

A study of control systems for brushless DC motors

Brushless DC (BLDC) are replacing DC motors in wide range of applications such as household appliances, automotive and aviation.

BLDC 는 가전제품,자동차와 항공기와 같은 광범위한 응용에서 DV 모터를 대체하고 있다.

These applications require a very robust, high power density and efficient motor for operation.

이러한 응용은 작동을 위해 매우 견고하고 높은 전력 밀도와 효율적인 모터가 필요하다.

BLDCs are commutated electronically unlike the DC motor.

BLDC 는 DC 모터와 달리 전자식으로 정류된다(방향을 바꾼다).

BLDCs are controlled using a microcontroller which powers a three phase power semiconductor bridge.

BLDC 는 3 상 전력 반도체 브릿지에 전원을 공급하는 마이크로 컨트롤러를 사용하여 제어된다.

This semiconductor bridge provides power to the stator windings based on the control algorithm.

이 반도체 브릿지는 제어 알고리즘을 기반으로 고정자 권선에 전력을 공급한다.

The motor is electronically commutated, and the control technique/ algorithm required for commutation can be achieved either by using a sensor or a sensorless approach.

모터는 전자적으로 정류되며, 정류에 필요한 제어 기술/알고리즘은 센서 또는 Sensorless 방식을 사용하여 수행할 수 있다.

To achieve the desired level of performance the motor also can be controlled using a velocity feedback loop.

원하는 수준의 성능을 얻으려면 속도 피드백 루프를 사용하여 모터를 제어 할 수도 있다.

Sensorless control techniques such as Direct Back Electromotive Force (BackEMF), Indirect Back EMF Integration and Field Oriented Control (FOC) are studied and discussed.

Direct Back Electromotive Force (BackEMF), Indirect Back EMF Integration 와 Field Oriented Control (FOC)과 같은 Sensorless 제어 기법을 연구하고 논의한다.

To achieve a desired level of performance in various applications that require the motor to operate at constant speed over various loads, the motor has to be operated using a suitable velocity control loop.

모터가 다양한 부하에 대해 일정한 속도로 작동 해야 하는데 다양한 응용에서 원하는 수준의 성능을 얻으려면 적절한 속도 제어 루프를 사용하여 모터를 작동 해야 한다.

These types of controllers are achieved by using a conventional proportional- integral (PI) controller.

이러한 유형의 제어기는 기존의 비례-적분(PI)제어기를 사용하여 수행된다.

The speed vs. torque characteristics of several different sensorless control techniques of BLDCs were studied and compared to the speed vs torque curve of a separately excited DC motor.

BLDC 의 여러 Sensorless 제어 기술의 속도 대 토크 특성을 연구하고 속도 대 별도의 동작된 DC 모터의 토크곡선을 비교한다.

The speed vs torque characteristic of a BLDC using a PI controller is also discussed.

PI 제어기를 사용하는 BLDC 의 속도 대 토크 특성에 대해서도 설명한다.

Chapter 1

Introduction Household appliances are one of the fastest growing markets for BLDCs[1].

소개 가전 제품은 BLDC 시장에서 가장 빠르게 성장하는 시장 중 하나다.

Common household appliances which use electric motors include air conditioners, refrigerators, vacuum cleaners, washers and dryers.

전기 모터를 사용하는 일반적인 가전 제품에는 에어컨, 냉장고, 진공청소기, 세탁기, 건조기가 포함된다.

These appliances have relied on traditional electric motors such as single phase AC motors including capacitor- start, capacitor- run motors, and universal motors.

이러한 기기는 커패시터-시작, 커패시터-실행모터와 범용모터를 포함하는 단상 AC 모터와 같은 기존 전기 모터에 의존해왔다.

However, consumers now demand better performance, reduced acoustic noise and higher efficient motor for their appliances.

그러나 소비자들은 이제 더 나은 성능, 소음 감소와 더 높은 효율의 모터를 요구한다.

Hence, BLDC have been introduced in order to fulfill these requirements.

따라서 BLDC 는 이러한 요구사항을 충족시키기 위해 도입되었다.

Brushless DC motors (BLDC) are usually small horsepower control motors that provide various advantages such as high efficiency, quiet operation, high reliability, compact form and low maintenance.

BLDC 모터는 일반적으로 고효율, 저소음 작동, 높은 신뢰성, 소형제품과 낮은 유지보수와 같은 다양한 장점을 제공하는 소형마력 제어 모터다.

However, there are disadvantages for the BLDC because of variable speed, and therefore adjustable speed drives are used to overcome this.

그러나 가변 속도 때문에 BLDC 에는 단점이 있으면, 따라서 이를 조정하기 위해 조정 가능한 속도 드라이브가 사용된다.

1.1 BLDC motor applications

1.1.1 Open Loop Applications

Some examples representing open loop control are fans, pumps and blowers.

예를 들어, 개방루프제어를 나타내는 것은 팬, 펌프, 송풍기다.

These applications only require a simple low cost controller[1].

이러한 응용은 단순한 저가의 컨트롤러만 필요하다.

1.1.2 Applications with speed control

속도 제어 기능이 있는 응용 프로그램

These applications may demand high speed control accuracy and good dynamic response.

이러한 응용은 고속 제어 정확도와 우수한 동적 응답을 요구할 수 있다.

Some examples for these applications are washers, dryers and other household appliances.

이러한 응용 분야의 예로 세탁기,건조기 및 기타 가전 제품이 있다.

Applications with speed control are also found in the automotive area for uses such as fuel pumps, electronic steering, and engine controls.

속도 제어 기능이 있는 응용은 연료 펌프, 전자식 조향 장치와 엔진 제어 장치와 같은 용도로 자동차 분야에서도 사용된다.

An advanced control algorithm is often required by these applications, which makes them more expensive [1].

고급 제어 알고리즘은 이러한 응용에 필요하기 때문에 비용이 많이 든다.

1.1.3 Application with positioning applications

위치 지정 응용 프로그램과 함께 사용하는 응용프로그램

In these applications importance is given to fast dynamic response to speed and torque changes.

이러한 응용에서 속도와 토크변화에 대한 빠른 동적 응답이 중요하다.

Many industrial and automation applications come under this category.

많은 산업과 자동화 응용이 이 범주에 속한다.

Also, some of these applications may have frequent reversals of rotational direction.

또한 이러한 응용 중 일부는 회전 방향이 빈번하게 반전될 수 있다.

A typical cycle in these applications will consist of four phases: an accelerating phase, a constant speed phase, a deceleration phase and a positioning phase[1].

이러한 응용 분야의 일반적인 사이클은 가속 단계, 정속 단계 감속 단계와 위치 결정단계의 4 단계로 구성된다.

