은 역기전력이 $V_{DC}/2$ 가 될 때 제로-크로싱 이벤트가 발생한다는 가정하에 비교기를 이용하여 역기전력 전압을 DC 버스 전압의 절반 값($1/2$)과 비교하는 것으로 구성되어 있다. 그림 3은 이방법의 수행하기 위한 회로를 보여주고 있다.



[그림3] BEMF Voltage Compared to Half of the DC BUS

모터가 그림1의 커뮤테이션 스텝 1에 있다고 가정하면, 상(Phase) A는 전기적 스위치를 통하여 $+V_{BUS}$ 에 연결되어 있고, 상(Phase) C는 전기적 스위치를 통하여 $-V_{BUS}$ 에 연결되어 있으며, 상(Phase) B는 오픈(open)되어 있다. B상 권선에서 측정되는 역기전력 신호는 음의 기울기 값을 가지며, 그 크기의 최대 값은 커뮤테이션 스텝 2가 발생하기 직전에 $+V_{DC}$ 와 거의 동일한 값이 되며, 커뮤테이션 스텝 2가 발생할 때 $+V_{DC}$ 에 도달한다. 이 순간, B 상은 전기적 스위치를 통해 $+V_{DC}$ 와 연결되고 A 상은 이제 오픈(open)되고 C 상은 $-V_{DC}$ 에 연결된다. A 상에서 관측되는 역기전력 신호는 양의 기울기 값을 가지며, 그 크기의 최소 값은 커뮤테이션 3가 발생하기 직전에 $-V_{DC}$ 에 거의 동일한 값이 된다. B 상과 A 상에서 관측된 두 개의 기울기는 제로-크로싱 이벤트를 결정하기 위해 $V_{DC}/2$ 와 비교된다.

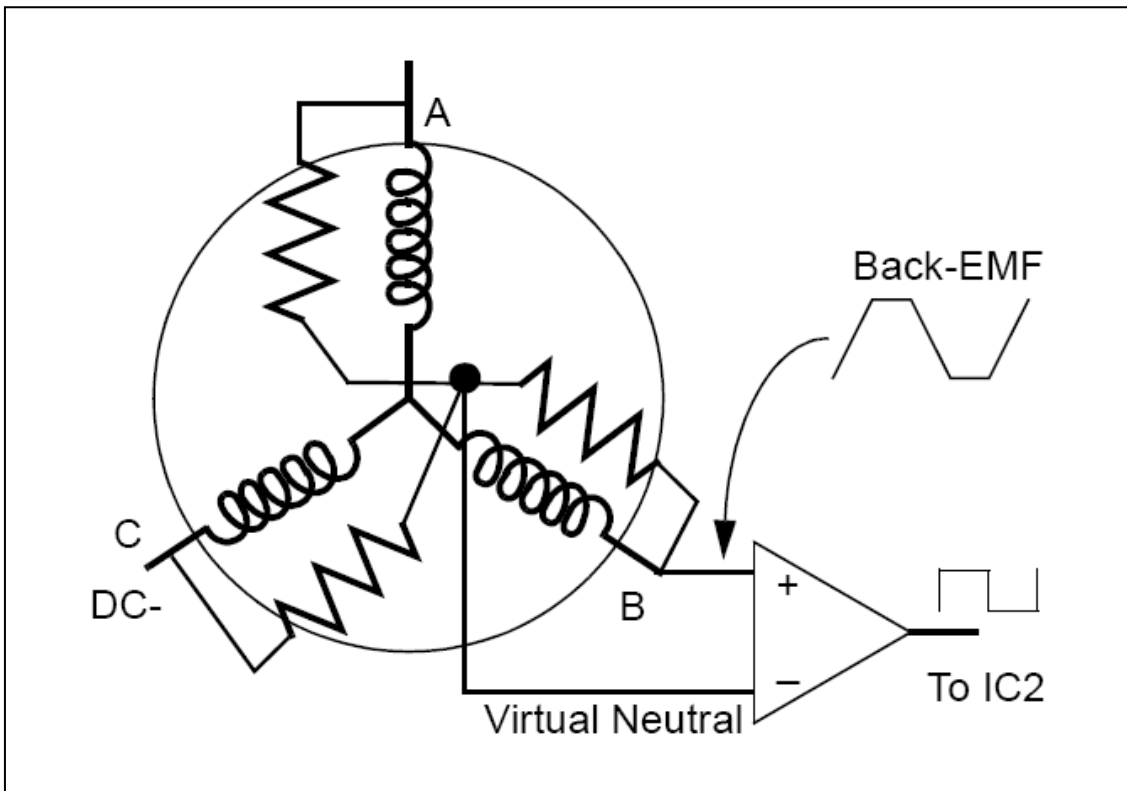
이 회로는 비교기로 구성된 3개의 OP AMP를 이용하여 구현하기가 쉽지만, 다음과 같은 단점을 지니고 있다.

- 이 방법은 모터 권선의 파라미터가 동일하다고 가정한다.
- 감지된 역기전력 신호는 음(-)/양(+)*의 상(Phase) 변이(Shift)를 가지고 있다.*
- 모터의 정격 전압은 대부분 V_{DC} 전압보다 작으며, 제로-크로싱 이벤트는 항상 $V_{DC}/2$ 에서

발생하지는 않는다.

Comparing the BEMF Voltage to the Motor Neutral Point

이전에 소개된 제로-크로싱 센싱 방법은 제로-크로싱 이벤트를 검출하기 위해 사용되는 가변 한계 전압 점(Variable Threshold Voltage Point) 을 가짐으로써 수행될 수 있다. 이 가변 전압은 사실 모터의 중성점에 해당하며 모터 제조사들은 대부분 모터의 중성점을 외부로 인출하지 않기 때문에 사용에 제한이 있다. 하지만, 이러한 문제점은 저항 네트워크를 이용함으로써 해결이 가능하다. 모터 권선과 병렬로 연결된 3개의 저항 네트워크는 가상 중성점(Virtual Neutral Point)을 발생시키기 위해 그림 4와 같이 서로 한 점에서 연결된다.



[그림4] BEMF Voltage Compared to a Virtual Neutral Point

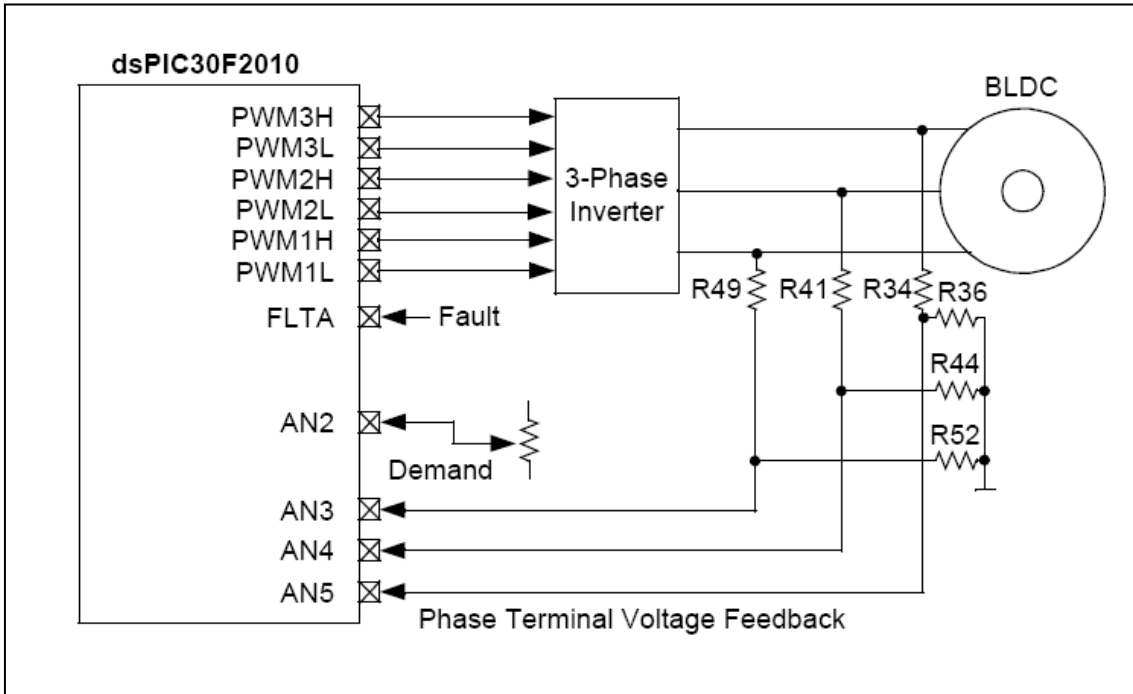
본 App. Note에서 사용된 방법은 위와 동일한 원리로 이루어져 있으며 중성점 신호는 소프트웨어에 의해서 재구성되어있다. 중성 전압은 역기전력 신호의 평균값과 동일하므로 제로-크로싱 한계 전압 값은 식5로 표현된다.