The load on the motor can vary in all these phases, causing an increase in the complexity of the controller's algorithm.

모터의 부하는 이 모든 단계에서 달라질 수있어 제어기 알고리즘의 복잡성이 증가한다.

These systems mostly operate in closed loop with three control loops functioning simultaneously: a Torque Control Loop, a Speed Control Loop and a Position Control Loop[1].

이러한 시스템은 대부분 3 개의 제어루프가 동시에 작동하는 폐쇄 루프에서 작동한다:

토크 제어 루프, 속도 제어 루프 및 위치제어 루프

Sometimes sensors are required to reduce the commutation time.

때때로 센서는 정류 시간을 줄이기 위해 필요하다.

1.2 BLDCs vs. Conventional DC motors

BLDC vs 기존 DC 모터

In a conventional (brushed) DC motor, the brushes are responsible for making the mechanical contact with a set of electrical contacts on the rotor referred to as the commutator [1].

BLDC 모터에서, 브러시는 정류자[1]로 불리는 회전자 상의 전기 접점 세트와의 기계적 접촉을 담당한다.

This forms an electric circuit between the DC electrical source and the armature coil windings.

이것은 DC 전기 소스와 전기자 코일 권선 사이에 전기 회로를 형성한다.

As the armature rotates, the stationary brushes come in contact 3 with different sections of the commutator.

전기자 회전함에 따라, 고정 브러시는 정류자의 다른 부분과 접촉하게 된다.

The rotating commutator and the brush- system form a set of electrical switches which operate in a sequence to allow electric current to flow through the armature coils closest to the field which may be an electromagnet or a permanent magnet [1].

회전 정류자와 브러시 시스템은 전자석 또는 영구 자석 일수 있는 전기장 코일에 전류가 흐르도록 시퀀스로 작동하는 일련의 전기 스위치를 형성한다.

In a BLDC motor, armature coils do not move, and instead, the permanent magnets rotate.

BLDC 모터에서 전기자 코일은 움직이지 않으며 대신 영구 자석이 회전한다.

Therefore the armature remains static which avoids the problem of how to transfer current to a moving armature [1].

따라서 전기자는 움직이지 않는 전기자에 전류를 전달하는 방법의 문제를 피하는 정적인 상태로 유지되나.

In a BLDC the commutator assembly is replaced by an electronic controller which is programmed to perform the coil switching.

BLDC 에서 정류자 어셈블리는 코일 스위칭을 수행하도록 프로그래밍 된 전자 제어기로 대체된다.

Listed below are some of the major advantages of BLDCs:

다음은 BLDC 의 주요 이점 중 일부다.

- ♣ High efficiency 고효율
- ♣ Long operating life 긴작동수명
- ♣ Low Noise 저소음
- ♣ Variable High speed ranges[1] 다양한 고속범위

The BLDCs main disadvantage is its cost. BLDC 의 가장 큰 단점은 비용이다.

1.3 A brief review on control of the BLDC motor

BLDC 모터의 제어에 관한 간단한 검토

For sensored BLDCs, Hall Effect devices are present in the stator to detect the rotor position.

감지 BLDC 의 경우 회전자 위치를 감지하기 위해 고정자에 홀효과 장치가 있다.

These sensors face the magnets perpendicularly and can distinguish if the North or South Pole is in front of it.

이 센서는 자석을 수직으로 마주보고 북극 또는 남극이 앞에 있는지를 구별할 수 있다.

As mentioned earlier, using Hall Sensors in the BLDC can lead to an increase of the overall price of the motor due to an increase in the wiring.

앞에서 언급했듯이 BLDC 에서 홀센서를 사용하면 배선이 증가하여 모터의 전체 가격이 상승 할 수 있다.

Moreover, there are situations where sensors cannot be used in an application such as submersible pumps.

또한 센서가 수중펌프와 같은 응용분야에서 사용될 수 없는 상황이 있다.

In such 4 applications, the sensorless BLDC control is used.

이러한 4 가지 응용에서 SonserlessBLDC 제어가 사용된다.

Various control system techniques/ algorithms such as Direct Back EMF zero crossing, Indirect Back EMF Integration and Field Oriented Control (FOC) are used to operate the motor.

직접 역기 전력 제로 크로싱(Direct Back EMF zero crossing), 간접 후방 EMF 통합과 FOC(Field Oriented Control)와 같은 다양한 제어 시스템 기술/알고리즘이 모터 작동에 사용된다.

1.4 Problem Statement

문제 상태

Conventional DC motors are being replaced by BLDCs due to their high efficiency and low noise features which are more desirable for consumers.

기존 DC 모터는 BLDC 에 의한 고효율과 저소음 특성으로 때문에 대체되고 있고 이는 소비자에게 더 바람직하다.

Applications are broken down into three different types which were discussed in section 1.2.

응용 프로그램은 섹션 1.2 에서 논의된 세가지 유형으로 나뉜다.

Due to a major disadvantage associated with BLDCs regarding the variable speed operation, various studies are being done in order to operate the BLDCs with constant speed.

가변 속도 동작에 관한 BLDC 와 관련된 주요 단점으로 인해, 일정 속도로 BLDC 를 동작시키기 위해 다양한 연구가 수행 되고있다.

This allows BLDCs to be used in applications that require constant speed with varying load.

이를 통해 BLDC 는 다양한 부하에서 일정한 속도를 필요로 하는 응용에 사용 될 수 있다.

Since BLDCs are more expensive than the conventional DC motors, various approaches have been taken to reduce the cost of the BLDCs. BLDCs with Hall Effect sensors are being replaced with sensorless control techniques.

BLDC 는 일반적인 DC 모터보다 가격이 비싸기 때문에 BLDC 의 비용을 줄이기 위한 다양한 접근법이 취해왔다. 홀센서가 있는 BLDC 가 Sensorless 제어 기술로 대체되고 있다.

These sensorless techniques require a complex algorithm which are not always easy to implement.

이러한 Sensorless 기술은 구현하기가 항상 쉽게 구현 하지 못하는 복잡한 알고리즘을 요구한다.

1.5 Thesis Organization

학위 논문 조직

The rest of the thesis is organized as follows: Chapter 2- Describes the construction, working principles and architecture of a BLDC control system.

논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성되어 있다: 제 2 장 BLDC 제어 시스템의 구성, 작동 원리 및 아키텍처에 대해 설명한다.

Chapter 3- Explains different types of control techniques used for BLDC control.

3 장 - BLDC 제어에 사용되는 여러 유형의 제어 기술을 설명한다.

The techniques explained in this chapter are Hall Effect sensor, Direct Back EMF zero crossing control, Indirect Back EMF and Field Oriented Control.

이장에서 설명하는 기술은 홀센서, 직접 역기전력 제로 크로싱 제어, 간접 역기 전력 및 필드 지향 제어다.

Chapter 4- The speed vs. torque relationship of a separately excited DC motor and a BLDC are explained and compared in this chapter.

4 장- 별도의 구동되는 DC 모터와 BLDC 의 속도 대 토크 관계를 이 장에서 설명하고 비교한다.

A PI feedback control is introduced in this chapter for controlling the speed vs torque of a BLDC.

이 장에서는 BLDC 의 속도와 토크를 제어 하기 위한 PI 피드백 제어가 소개된다.

Chapter 5- Compares the experimental results of the different BLDC control methods, without and with PI feedback control.

5 장- PI 피드백 제어를 사용하지 않고 PI 피드백 제어를 사용하여 여러가지 BLDC 제어 방법의 실험결과를 비교한다.

Chapter 6- Conclusion and Future work are discussed in this chapter.

6 장- 결론과 향후 연구는 이 장에서 논의된다.

Chapter 2

Overview of BLDC Design and Control

2.1 BLDC Motor Construction

BLDC 모터 제작

BLDC motors share some similarities with induction motors and brushed DC motors in terms of construction and working principles.

BLDC 모터는 유도 모터와 DC 모터와 구조 및 작동 원리면에서 유사하다.

Just like all motors, BLDCs have two important parts: the rotor (rotating part) and the stator (stationary part).

모든 모터와 마찬가지로 BLDC 는 로터(회전부)와 고정자(고정부분)의 두가지 중요한 부분을 가지고 있다.

The stator magnetic circuit is constructed using steel laminations.

고정자 자기회로는 강철 라미네이션을 사용하여 구성된다.

Steel laminations in the stator can be either slotted (inner rotor design) or slotless (outer rotor design) [14] as shown in Figure 2-1.

고정자의 강철 라미네이션은 그림 2-1 과 같이 슬롯형(내부 로터(회전부) 설계) 또는 슬롯리스(외부 로터 설계)[14]중 하나 일 수있다.

The phase windings are wrapped around the stator, and they can be arranged in two patterns – star (Y) or delta (Δ).

위상 권선은 고정자 주위에 감싸여 있으며 스타(Y) 또는 델타(Δ)의 두 가지 패턴으로 배열 될 수 있다.

The Y pattern gives high torque at low RPM and the Δ pattern is used in order to give low torque at low RPM[2].

Y 패턴은 낮은 RPM 에서 높은 토크를 제공하고 Δ 패턴은 낮은 RPM 에서 낮은 토크를 제공하기 위해 사용된다[2].

The rotor of a BLDC is constructed with permanent magnets, and it can consist of various numbers of poles based on the application.

BLDC 의 회전자는 영구 자석으로 구성되며 응용 프로그램에 따라 다양한 극수로 구성 될 수 있다.

Increasing the number of poles gives higher torque but at the cost of reducing the maximum speed.

극수를 늘리면 토크는 증가하지만 최대속도는 줄이면서 비용이 증가합니다.

There are two types of BLDC motor designs: Inner and Outer rotor design.

BLDC 모터 설계에는 내부 및 외부 회전자 설계의 두 가지 유형이 있다.

In an outer rotor design, the windings are located in the center of the motor and the rotor magnets surround the stator windings.

외부 회전자 설계에서, 권선은 모터의 중앙에 위치하며 회전자 자석은 고정자 권선을 둘러싸고 있다.

However, the rotor magnets act as an insulator, thereby reducing the rate of heat dissipation from the motor.

그러나, 회전자 자석은 절연체로서 작용하여, 모터로부터의 열 소산율을 감소 시킨다.

Due to the location of the stator windings, outer rotor designs typically operate at lower duty cycles or at a lower rated current.

고정자 권선의 위치 때문에, 외부 회전자 설계는 일반적으로 낮은 듀티사이클 또는 낮은 정격전류에서 작동한다.

The primary advantage of an outer rotor BLDC motor is lower cogging torque[2].

외부 회전자 BLDC 모터의 주요 이점은 낮은 코깅토크다.

In the inner rotor design, the rotor magnets are surrounded by the stator windings which are affixed to the motor's housing.

내부 회전자 설계에서 회전자 자석은 모터 하우징에 고정된 고정자 권선으로 둘러싸여 있다.

The primary advantage of an inner rotor construction is its ability to dissipate heat.

내부 회전자 구조의 주요 장점은 열을 발산하는 능력이다.

A motor's ability to dissipate heat also increases its ability to produce torque.

열을 발산하는 모터의 능력은 또한 토크 발생 능력을 증가 시킨다.

For this reason, majority of BLDC motors use an inner rotor design.

이러한 이유 때문에 대부분의 BLDC 모터는 내부 회전자 디자인을 사용한다.

Another advantage of an inner rotor design is lower rotor inertia[2] which is a factor for speed control.

내부 회전부 설계의 또 다른 이점은 속도제어의 요소인 낮은 회전부 관성이다.

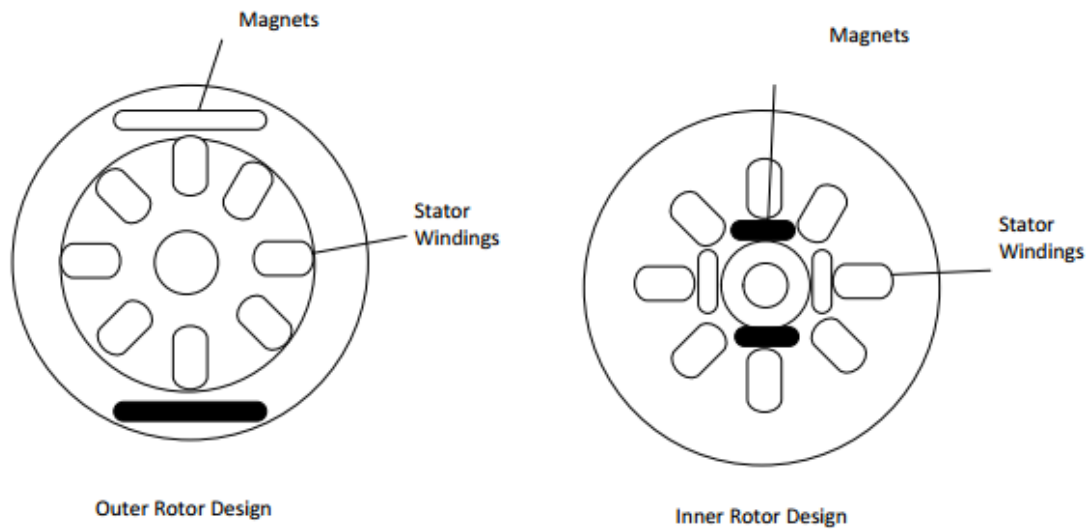


Figure 2-1: Outer and Inner Rotor Design of BLDCs [19]

The BLDC also is referred to as an electronically commuted motor since there are no brushes on the rotor, and commutation is performed electronically at certain rotor positions.