EQUATION 5: Virtual Neutral Point and BEM Signals Relationship

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

V_n = 모터 중성 전압
BEMF X = X 상에서 관측되는 BEMF 전압

비교된다. 제로-크로싱 이벤트는 역기전력 신호가 모터 중성점 전압과 일치할 때 발생한다. 그림 5는 ADC를 이용해 역기전력 신호를 측정하는 예를 보여주고 있다.

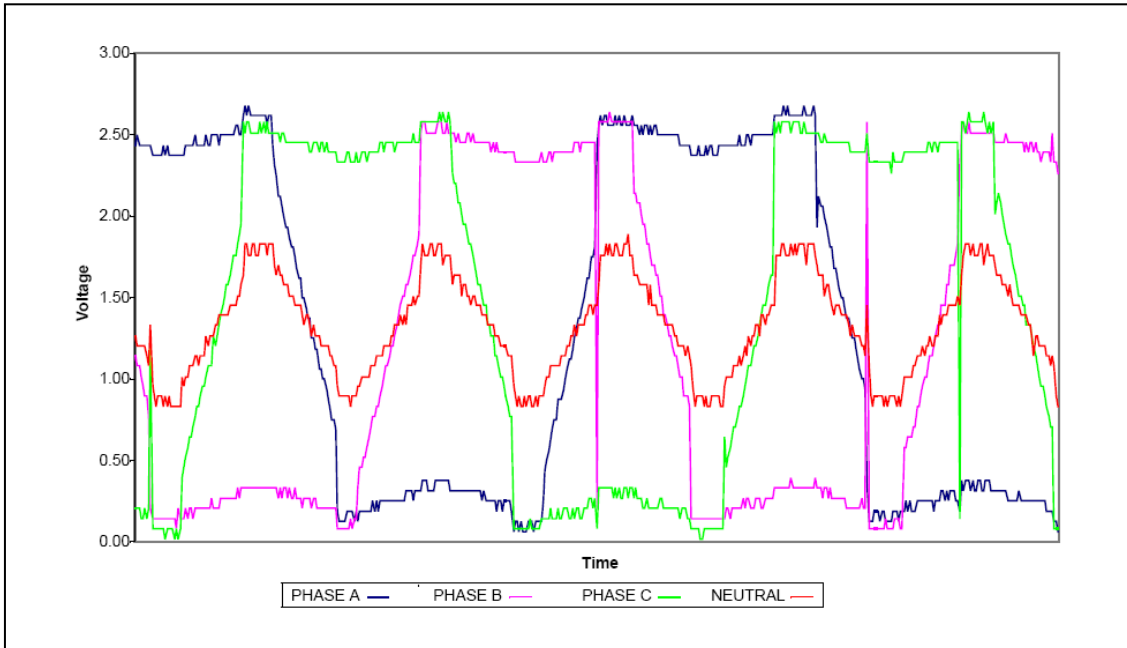


[그림5] BEMF Voltage Measured using the dsPIC[®] dsPIC DSC ADC

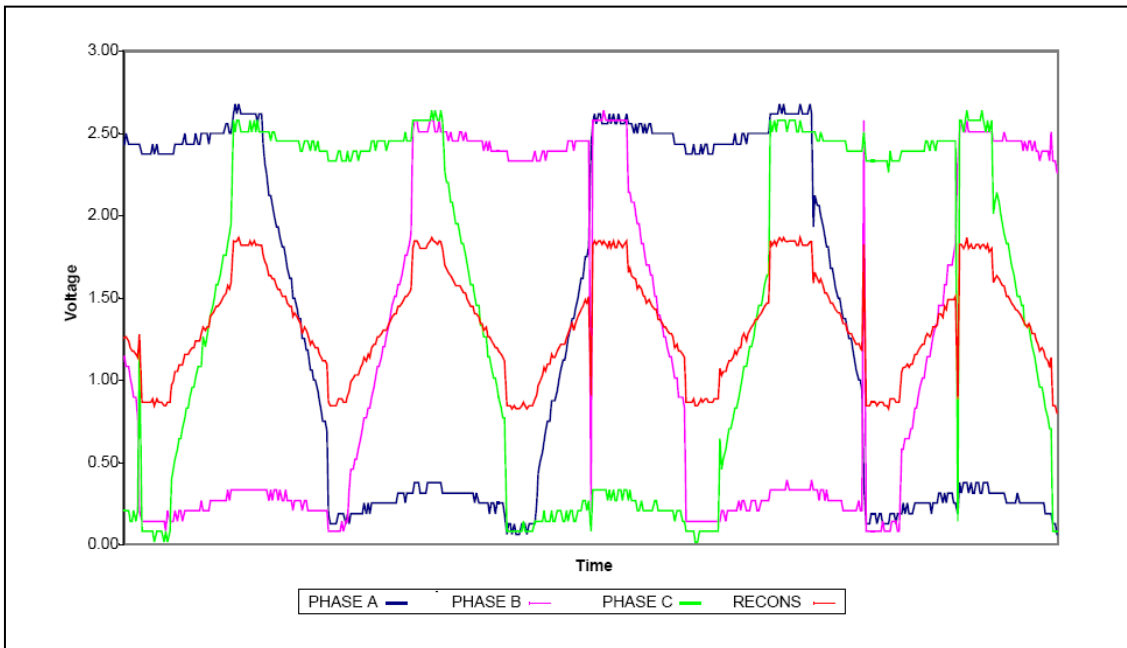
이 방법은 이전 섹션에서 논의된 소프트웨어적으로 수행하는 것이다. 이 방법은 ADC에 의해 획득된 샘플들이 PWM 스위칭 주파수에 의한 공진 변이 전압 (Resonant Transition Voltage)의 영향을 받을 수 있기 때문에 역기전력 신호가 샘플링된 정확한 순간을 결정하는 것이다. 이들 샘플들은 또한 권선의 여자에 의해 발생한 반동(Kickback) 전류에 의한 영향을 받을 수도 있다.

다음 그림 6은 역기전력 신호와 모터 가상 중성점을 보여주고 있으며, 그림 7은 역기전력 신호와 재구성된 가상 중성점을 보여주고 있다..

이 방법은 측정 측면에서 매우 유연하다는 장점을 가지고 있다. 속도가 변하고, 모터 권선의 특성이 수시로 변하면 역기전력도 변동을 하게 되는데, 이러한 상황에서도 dsPIC[®] DSC 는 제로-크로싱 포인트를 결정하고 완벽한 제어를 수행할 수 있게 된다. 디지털 필터는 역기전력 신호로부터 높은 주파수의 스위칭 노이즈 성분을 소프트웨어적으로 제거하기 위해 수행된다.