BLDC 는 회전자에 브러시가 없기 때문에 전자적으로 대체된 모터라고도하며 정류는 특정 회전자 위치에서 전자식으로 수행된다.

Magnetization of the permanent magnets and their displacement on the rotor are chosen in such a way that the Back- EMF (the voltage induced into the stator winding due to rotor movement) shape is trapezoidal.

영구 자석의 자화(물체가 자성을 지니는 현상)와 회전자에서의 변위는 역기전력(회전자 이동으로 인해 고정자 권선으로 유도된 전압)이 사다리꼴인 방식으로 선택된다.

This allows a rectangular- shaped 3-phase voltage system to be used to create a rotational field with low torque ripple.

이를 통해 직사각형 모양의 3 상 전압 시스템을 사용하여 낮은 토크 리플로 회전 필드를 생성 할 수 있다.

This differs from Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) which uses a sinusoidal 3-phase voltage to create a rotational field.

이것은 회전 필드를 생성하기 위해 SIN 파 3 상 전압을 사용하는 영구자석동기모터(PMSM)와 다르다.

PMSMs also have low torque ripple.

PMSM 은 또한 낮은 토크 리플을 갖는다.

The BLDC is usually controlled using a three phase power semiconductor bridge.

BLDC 는 일반적으로 3 상 전원 반도체 브리지를 사용하여 제어된다.

Control of the bridge requires the rotor position which is obtained using a sensor or a sensorless control technique.

브리지의 제어에는 센서 또는 Sensorless 제어기술을 사용하여 얻은 회전자 위치가 필요하다.

2.2. Architecture of the BLDC system

BLDC 시스템의 아키텍처

The block diagram of a BLDC motor control system is shown in Figure 2-2.

그림 2-2 는 BLDC 모터 제어 시스템의 블록 다이어그램을 보여준다.

The four main parts of the BLDC control system are the power converter, controller, sensors and motor.

BLDC 제어 시스템의 네 가지 주요 부분은 전력 변환기, 제어기, 센서, 모터다

The power converter is a three phase power semiconductor bridge shown in Figure 2-3.

전력 변환기는 그림 2-3 에 표시된 3 상 전력 반도체 브리지다.

The main function of the power converter is to transform power from the DC source to AC so the motor can convert electrical energy to mechanical energy.

전력 변환기의 주요 기능은 DC 전원을 AC 전원으로 변환하여 모터가 전기 에너지를 기계에너지로 변환 할 수 있도록 하는 것이다.

-> 다 필요 없고 한 줄로 말하면 배터리전압이 떨어져도 조종기로부터 수신을 잘 받기 위해서

The sensor is used to determine the rotor position, and it sends this information to the controller.

센서는 회전자 위치를 결정하는데 사용되며 이 정보를 제어기에 전송한다.

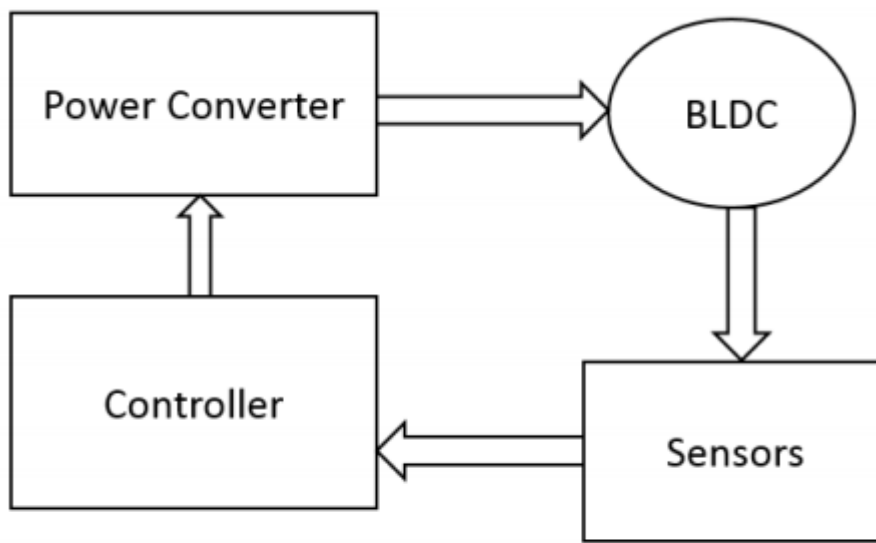


Figure 2-2: Block Diagram of BLDC Control [1]

The controller requires feedback information about the rotor position so it can generate a pulse width modulation (PWM) duty cycle to power the phases of the semiconductor bridge.

제어기는 회전자 위치에 대한 피드백 정보를 필요로 하므로 반도체 브리지의 위상에 전력을 공급하기 위해 펄스 변조(PWM) 듀티사이클을 생성 할 수 있다.

The controller uses a PWM modulator to generate signals which drive the power converter.

컨트롤러는 PWM 변조기를 사용하여 전력 변환기를 구동하는 신호를 생성한다.

The internal block diagram of the power converter and controller is shown in Figure 2-3.

전력 컨버터와 컨트롤러의 내부 블록 다이어그램은 그림 2-3 에 나와있다.

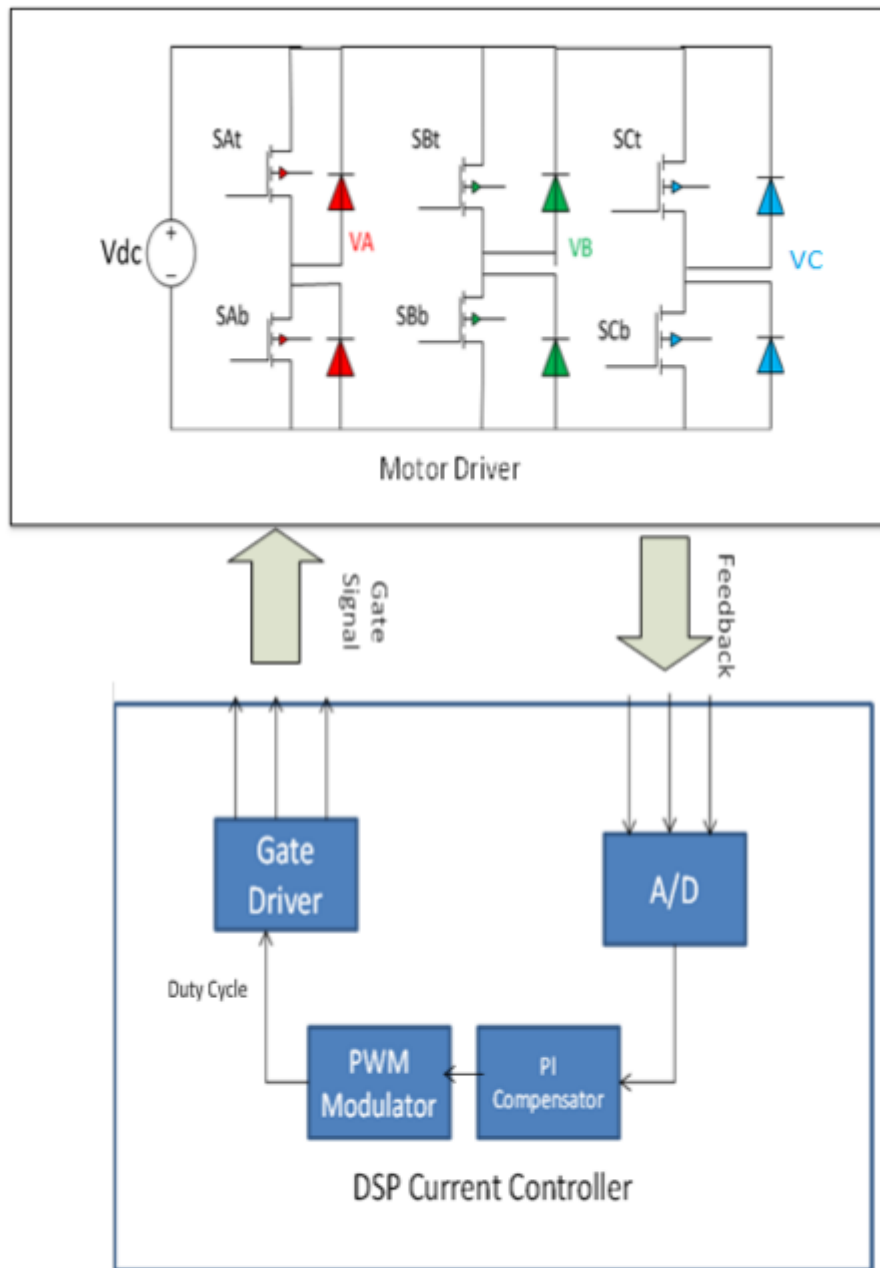


Figure 2-3: Internal Block Diagram of the Power Converter and Controller [1]

The speed of a BLDC is directly proportional to the voltage, and the applied voltage is increased or decreased accordingly.

BLDC 의 속도는 전압에 직접 비례하며 인가된 전압은 그에 따라 증가 되거나 감소된다.

In a PWM controller, the PWM duty cycle controls the voltage [3].

PWM 제어기에서 PWM 듀티사이클은 전압[3]을 제어한다.

As voltage is applied, a current flow through the windings of the motor and this current provides torque to spin the motor.

전압이 인가됨에 따라, 모터 권선을 통한 전류 흐름 및 전류는 모터를 회전 시키기 위한 토크를 제공한다.

The motor can spin either in clockwise or counterclockwise direction by applying positive or negative voltage.

모터는 양전압 또는 음전압을 인가하여 시계방향 또는 반시계 방향으로 회전할 수 있다.

Chapter 3

Control Theory

The chapter focuses on various sensorless and sensed commutation techniques required to drive the motor.

이 장에서는 모터 구동에 필요한 다양한 Sensorless 및 Sensed 식 정류기술에 중점을 둔다.

Earlier BLDC controllers required the use of Hall Effect devices to sense the angular position of the rotor magnets.

이전의 BLDC 제어기는 회전자 자석의 각도 위치를 감지하기 위해 홀센서 장치를 사용해야했다.

Sensorless control techniques are introduced to reduce the cost of the system.

시스템 비용을 줄이기 위해 센서리스 제어기술이 도입되었다.

Some of the sensorless control techniques explained in this chapter use Back- EMF and current sensing, which provide enough information to determine the position of the rotor and, therefore, to operate the motor with synchronous phase currents.

이장에서 설명된 센서리스 제어기술 중 일부는 회전자의 위치를 결정하고 동기 위상 전류로 모터를 작동시키는데 충분한 정보를 제공하는 역기전력과 전류감지 기능을 사용한다.

Various concepts are discussed and advantages and disadvantages are included.

다양한 개념이 논의되고 장단점이 포함된다.

The techniques discussed in this chapter are:

이장에서 설명하는 기술은 다음과 같다 :

a. Hall Sensors – Sensored Technique

홀센서- 센서 기술

b. Back- EMF Method:

역기전력 방법

i. Direct Back EMF zero crossing /Terminal Voltage Sensing/ Trapezoidal Control– Sensorless Control Technique

직접 역기전력 제로 크로싱/단자 전압감지/사다리꼴 제어 – 센서리스 제어기법

ii. Indirect Back EMF- Sensorless Technique

간접 역기전력 – 센서리스 기법

c. Field Oriented Control – Sensorless Control Technique

현장 중심제어 – 센서리스 제어 기법

3.1 Hall Effect sensors

홀 효과 센서

Hall Effect sensors are based on Hall Effect theory, which states that an electric current in a conductor produces magnetic field that exerts a transverse force on the moving charge carriers, and this tends to push them to one side of the conductor.

홀 효과 센서는 도체의 전류가 이동하는 전하 캐리어에 횡력을 가하는 자기장을 생성하고 이를 도체의 한쪽으로 밀어내는 경향이 있는 홀 효과 이론을 기반으로 한다.

A build- up of charge at the sides of the conductor will balance this magnetic influence, producing a measurable transverse voltage which is called the Hall Effect.

전도체 측의 전하 축적은 자기효과의 균형을 맞출 수 있으며 홀 효과라고 불리는 측정 가능한 횡 전압을 발생시킨다.

This theory was discovered by Edwin Hall in 1879[2].

이 이론은 1879 년 에드윈 홀에 의해 발견되었다.

BLDC motor commutation is controlled electronically.

BLDC 모터 정류는 전자식으로 제어된다.

The motor is rotated by energizing the stator windings in a particular sequence, and in order to do this it is important to know the rotor position.

특정순서로 고정자 권선에 전원을 공급하여 모터를 회전시키고 이를 수행하려면 회전자 위치를 파악하는 것이 중요하다.