[그림6] BEMF Signals vs. Virtual Neutral Point When the PWM Duty Cycle is equal to 100%.



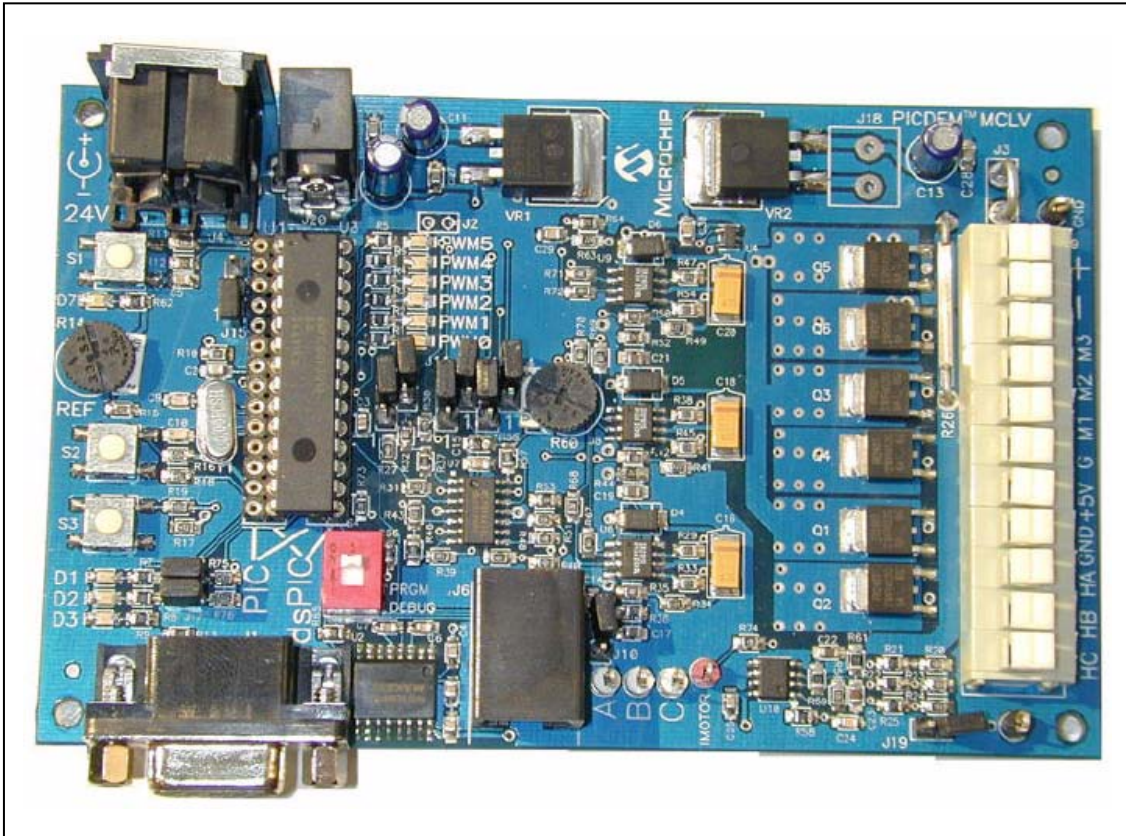
[그림6] BEMF Signals vs. Reconstructed Virtual Neutral Point When the PWM Duty Cycle is equal to 100%.

Required Hardware

본 App. Note 에서 소개된 BLDC 모터 제어 방법을 수행한 하드웨어는 다음과 같다.

dsPIC30F SOFTWARE VERSION

- PICDEM™ MCLV Development Board (Figure 8)
- Hurst DMB0224C10002 CL B 6403 24V BLDC Motor
- 24 VDC Power Supply



[그림8] PICDEM MCLV DEVELOPMENT BOARD

dsPIC33F SOFTWARE VERSION

- dsPIC33FJ12MC202 PIM
- Explorer 16 Development Board
- Motor Control Interface PICTail™ Plus Daughter Board
- dsPICDEM™ MC1L 3-Phase Low Voltage Power Module
- Hurst DMB0224C10002 CL B 6403 24 V BLDC Motor
- 24 VDC Power Supply



[그림9] HARDWARE CONNECTION FOR THE dsPIC33F SOFTWARE VERSION

Hardware Modifications

앞서 그림 5에서 간단한 하드웨어 블록 다이어그램을 설명하였는데 이것은 본 App. Note 에서 소개하는 알고리즘이 동작하기 위해 필요한 기본 연결을 설명한 것이다. 그림 5에서 보여준 결선을 MCLV 보드에서 수행하기 위해서는 아래 테이블 1을 참조하기 바란다.

Jumper	Setting
J8	Open
J10	Open
J12	Open
J14	Open
J19	Open
J7	Short in position 2 - 3
J11	Short in position 2 - 3
J13	Short in position 2 - 3
J15	Short in position 2 - 3
J16	Short
J17	Short

[테이블 1] MCLV 점퍼 설정

MCLV 보드에서 사용하기 위한 점퍼설정은 아래와 같다.

- Pot R14 는 속도 지령치를 결정하며, dsPIC DSC의 ADC 채널 AN4에 연결되어 있다.
- BEMF 신호는 저항 네트워크 R34/R36/R35, R41/R44/R42, R49/R52/R50 를 이용하여 센싱된다.
- 모든 BEMF 필터링은 소프트웨어에 의해 수행되므로, BEMF 신호를 필터링하기 위한 캐패시터 C17, C19, C21 은 연결이 끊어져있다.
- Fault 입력은 전류 피드백 회로와 연결된 비교기 회로(U7D)를 통해 수신된다. 전류는 0.1Ω 저항(R26)을 이용해 센싱되며, 비교기의 임계점(Threshold Point)는 저항 R60을 이용해서 조절된다.

그림 5를 dsPIC33FJ12MC202 하드웨어를 이용하여 수행하기 위해서는 아래와 같다.

dsPIC33FJ12MC202 PIM 을 사용하기 위해서는 아래 테이블 2에서와 같이 설정을 변경해야 한다.

Resistor	Setting
R29, R30, R8, R6, R20, R31, R27, R25, R9, R7, R5	Not populated
R15, R16, R17, R18, R19, R32, R33, R14, R10, R23, R22, R21, R28, R26, R24, R13, R11, R12	Populated

[테이블 2] PIM 저항 설정

Explorer 16 Development Board를 이용하여 수행하기 위해서는 아래 테이블 3과 같이 설정을 한다.

Hardware modification	Setting
Jumper JP2	Short
Jumper J7	Short in position PIC24
Switch S2	Short in position PIM
Resistors R50, R51, R52	Not populated

[테이블 3] Explorer 16 점퍼 및 저항 설정

Motor Control Interface PICtail Plus Daughter Board를 이용하기 위해서는 아래 테이블 4와 같이 설정한다.

Jumper	Setting
J12, J11, J10	Open
J1, J4	Open
J14, J15, J16	Open
J17	Short
J6, J7, J8	Open
J13	Open

[테이블 4] Motor Control Interface PICtail Plus Daughter Board 점퍼 설정

dsPICDEM MC1L 3-Phase Low Voltage Power Module을 이용하기 위해서는 아래 테이블 5와 같이 사용한다.

LK 51Ω resistors	Setting
LK22, LK24, LK25, LK26, LK30	Populated
LK19, LK20, LK21, LK23, LK27, LK28, LK29, LK31, LK32	Not populated

[테이블 5] dsPICDEM MC1L 3-Phase Low Voltage Power Module 저항 설정

Digital Filter (Majority Function)

여기에서 소개되는 BEMF 센싱 방법은 “Majority Function” 이라 불리는 비선형 디지털 필터를 사용하는 것이며, 어떤 경우에는 “Median Operator” 라 부르기도 한다. Majority 함수는 불연산 함수(Boolean Function)이며, n개의 2진수 입력을 갖고, 입력 값 중 가장 많이 입력된 값을 출력하는 함수이다. 입력이 3개인 경우, 그 출력 값은 최소 2번 이상 발생한 값(True/False)을 출력하게 된다. 이 경우 2개의 동일한 값은 입력의 66% 를 반영하게 된다. 따라서, Majority 함수는 항상 과반수(50% 이상)에 해당하는 값을 반환하게 된다. 테이블 6은 3개의 입력을 갖는 Majority 함수를 보여주고 있다.