Rotor position is sensed using Hall Effect sensors which are embedded in the stator.

회전부 위치는 고정자에 내장된 홀 효과 센서를 사용하여 감지된다.

The position of the Hall Effect sensor is shown in Figure 3-1 below.

홀효과 센서의 위치는 아래 그림 3-1 에 나와있다.

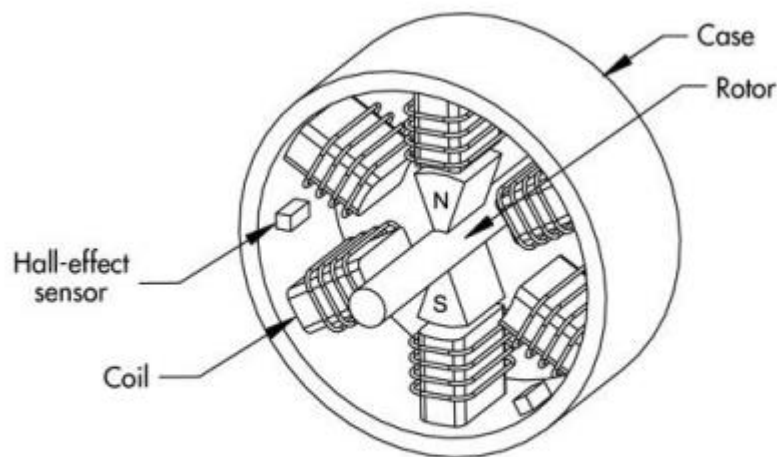


Figure 3-1:Position of Hall Effect Sensors[4]

As the rotor magnetic poles pass the sensor, the sensor changes state at the same angular position each time a magnet passes by.

회전자 자극이 센서를 통과함에 따라 센서는 자석이 지나갈 때 마다 동일한 각 위치에서 상태를 변경한다.

Therefore, whenever the rotor magnetic poles pass near the Hall sensor, the sensor sends a high or a low signal for the North or South pole to the controller.

따라서 회전자 자극이 홀 센서 근처로 통과할 때 마다 센서는 북극 또는 남극에 대해 높거나 낮은 신호를 제어기에 전송한다.

Based on these combinations of sensor signals, the exact sequence for commutation can be determined.

이러한 센서 신호들의 조합에 기초하여, 정류에 대한 정확한 순서가 결정될 수 있다.

Below are some of the advantages of a Hall Effect design:

홀 효과 디자인의 장점은 다음과 같다.

- ♣ Hall Effect sensors provide a faster response time to a change in the magnetic field; therefore they provide greater efficiency in commutating a BLDC motor.

홀 효과 센서는 자기장 변화에 대한 응답시간이 더 빠르다. 따라서 BLDC 모터를 정류하는데 더 높은 효율을 제공한다.

- ♣ Due to their accuracy they provide constant torque.

정확성으로 인해 일정한 토크를 제공한다.

- ♣ They can provide high sensitivity and stability over temperature by using a technique called chopper stabilization[5][9].

그들은 초퍼안정화(chopper stabilization)기술을 사용하여 높은 감도와 온도 안정성을 제공할 수 있다.

The major disadvantage to a sensed technique is the cost due to the increase in the hardware and wiring.

감각 기술의 가정 큰 단점은 하드웨어와 배선의 증가로 인한 비용이다.

3.2 Direct Back- EMF Zero Crossing Technique (Terminal Voltage Sensing/ Trapezoidal Control)

직접 역기전력 제로 크로싱(단자 전압감지/사다리꼴 제어)

During the operation of a three- phase BLDC motor, two of the three phases are conducting at a time.

3 상 BLDC 모터의 작동 중, 3 상 중 2 상은 한번에 활동한다.

The Back- EMF of the non- conducting phase is proportional to the speed, and the speed is proportional to the applied voltage as shown in Figure 3-2.

비전도성 위상의 역기전력은 속도에 비례하며,속도는 그림 3-2 와 같이 인가된 전압에 비례한다.

The Back- EMF is zero at standstill and rises as the speed increases.

역기전력은 정지상태에서 제로이며 속도가 증가함에 따라 상승한다.

The zero crossing approach detects the instant at which the Back- EMF of the nonconducting phase crosses zero.

제로 크로싱 접근법은 비전도성 위상의 역기전력이 0 을 횡단하는 순간을 감지한다.

This zero crossing triggers a timer, which may be as simple as a RC time constant.

이 제로 크로싱은 RC 시간 상수만큼이나 간단한 타이머를 트리거한다.

The next power stage commutation occurs at the end to this timing interval [6][9].

다음 파워 스테이지 정류는 타이밍 간격의 끝에서 발생한다.

15 For proper operation of a BLDC motor, the phase current and the Back- EMF of the motor should be aligned in order to produce a constant torque[6][9].

BLDC 모터의 올바른 작동을 위해서는 일정한 토크를 발생시키기 위해 모터의 위상 전류와 역기 전력을 조정 해야 한다.

Therefore, the current commutation point is estimated using the zero crossing point of the Back-EMF and a 30 degree phase shift [7][9].

따라서 전류대체점은 역기전력의 제로 크로싱 포인트와 30 도 위상 시프트를 사용하여 추정된다.

This is illustrated in the Figure 3- 2.

이것은 그림 3-2 에 나와 있다.

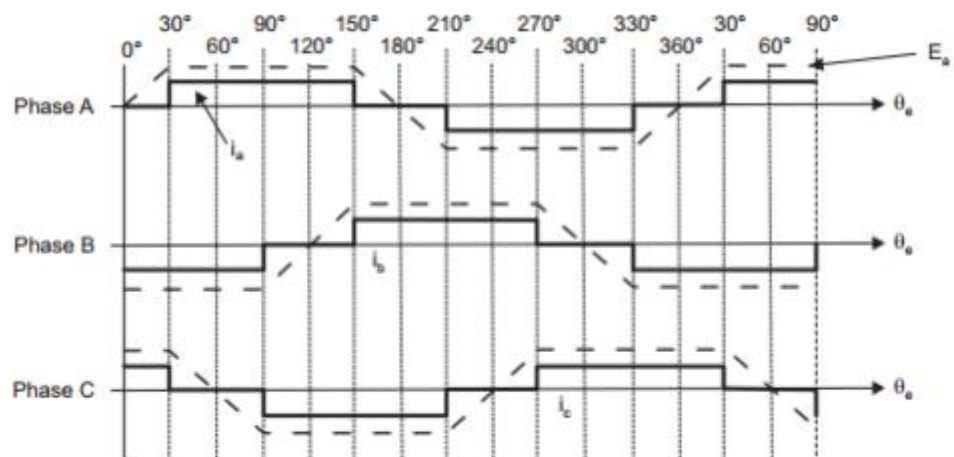


Figure 3-2: Alignment of Phase Back EMF and Current [9]

The conducting interval for each phase is 120 electrical degrees, and only two phases conduct current at any time.