A	B	C	Majority
1	1	1	1
1	1	0	1
1	0	1	1
1	0	0	0
0	1	1	1
0	1	0	0
0	0	1	0
0	0	0	0

[테이블 6] 3개의 입력을 사용한 Majority 함수의 예

위의 테이블 6의 Majority 값은 두 개의 논리 연산자 **AND(^)** 와 **OR(v)**를 이용하여 식 6과 같이 표현할 수 있다.

EQUATION 6: Boolean Representation of the Majority Function

$$Majority = (A \wedge B) \vee (A \wedge C) \vee (B \wedge C)$$

**** Majority Function(다수결 함수)** : 입력 수가 반드시 홀수이고, 반수 이상의 입력이 1일 때 출력이 1이 되는 논리 함수. (출처: 두산백과사전)

Implementing the Algorithm

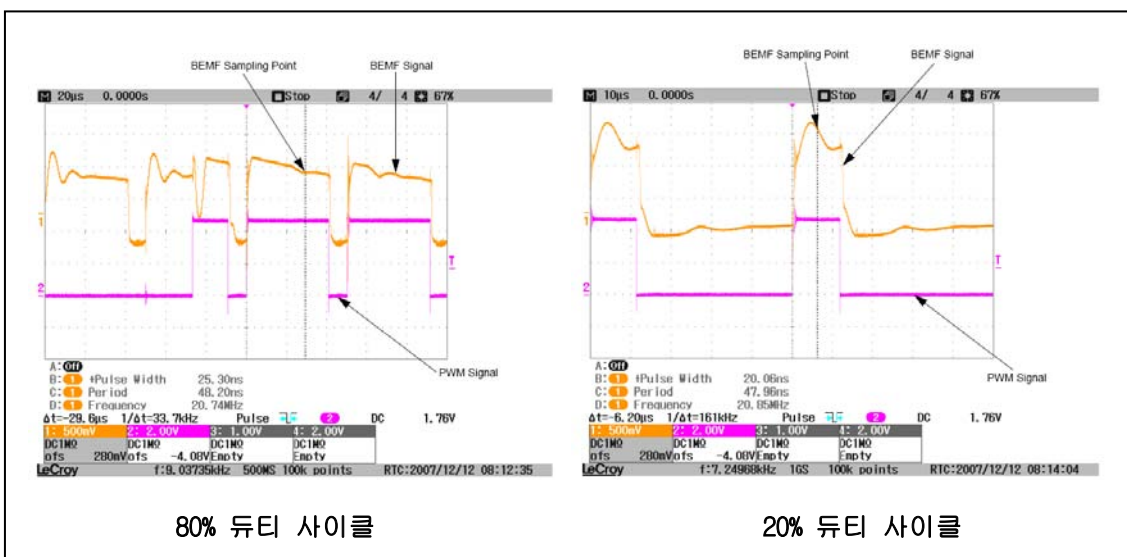
이전 섹션에서 BEMF 방법은 BEMF 신호에서 발생하는 제로-크로싱 이벤트를 검출을 기본으로 한다고 소개한바 있다. 이 섹션에서는 dsPIC DSC 디바이스의 주변장치 등을 이용하여 이 알고리즘을 수행하는 방법에 대해 설명하고자 한다.

SAMPLING THE BEMF SIGNALS

첫 번째 단계는 BEMF 신호를 샘플링하는 것이다. 이를 위해서 dsPIC DSC의 ADC를 PWM 주파수(20kHz)와 동일한 속도로 BEMF 신호를 샘플링 하도록 동시 샘플(Simultaneously Sample)로 설정한다. 따라서 ADC는 PWM 이벤트와 동기화 된다.

dsPIC DSC의 ADC는 전기적 스위치에 의해 발생하는 노이즈(Ringing Noise) 및 모터 권선의 전원이 제거될 때(De-Energization) 발생하는 고전압 스파크와 같은 노이즈를 회피하기 위해 PWM ON 시간에 샘플링하도록 설정된다. 이들 노이즈는 잘못된 제로-크로싱 이벤트를 발생시킬 수 있으며, 이로 인해 잘못된 커뮤테이션 상태를 발생할 수 있다.

BEMF 신호의 샘플링 지점은 모터의 속도에 의해 결정되는 PWM ON 타임 영역에 대해 가변 된다. 낮은 속도에서는 dsPIC DSC는 PWM ON 타임 영역의 50% 지점에서 BEMF 신호를 샘플링 하며 이후 속도가 증가함에 따라서 샘플링 지점은 증가하게 되며, 100% 듀티 사이클일 때 PWM ON 타임의 75% 지점에서 샘플링 하게 되는데 이 지점이 최대 포인트가 된다. 그림 10과 그림 11은 샘플링 포인트를 보여주고 있다.



[그림 10, 11] 80% 및 20% 듀티 사이클에서의 BEMF 샘플링 지점

이제 샘플링된 BEMF 신호 A, B, C를 이용하여 모터의 중성점(Neutral Point)이 소프트웨어에 의해 재구성된다. 재구성된 신호는 제로-크로싱 이벤트를 구분하기 위한 샘플링된 BEMF 신호와 비교 된다. 이 시점에서 외장 비교기는 소프트웨어로 에뮬레이트(Emulate) 되며, 이들 소프트웨어 비교기의 출력들은 샘플링된 BEMF 신호의 이진수 표현(Binary Representation)이 된다. 이들 소프트웨어 비교기를 통해 발생한 신호는 여전히 모터 권선의 전원이 제거되는 (De-Energization) 이벤트에 의해 발생하는 노이즈를 지니고 있으며, 전기적 스위치에 의해 발생하는 노이즈(Ringing Noise)를 가지고 있다.

20kHz로 BEMF 신호를 샘플링 하게 되면 샘플링된 BEMF 신호에서는 스위칭 노이즈를 감소시킬 수 있게 되며 결과적으로 제로-크로싱 이벤트를 검출하기가 훨씬 쉽게 된다. 그러나 이러한 에일리어싱 트릭 (Aliasing Trick)은 BEMF 신호를 완벽하게 필터링 하기에는 충분하지 않다. 따라서, Majority 함수를 이용한 필터 (Majority Function Filter)가 사용된다.

FILTERING THE BEMF SIGNALS USING THE MAJORITY FUNCTION FILTER

Majority 함수를 이용한 비선형 필터의 수행은 6개의 샘플을 기본으로 하고 있으며, 이들 샘플들은 디지털화된 BEMF 신호에서 제로-크로싱 이벤트의 발생을 검출하기 위해서는 적어도 3개의 상위 (Most Significant) 샘플 중 51%(과반수)는 “1” 이어야 하고, 3개의 하위(Least Significant) 샘플 중 51%(과반수)는 “0” 이어야 한다. 이러한 필터링 단계를 통해 더욱 강인한(Robust) 알고리즘 결과를 얻을 수 있게 된다.