각 상에 대한 전도 간격은 120 도 이고, 단지 2 상만 전류를 흐르게 한다.

The third phase is floating or non-conducting.

세번째 단계는 부동 또는 비전도다.

Figure 3-2 shows the alignment of the phase current and Back-EMF which is necessary to generate maximum torque.

그림 3-2 는 최대 토크를 생성하는데 필요한 위상 전류와 역기전력의 정렬을 보여준다.

Therefore, the inverter should be commutated every 300 after detecting the zero crossing of the non-conducting phase[6].

그러므로,인버터는 비전도 단계의 제로 크로싱을 감지 한 후 300 회마다 정류되어야한다.

The delay of 30 electrical degrees from the zero crossing instant is shown in the Figure 3-2, and this delay is not affected by any speed changes[8].

제로 크로싱 순간으로부터 30 도의 전기 각도의 지연이 그림 3-2 에 나타나며, 이 지연은 속도 변화에 영향을 받지 않는다.

To detect the zero crossing point, the Back- EMF of the non- conducting phase needs to be monitored, and the measurement should be low pass filtered to eliminate EMI caused by inverter switching [9].

제로 크로싱 포인트를 검출하기 위해서는 비전도 위상의 역기전력을 모니터링 할 필요가 있으며, 인버터 스위칭으로 인한 EMI 를 제거하기 위해서는 측정을 저역 필터링 해야 한다.

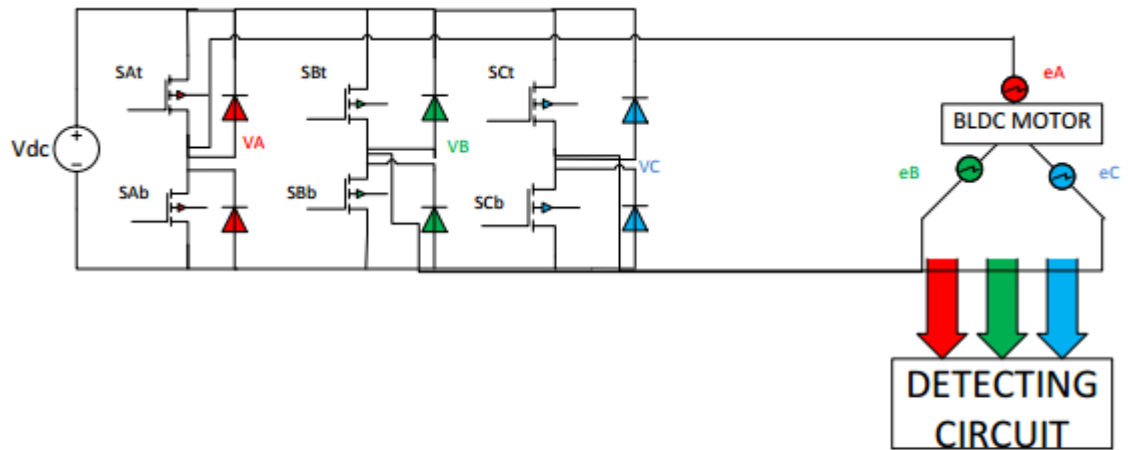


Figure 3-3: Three Phase Inverter and BLDC [9]

The terminal voltage of the non-conducting/floating phase is given by equation (3.1)[10]

비전도성/부동 상태의 단자 전압은 식(3.1)에 의해 주어진다.

$$V_c = e_c + V(N) = e_c + (V(CE) - V(F))/2 - (e(A) + e(B))/2 \quad (3.1)$$

Where e_c -is the Back- EMF of the open phase (C), $V(N)$ is the potential of the 3- Phase motor neutral point, and $V(CE)$ and $V(F)$ are the forward voltage drops of the transistors and diodes, respectively [9].

여기서 e_c - 개방 위상(C)의 역기전력, $V(N)$ 은 3 상 모터 중성점의 전위, $V(CE)$ 와 $V(F)$ 는 트랜지스터와 다이오드의 순방향 전압 강하이다.

Since the Back- EMF of the two conducting phases (A and B) have the same amplitude but opposite signs, the terminal voltage of the non-conducting phase/floating phase is given by equation (3.2):

두 전도 위상(A 와 B)의 역기전력은 동일한 진폭을 가지지만 반대 부호이기 때문에 비전도위상/부동 위상의 단자 전압은 식(3.2)에 의해 주어진다.

$$V_c = e_c + V(N) = e_c + (V(CE) - V(F))/2 = e_c + (V(B) + V(A))/2 \quad (3.2)$$

Where,

$V(CE) = V(B)$ (Collector emitter voltage of transistor SBb)

트랜지스터 SBb 의 컬렉터 에미터 전압

$$-V(F) = V(A)$$

Since the zero-crossing point detection is done at the end of the pulse width modulation (PWM) on- state and only the high side of the inverter is chopped, V_{CE} is similar for the S_A and S_B transistors (Fig 3-3), and the detection formula can be represented by the following equation [9],

제로 크로싱 포인트 검출은 펄스 폭 변조(PWM)은 상태의 끝에서 이루어지며 인버터의 하이 측만 잘게 쪼개 지므로 $V(CE)$ 는 SBb 트랜지스터와 유사하며(그림 3-3), 검출 식은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_c = e_c + V_N = e_c + (V_{CE} B^- + V_{DC} - (V_{CE} A^+)/2 \cong e_c + (V_{DC})/2 \quad (3.3)$$

Therefore, the zero crossing occurs when the voltage of the floating phase reaches one half of the DC rail voltage[6].

따라서 제로 크로싱은 부동 위상의 전압이 DC 레일 전압의 절반에 도달 할 때 발생한다.

This zero crossing point is detected at the end of the PWM period.

이 제로 크로싱 포인트는 PWM 기간의 끝에서 감지된다.

The main advantage of using the Back- EMF sensing technique is the simplicity of this control algorithm compared to other sensorless techniques.

역기전력 감지 기술을 사용하는 주된 이점은 다른 센서리스 기술에 비해 히 제어 알고리즘의 단순성 이다.

This technique is considered to be the simplest method of those analyzed in this chapter.

이 기술은 이 장에서 분석 된 방법 중 가장 간단한 방법으로 간주된다.

However, the zero crossing method tends to be noise sensitive in detecting the zero crossing, and this tends to degrade performance over wide speed ranges.