Majority 함수 필터는 두 개의 논리 연산자를 이용하여 수행된다. AND 연산자는 커뮤테이션 상태에 부응하는 액티브(Active) BEMF 신호를 검출하기 위한 것이고, XOR(Exclusive-OR) 연산자는 액티브(Active) BEMF 신호에서의 상승 및 하강 에지 (Falling/Rising Edge)를 검출하기 위해 사용된다. 이 논리 연산자의 출력을 다음 섹션에서는 “Active-Masked BEMF Signal” 이라 부르게 된다. 이제 Active-Masked BEMF 신호는 Majority 검출 필터를 이용하여 필터링 되는데 이 필터는 64개의 값으로 구성된 배열과 다음의 데이터 배열의 포인터를 변경하기 위한 특별한 논리 테스트 조건(Special Logic Test Condition)을 가지고 수행된다. 또한 논리 조건 테스트는 Active-Masked BEMF 신호의 상승/하강 에지를 분별하게 되며, 이들 에지는 논리적 테스트 조건(Logical Test Condition)의 출력에서 참(True)과 거짓(False)로 표현되며 이 출력 값은 Majority 검출 필터의 입력으로 사용된다.

64개의 배열 인덱스 값들은 Active-Masked BEMF 신호에 대한 6-샘플 윈도우가 가질 수 있는 2^6 조합을 의미 한다(이진수 6자리의 값 = $2^6 = 64$). 룩-업 테이블(Look-up Table)에서의 각 값은 다음 시간에 대한 신호 상태에 대한 포인터이다. 필터는 항상 논리 테스트 조건의 출력이 True 에서 False로의 변화(True-to-False)하는 것을 감시한다. 만약 이 True-to-False 조건이 감지되면, 필터는 제로-크로싱 이벤트를 검출하기 위해 3개의 연속적인 거짓(False) 상태를 찾고자 한다. 따라서 모터의 커뮤테이션은 한 구간의 시간 지연 (Delay)이 발생하게 된다. 이 시간지연은 전기적인 30° 위상에 해당하는 시간에서 디지털 필터를 수행하기 위해 요구되는 시간지연을 뺀 값과 동일하다. 커뮤테이션을 수행한 이후에는 새로운 BEMF 신호를 다시 모니터링 하게 된다.

64개의 배열 값은 다음과 같이 결정된다.

- 처음 32개의 값은 식 7과 같이 인덱스 번호(Index Number: N)의 2배가 된다.

EQUATION 7: Calculating the First Half of the Array

$$Array\ Value[N] = N \cdot 2$$

- 나머지 32개의 값은 식 8을 이용하여 채워진다.

EQUATION 8: Calculating the Second Half of the Array

$$Array\ Value[N] = (N - 32) \cdot 2$$

Array Index [N]	Array Value			Array Index [N]	Array Value		
0	0	17	34	32	0	49	34
1	2	18	36	33	2	50	36
2	4	19	38	34	4	51	38
3	6	20	40	35	6	52	40
4	8	21	42	36	8	53	42
5	10	22	44	37	10	54	44
6	12	23	46	38	12	55	46
7	14	24	48	39	14	56	48
8	16	25	50	40	16	57	50
9	18	26	52	41	18	58	52
10	20	27	54	42	20	59	54
11	22	28	56	43	22	60	56
12	24	29	58	44	24	61	58
13	26	30	60	45	26	62	60
14	28	31	62	46	28	63	62
15	30			47	30		
16	32			48	32		

[테이블 7] Array Values

위의 테이블에는 True-to-False 조건을 표현하는 16개의 유일(Unique) 배열 인덱스 수 (N: 24, 25, 26, 28, 40, 41, 42, 44, 48, 49, 50, 52, 56, 57, 58, 60) 가 존재한다. 이들 유일 배열 인덱스에 의해서 지정되는 값들은 True-to-False 조건이 발생된 것을 표기하기 위해 “1” 로 대체된다. 16개의 유일 인덱스 값은 다음의 Majority Function Criteria를 이용하여 선택 된다. 배열 인덱스 수(N)는 그의 이진 표현 중 상위 3비트의 Majority(과반수, >50%)가 “1” 이고, 하위 3비트의 Majority(과반수, >50%)가 “0” 일 때 유일(Unique) 배열 인덱스가 된다. 테이블 8은 이러한 두 가지 조건을 만족하는 16가지 경우의 수를 보여주고 있다.

Number	6-bit Binary Representation
24	011000
25	011001
26	011010
28	011100
40	101000
41	101001
42	101010
44	101100
48	110000
49	110001
50	110010
52	110100
56	111000
57	111001
58	111010
60	111100

[테이블 8] 16 Unique Numbers that notify a True-to-False Condition in the active masked BEMF

48개의 나머지 배열 인덱스 수들은 True-to-False 조건이 발생하는 경우의 유일(Unique) 값을 가리킨다. 이 값들은 16개의 유일(Unique) 수의 배수가 될 수 없기 때문에 유일 수를 가리킬 수 없게 된다. 테이블 9는 이 조건에 해당되는 몇 가지 수를 보여주고 있다.

Number	6-bit Binary Rep.	Number of Times to be Right-Shifted	Unique Number to be Pointed	6-bit Binary Rep. of Unique Number
3	000 011	3	24	011 000
11	001 011	3	24	011 000
54	1 10110	1	44	10110
7	00 0111	2	28	0111 00

[테이블 9] 유일 수의 배수가 되는 수

이들 수(16개의 유일 수를 가리킬 수 없는 수)들은 자신의 배수를 가리키며 필터가 유일 수(Unique Number)를 가리키는 새로운 수가 입력되기를 기다리는 루프를 반복하게 된다. 테이블 10은 유일 수(Unique Number)의 배수가 되지 않는 수들을 보여주고 있다.

Number	6-bit Binary Rep.	Numbers Pointed Before Becoming Zero	Number of Times to be Right-Shifted
1	000001	2, 4, 8, 16, 32	5
9	001001	18, 36, 8, 16, 32	5
36	100100	8, 16, 32	3
17	010001	34, 4, 8, 16, 32	5

[테이블 10] 유일 값을 가리킬 수 없는 수

테이블 11은 완전한 Majority 필터의 계수(Coefficient)를 보여주고 있으며, 유일 수의 배열 값이 “1”로 표기된 16개가 “True”에서 “False”로 변하는 유일 배열 인덱스에 해당하며, 제로-크로스 이벤트를 검출하기 위한 포인트가 된다.

테이블 12는 완전한 필터링 과정의 예를 보여주고 있다. 입력 값은 노이즈가 없는 BEMF 신호의 이진(Binary) 표현을 의미한다. 테이블 13은 완전한 필터링 과정의 예를 보여주고 있으며, 이 경우 입력 값은 노이즈가 섞인 BEMF 신호의 이진(Binary) 표현이 된다.

Array Index [N]	Array Value	Array (Unique Numbers)				Array Index [N]	Array Value	Array (Unique Numbers)			
0	0	0	17	34	34	32	0	0	49	34	1
1	2	2	18	36	36	33	2	2	50	36	1
2	4	4	19	38	38	34	4	4	51	38	38
3	6	6	20	40	40	35	6	6	52	40	1
4	8	8	21	42	42	36	8	8	53	42	42
5	10	10	22	44	44	37	10	10	54	44	44
6	12	12	23	46	46	38	12	12	55	46	46
7	14	14	24	48	1	39	14	14	56	48	1
8	16	16	25	50	1	40	16	1	57	50	1
9	18	18	26	52	1	41	18	1	58	52	1
10	20	20	27	54	54	42	20	1	59	54	54
11	22	22	28	56	1	43	22	22	60	56	1
12	24	24	29	58	58	44	24	1	61	58	58
13	26	26	30	60	60	45	26	26	62	60	60
14	28	28	31	62	62	46	28	28	63	62	62
15	30	30				47	30	30			
16	32	32				48	32	1			

[테이블 11] Majority Filter Coefficients

다음의 테이블 12,13에서의 계산은 샘플링된 BEMF 신호가 가상 중성점 (Virtual Neutral Point)과 비교 연산이 수행된 후의 BMEF 신호의 이진수(Binary) 표현이라는 사실에 주목하자. 이들 2개의 테이블은 20kHz 샘플링 주파수를 표현한 것이 아니며 테이블에서 보여주는 샘플들은 임의의 샘플링 주파수를 이용하여 임의로 샘플링된 것을 보여주고 있는 것이다.

제로-크로싱 이벤트가 검출되었을 때, 6-스텝 커뮤테이션 스텝에 따른 시간 지연 후에 dsPIC DSC 디바이스는 전압 드라이브 (Voltage Drive)를 커뮤테이트(Commutate) 하게 된다. 고정자(Stator)의 자계(Magnetic Field)가 회전자(Rotor)의 자계보다 앞서도록 유지하기 위해서는 하나의 섹터로부터 다른 섹터로의 변경(Transition)은 최적 토크 (Optimal Torque)를 위한 정밀한 회전자 위치에서 발생해야 한다.

이러한 커뮤테이션 지연(Delay)은 30° 전기적 각도에 해당하는 시간에서 디지털 필터링 과정을 수행에 요구되는 시간을 뺀 값과 동일하게 된다. 커뮤테이션 지연을 결정하기 위해서, dsPIC DSC의 타이머 중 하나는 하나의 제로-크로싱 이벤트로부터 다음 이벤트까지 소요된 시간의 양을 측정하기 위해 사용된다. 결과적으로 이 측정된 시간은 전기적 각도 60° 에 해당한다.

제로-크로싱 이벤트가 검출되었을 때 위상 지연이 없다고 가정하면 다음 커뮤테이션은 30° 에서 발생해야 한다. 타이머 캡처 값을 2로 나누면 전기적 각도 30° 가 된다. 이 값은 커뮤테이션 지연을 발생하기 위해 다른 타이머의 주기 레지스터 (PRx)에 로딩되며, 또한 이 타이머는 커뮤테이션 타이머로써 참조가 된다. 커뮤테이션 타이머에 대한 인터럽트가 발생하면, 이것은 모터 권선을 다음 상태(State)로 커뮤트(Commute) 할 시간이 되었음을 의미한다.

ELECTRICAL ANGLE	BEMF Phase			XOR-Masked Phase			AND-Masked Phase			LOGICAL TEST CONDITION	COMMUTATION STEP	DIGITAL FILTER OUTPUT	ZERO-CROSSING EVENT	AND MASK	XOR MASK	
	C	B	A	C	B	A	C	B	A							
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	FALSE	000	000	
3	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	FALSE	010	000
6	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	2	FALSE	001	111
9	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	6	FALSE	100	000
12	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	14	FALSE	010	111
15	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	30	FALSE	001	000
18	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	FALSE	100	111
21	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	FALSE	000	000
24	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	FALSE	—	—
27	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	FALSE	—	—
30	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	FALSE	—	—
33	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	FALSE	—	—
36	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	FALSE	—	—
39	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	FALSE	—	—
42	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	FALSE	—	—
45	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	FALSE	—	—
48	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	FALSE	—	—
51	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	FALSE	—	—
54	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	FALSE	—	—
57	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	FALSE	—	—
60	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	62	FALSE	—	—
63	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	60	FALSE	—	—
66	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	FALSE	—	—
69	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	TRUE	—	—
72	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	4	FALSE	—	—	
75	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	10	FALSE	—	—	
78	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	22	FALSE	—	—	
81	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	46	FALSE	—	—	
84	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	30	FALSE	—	—	
87	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	FALSE	—	—	
90	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	FALSE	—	—	
93	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	FALSE	—	—	
96	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	FALSE	—	—	
99	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	FALSE	—	—	
102	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	FALSE	—	—	
105	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	FALSE	—	—	
108	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	FALSE	—	—	
111	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	FALSE	—	—	
114	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	FALSE	—	—	
117	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	62	FALSE	—	—	
120	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	62	FALSE	—	—	
123	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	60	FALSE	—	—	
126	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	1	FALSE	—	—	
129	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	2	TRUE	—	—	
132	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	3	4	FALSE	—	—	

[타이틀 12] Example of Digital Filtering Computations using Noiseless BEMF Signals

ELECTRICAL ANGLE	BEMF Phase			XOR-Masked Phase			AND-Masked Phase			LOGICAL TEST CONDITION	COMMUTATION STEP	DIGITAL FILTER OUTPUT	ZERO-CROSSING EVENT	AND MASK	XOR MASK
	C	B	A	C	B	A	C	B	A						
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	FALSE	000	000
3	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	FALSE	010	000
6	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	2	FALSE	001	111
9	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	4	FALSE	100	000
12	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	10	FALSE	010	111
15	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	22	FALSE	001	000
18	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	46	FALSE	100	111
21	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	FALSE	000	000
24	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	2	FALSE	—	—
27	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	6	FALSE	—	—
30	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	14	FALSE	—	—
33	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	30	FALSE	—	—
36	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	62	FALSE	—	—
39	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	FALSE	—	—
42	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	2	FALSE	—	—
45	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	6	FALSE	—	—
48	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	12	FALSE	—	—
51	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	26	FALSE	—	—
54	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	54	FALSE	—	—
57	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	FALSE	—	—
60	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	TRUE	—	—
63	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	2	4	FALSE	—	—
66	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	10	FALSE	—	—
69	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	2	22	FALSE	—	—
72	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	2	44	FALSE	—	—
75	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	1	FALSE	—	—
78	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	2	FALSE	—	—
81	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	4	FALSE	—	—
84	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	2	10	FALSE	—	—
87	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	22	FALSE	—	—
90	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	2	44	FALSE	—	—
93	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	1	FALSE	—	—
96	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	2	FALSE	—	—
99	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	2	4	FALSE	—	—
102	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	10	FALSE	—	—
105	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	22	FALSE	—	—
108	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	2	46	FALSE	—	—
111	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	1	FALSE	—	—
114	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	2	2	FALSE	—	—
117	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	6	FALSE	—	—
120	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	14	FALSE	—	—
123	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	26	FALSE	—	—
126	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	1	FALSE	—	—
129	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	2	2	TRUE	—	—
132	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	3	4	FALSE	—	—

[타이틀 13] Example of Digital Filtering Computations using Noisy BEMF Signals

START-UP SEQUENCE

모터의 기동(Start-Up) 시퀀스는 두 가지 단계로 구성된다.

- STEP 1 :
회전자(Rotor)의 위치를 확인하기 위해 사전에 정의된 커뮤테이션으로 1 ms 시간 동안 1024개의 펄스를 인가한다.
- STEP 2 :
모터가 정지상태에서 회전하기 위해 필요한 최소의 PWM 듀티사이클로 6-스텝 커뮤테이션을 인가함으로써 모터가 개-루프(Open Loop)에서 회전하게 한다.

HURST 모터의 경우, 모터의 정지 관성을 극복하기 위해서 요구되는 PWM 듀티 사이클은 7.5% 이다. 일단 모터가 회전하게 되면, BEMF 신호가 검출되고 이후 알고리즘은 개-루프(Open Loop)와 폐-루프(Closed Loop)로 동작하게 된다.

CONTROL LOOPS

BLDC 모터의 흥미 있는 특성은 동기모터라는 점이다. 이것은 특정 부하 조건에서 인가된 전압, 커뮤테이션 속도가 주어지면, 모터는 이들 세 개의 변수가 이상적인 값으로부터 크게 변하지 않는다면 커뮤테이션 속도에 따라 개-루프(Open Loop)를 유지하게 된다는 것을 의미한다. 변수의 이상적인 값은 모터 전압과 토크 상수에 의해서 결정된다.

인가전압에 대해 커뮤테이션 속도가 너무 느린 경우에는 BEMF는 매우 작은 값이 되며 결과적으로 모터에 많은 전류가 흐르게 된다. 모터는 다음 상(Phase)의 위치로 가속하는 반응을 하게 될 것이며 다음(Next) 커뮤테이션을 기다리기 위해 속도가 느려질 것이다.

반대의 경우에는 다음 커뮤테이션이 발생할 때까지 스텝퍼 모터처럼 각각의 위치로 즉시 이동하게 될 것이다. 모터는 커뮤테이션 속도보다 빠르게 회전할 수 없기 때문에 이상적인 값보다 훨씬 느린 속도로 회전을 유지하게 되지만, 과도한 전류가 흐르게 되는 위험을 감수해야 한다.

만약 커뮤테이션이 너무 빠르게 도달해서 모터가 다음에 이어지는 커뮤테이션을 찾을 수 있을 만큼 충분히 빠르게 가속될 수 없다면, 피드백 루프를 잃고 모터의 회전이 느려지게 된다.

뜻하지 않게 피드백 루프를 잃게 되면 이는 폐-루프(Closed Loop) 제어를 곤란하게 만드는 불연속적인 모터의 응답과 같이 보일 것이다. 폐-루프 제어의 대안은 자동 폐쇄식 개-루프 제어(Self-Locking Open Loop Control)가 수행될 때까지 커뮤테이션 속도를 조절하는 것이다. 이 응용 소프트웨어는 센서리스 동작 동안 선택 가능한 다음의 두 가지 모드의 제어를 가지고 있다.

- *Open Loop*
- *Closed Loop*

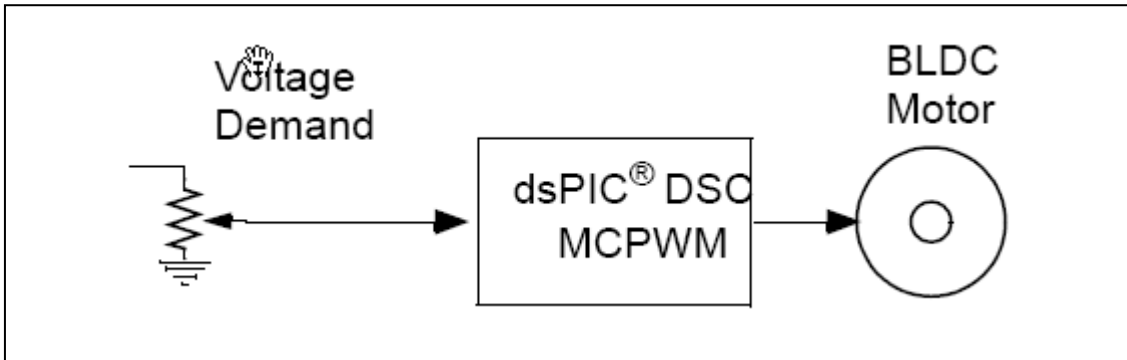
Open Loop Mode

모터의 부하가 동작 범위에 대해 일정할 때는 인가 전압에 대한 모터의 속도 반응 곡선이 선형적이다. 만약 부하가 일정하고 인가 전압이 제대로 조절된다면, 모터는 모든 속도 영역에 대해서

개-루프 (Open Loop) 제어가 가능하다.

PWM에 의한 실제 전압이 PWM 듀티 사이클과 선형적으로 비례한다고 가정해보자.

개-루프 (Open Loop) 제어기는 PWM 듀티 사이클을 16비트 변수와 연계되어 만들어질 수 있다. 이 16비트 변수 값은 가변저항(Potentiometer) 양단에 걸리는 전압을 감지하여 ADC 채널을 이용하여 설정될 수 있다. 그림 12는 이러한 모드의 블록다이어그램을 보여주고 있다.



[그림 12] 개-루프 (Open Loop) 제어

A/D 컨버전 값은 부호 없는 정수형(Undsigned Integer) 포맷으로 변환되므로 그 값은 0~1023이 된다. 따라서 이 변환 값을 PWM 듀티 사이클의 범위에 맞게 스케일링을 해준다(Equation 9 참조). 여기에서 소개되는 예제는 PWM 듀티 사이클 값이 0~1473 범위의 값이 된다.

EQUATION 9: Calculating the PWM Duty Cycle Range

$$PWM \text{ Duty Cycle Range} = \frac{F_{CY}}{F_{PWM}} - 1$$

Fcy : 시스템 주파수, 약 29.4 Mhz

Fpwm : PWM 주파수, 20 kHz

MCPWM, ADC, I/O 포트, TIMER3을 초기화 한 이후, 프로그램은 모터를 기동시키기 위한 신호(예: 스위치 입력)를 기다리게 된다.(그림 14 참조) 만약 키가 눌러지면, 모터의 기동 시퀀스가 수행되고 BEMF 신호와 POT 값이 샘플링되고 필터링 과정을 수행하게 된다.

제 로-크로싱 이벤트와 전류 커뮤테이션 상태를 기본으로, 테이블로부터 해당하는 값이 불러지고, 이 값은 커뮤테이션 지연 후에 다음 커뮤테이션 스텝의 전기적 스위치를 설정하기 위해 PWM의 OVDCON 레지스터에 쓰여진다. 그림 16, 17은 프로그램의 흐름을 보여주고 있다.

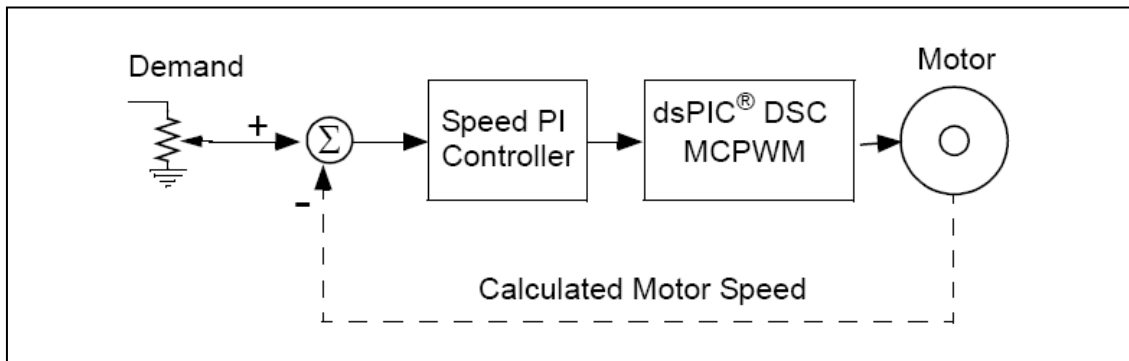
초기 PWM 듀티 사이클 값은 기본적으로 7.5%로 고정되어 있다. 바로 다음의 ADC 인터럽트 서비스 루틴에서 POT 값이 읽어지고 스케일링되며 이 값은 PWM PDCx 레지스터에 복사될 때 듀티 사이클로

반영이 된다. 이 과정은 모터의 속도를 결정하기 때문에 보다 큰 값이 PDCx 레지스터에 입력되면 모터의 회전속도는 더욱 빠르게 될 것이다.

Closed Loop Mode

폐-루프 (Closed Loop) 제어모드에서는 모터에 전달되는 PWM 듀티 사이클을 제어하기 위해 속도 제어 루프가 사용된다. 속도 지령치는 가변저항(POT)에 의해서 결정이 되며, 그 값은 요구되는 속도 범위를 얻기 위해 스케일링 된다. 속도 제어기는 PI 제어기를 이용하여 속도 지령 값과 측정(계산)된 모터 속도와의 오차를 보상하기 위해 사용된다.

그림 13은 폐-루프 속도 제어 모드의 블록다이어그램 이다.



[그림 13] 폐-루프 (Closed Loop) 속도 제어 모드

Equation 1,2,3을 이용하면, 모터의 극 수 (Number of Pair Poles)와 초당 전기적 회전 수를 알고 있다면, 모터의 속도를 계산할 수 있게 된다. 전기적으로 1 사이클은 6-스텝 커뮤테이션의 1 사이클과 동일하므로, 기계적 회전 수는 6-스텝 커뮤테이션 사이클 수와 비례하게 된다.

2쌍극(4극) 모터의 경우, 모터가 기계적으로 1회전을 하기 위해서는 6-스텝 커뮤테이션 사이클을 2회 수행해야 한다. 그러므로, 초당 6-스텝 커뮤테이션 사이클의 수를 카운팅 하고, 그 값을 모터의 극 수로 연산함으로써 초당 기계적 회전 수를 측정할 수 있게 된다.

모터의 초당 기계적 회전 수를 계산하기 위해서, TIMER3는 Free-Running Up-Counting 모드로 동작하도록 설정하고, 시스템 주파수(Fcy=29.4Mhz)를 256 분주하도록 설정함으로써 8.68 us 기준 타이머가 되도록 설정한다. 이 기준 타이머 (TIMER3)는 8.68 us ~ 568.84 ms 까지 카운팅 할 수 있다. 따라서 이 타이머는 모터의 정확한 속도를 정확하게 계산하기 위한 충분한 분해능으로 저속에서 고속까지 전 영역 측정이 가능하다.

TIMER3는 이제 N 개의 6-스텝 커뮤테이션 사이클이 수행될 때마다 트리거(Trigger) 된다. 여기에서 N은 모터의 자석 쌍(Pair Poles)의 수를 의미한다. (예: 6극 모터인 경우 → N=3)

그러므로, TIMER3는 기계적인 한 사이클마다 트리거 된다.

일단 현재 속도가 계산되면, 이 값은 가변저항(POT)의 스케일링된 값에 의해 설정된 속도 지령값과 비교된다. 속도 지령 값과 현재속도 사이의 비례 및 적분 오차가 계산되고 Equation 10과 같이 PI

계인 상수가 곱해진다.

EQUATION 10: PI Controller Computations

$$\begin{aligned} \text{Speed Error} &= \text{Desired Speed} - \text{Current Speed} \\ \text{Integral Error} &= \text{Integral Error} + \text{Speed Error} \\ \text{PI Controller Output} &= (K_P) \cdot \text{Speed Error} + (K_I) \cdot \text{Integral Error} \end{aligned}$$

PI 제어기 출력은 이제 PWM 듀티 사이클의 범위에 맞도록 스케일링된다. 그림 14, 15, 16은 개루프(Open Loop) 및 폐루프(Closed Loop)에 대한 완벽한 소프트웨어 흐름을 보여주고 있다.

CONCLUSION

본 App. Note는 디스크리트 부품, 하드웨어적인 저역 필터 (Low Pass Filter), 비교기 부품을 사용하지 않고 기본적으로 간단한 형태의 새로운 BLDC 제어 기법을 이용하여 센서리스 BLDC 모터 구동을 수행하고자 하는 개발자를 위한 것이다. 또한 dsPIC DSC 디바이스를 기본으로 하는 단일 칩 솔루션의 이 제어 방법은 BEMF 신호를 dsPIC DSC의 ADC 동작 전압 범위로 조절하기 위한 몇 쌍의 저항 외에는 어떠한 외부 하드웨어를 필요로 하지 않는다. 여기에서 소개된 비선형 디지털 필터링 알고리즘은 BLDC 모터의 회전에 의해 발생한 BEMF 신호를 감지하기 위해 Majority Detection Function을 기본으로 사용하고 있다. 이 기법은 이전의 Microchip App. Note AN901, AN992, AN1083과는 완전히 다른 기법을 사용하고 있다. 가장 중요한 차이점은 무엇인 살펴보자.

AN1083에서 ADC는 매우 높은 샘플링 주파수로 BEMF 신호를 샘플링하기 위해 사용되었으며, 이들 샘플들은 IIR 필터를 이용하여 BEMF 신호를 재구성하였으며, 제로-크로싱 이벤트를 찾기 위한 임계 전압은 $V_{BUS}/2$ 전압을 이용하였다. 또한 타이머는 IIR 필터의 수행에 의해 발생하는 시간 지연으로 인한 커뮤테이션 시간을 결정하기 위해서 사용되었다. 저속에서는 3개의 BEMF 신호를 필터링 하였고, 한 개의 타이머는 6-스텝 커뮤테이션이 정확한 시간에 발생하는 지를 확인하기 위해 사용되었다. 반면 고속에서는 한 개의 BEMF 신호만을 필터링 하였으며, 3개의 타이머가 6-스텝 커뮤테이션이 정확한 시간에 발생하는지를 확인하기 위한 용도로 사용되었다.

AN901은 PWM OFF 시간에 샘플링을 하였으며, PWM 신호의 극성이 반전되어서 결과적으로 PWM ON 시간에 샘플링한 것과 유사한 결과를 얻게 되었다. 이 경우 신호들은 고정된 지점(PWM OFF 시간의 끝 지점 부근)에서 샘플링 되었다. 샘플링된 신호들은 $V_{BUS}/2$ 전압과 비교하여 제로-크로싱 이벤트를 결정하였다. 이것은 N-샘플링 윈도우를 이용하였으며, N-샘플링 윈도우에 있는 샘플들은 $V_{BUS}/2$ 와 비교 연산이 수행된다. 만약 앞부분의 N/2 개의 샘플이 $V_{BUS}/2$ 보다 작고, 뒷부분의 N/2 개의 샘플이 $V_{BUS}/2$ 보다 크면, 제로-크로싱 이벤트가 발생한 것으로 간주하였다.

디지털 필터링은 BEMF 신호에서 제로-크로싱 이벤트를 보다 정확하게 검출할 수 있도록 해준다. dsPIC DSC 디바이스에 의해 제로-크로싱 이벤트가 검출되면, 이 것은 모터 권선을 커뮤트(Commute) 하기 위해 필요한 정보들을 알고리즘에 제공한다.

6-스텝 또는 사다리꼴 커뮤테이션을 이용하여 구동되는 BLDC 모터의 센서리스 제어의 핵심은 BMEF 신호에서 제로-크로싱 이벤트를 정확하게 검출하는 것이다. 하드웨어 필터나 외부 비교기를 사용하는 것과 반대로 디지털 필터링을 사용하는 것은 상대적으로 적은 하드웨어를 필요로 하므로 비용을 절감하고 PCB의 면적을 최소화할 수 있는 해법이 된다.

REFERENCES

- Valiant, L. (1984), *"Short Monotone Formulae for the Majority Function"*, Journal of Algorithms 5: 363-366.
- *"Modern Power Electronics and AC Drives"*, B. Bose, Prentice Hall PTR, ISBN 0130167436
- *"Electric Motors and Drives"*, A. Hughes, Heinemann Newnes, ISBN 0750617411
- *"Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives"*, T. Miller, Oxford Clarendon, ISBN 0198593694
- K. Iizuka et. al., *"Microcomputer Control for Sensorless Brushless Motor"*, IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 21, No.4 1985, pp 595-601
- AN857, *"Brushless DC Motor Control Made Easy"*, Microchip Technology Inc., 2002
- AN901, *"Using the dsPIC30F for Sensorless BLDC Control"*, Microchip Technology Inc., 2007
- AN957, *"Sensored BLDC Motor Control Using dsPIC30F2010"*, Microchip Technology Inc., 2005
- AN970, *"Using the PIC18F2431 for Sensorless Motor Control"*, Microchip Technology Inc., 2005
- AN992, *"Sensorless BLDC Motor Control Using dsPIC30F2010"*, Microchip Technology Inc., 2005
- AN1017, *"Sinusoidal Control of PMSM Motors with dsPIC30F DSC"*, Microchip Technology Inc., 2005
- AN1078, *"Sensorless Field Oriented Control of PMSM Motors"*, Microchip Technology Inc., 2007