그러나 제로 크로싱 방법은 제로 크로싱을 감지 할 때 노이즈에 민감한 경향이 있으며, 이는 넓은 속도 범위에서 성능을 저하시키는 경향이 있다.

The inability to obtain a switching pattern at low speeds due to low Back- EMF is another drawback of this technique[11].

낮은 역기전력으로 인해 저속에서 스위칭 패턴을 얻을 수 없다는 것이 이 기법의 또 다른 단점이다.

3.3 Indirect Back EMF Integration Technique

간접 역기전력 통합 기법

Since filtering introduces a commutation delay at high speed and low Back- EMF causes a reduction in signal sensitivity at low speed, this causes the speed range to be reduced in the direct Back- EMF zero crossing detection method.

필터링은 고속에서 정류 지연을 발생 시키고 낮은 역기전력은 저속에서 신호감도를 감소시키므로 이로 인해, 직접 역기전류 제로 크로싱 검출방법에서 속도가 범위가 감소한다.

In order to overcome this problem, the Indirect Back- EMF Integration Technique is used to reduce switching noise.

이 문제를 극복하기 위해 간접 역기전력통합 기법을 사용하여 스위칭 잡음을 줄였다.

This technique determines the commutation instant by integrating the back EMF of the open phase as shown in Figure 3-4 after the zero crossing point.

이 기법은 제로 크로싱 포인트 후에 그림 3-4 와 같이 개방 위상의 역기 전력을 통합하여 정류 인스턴트를 결정한다.

A certain threshold value is set for different speeds.

속도에 따라 특정 임계값이 설정된다.

Once the integral value reaches the pre- defined threshold value, which corresponds to a commutation point, the phase current is commutated.

적분 값이 정류 점에 해당하는 사전 정의 된 임계값에 도달하면 위상 전류가 정류 된다.

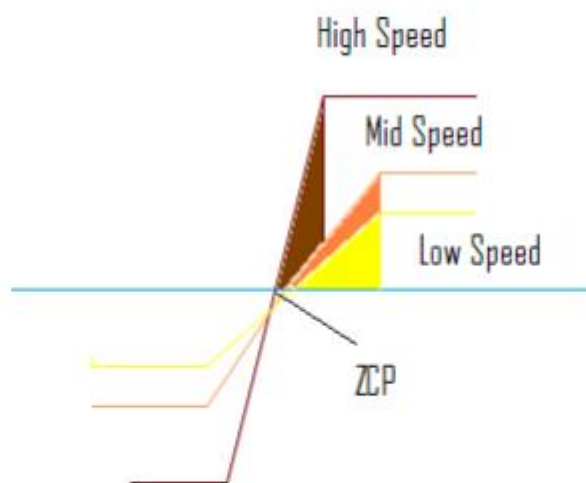


Figure 3-4: Integrated Area of the Back EMF for Different Speeds [9]

As shown in Figure 3-4 the highlighted areas in yellow, orange and brown represent low, mid and high speed, respectively.

그림 3-4 에서 볼 수 있듯이 노란색, 주황색 및 갈색의 강조 표시된 영역은 각각 저속,중속 및 고속을 나타낸다.

The highlighted areas presented in Figure 3-4 have the same area for different speeds.

그림 3-4 에 강조 표시된 영역은 속도가 서로 다른 영역이 동일한다.

Each of these speeds has its own threshold voltage.

각 속도는 자체 임계전압을 가지고 있다.

Once the integrated value reaches the threshold voltage, a reset signal is asserted to zero the integrator output.

일단 적분된 값이 임계전압에 도달하면 적분기 출력을 0 으로 초기화하는 리셋신호가 발생한다.

The reset signal is active until the residual current in the open phase has passed a zero crossing[12].

리셋신호는 개방 위상의 잔류 전류가 제로 크로싱을 통과 할 때까지 활성화 된다.

3.4 Field Oriented Control

필드 지향 제어

As mentioned in the introduction, permanent magnet motors, including the BLDC and the Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), have a wound stator, a permanent magnet rotor and a method to sense the rotor position which can be achieved internally or by an external device.

소개에서 언급했듯이 BLDC 및 영구 자석 동기 모터(PMSM)를 포함하는 영구자석 모터는 권선 고정자, 영구 자석회로 전자 및 내부 또는 외부 장치로 달성 할 수 있는 회전자 위치를 감지하는 방법을 가지고 있다.

The rotor position is necessary for the motor's operation.

로터(회전부)위치는 모터 작동에 필요하다.

Similarly to the direct and indirect back EMF techniques, Field Oriented Control (FOC) is another control technique used to sense the rotor position without the help of sensors such as Hall Effect devices.

직접과 간접 역기전력 기법과 마찬가지로 FOC 는 홀효과 장치와 같은 센서없이 회전자 위치를 감지하는데 사용되는 또는 제어 기술이다.

FOC uses a different approach than the Back.

FOC 는 Back 과 다른 접근 방식을 사용한다.

EMF and is considered to be more effective and efficient when compared to other sensorless techniques.

EMF 이며 다른 센서리스 기술과 비교할 때보다 효과적이고 효율적인 것으로 간주된다.

FOC also provides better performance over the torque range than the Back EMF methods[13].

FOC 은 역기 전력 방식보다 토크 범위에서 더 우수한 성능을 제공한다.

FOC uses the mathematical processing power of microcontrollers and advanced control strategies to decouple the torque and magnetizing flux and provide a high dynamic performance drive system.

FOC 는 마이크로 컨트롤러의 수학 처리 성능과 고급 제어 전략을 사용하여 토크와 자속을 분리하고 높은 동적 성능의 드라이브 시스템을 제공한다.

This approach allows the BLDC to be an independent torque controller and field controller, as would be the case with a separately.

이러한 접근 방식은 BLDC 가 독립적인 토크 제어기 및 필드 제어가 될 수 assert 있도록 해준다.

excited DC motor[13].

동작된 DC 모터

To decouple the torque and the magnetizing flux component of stator current, it is necessary to use several mathematical transforms which are calculated by the microcontroller.

고정자 전류의 토크 및 자화 유동 성분을 분리하려면 마이크로 컨트롤러에 의해 계산되는 여러 수학적 변환을 사용 해야 한다.

The torque produced in the synchronous machine is proportional to the vector cross product of the stator and rotor magnetic field, illustrated in equation (3.4)[13].

동기 기계에서 생성 된 토크는 고정자와 회전자 자기장의 벡터 교차 곱에 비례하며, 식 (3.4)에서 설명한다.

$$\tau = B^{\rightarrow} stator \times B^{\rightarrow} rotor \quad (3.4)$$

Where

τ – The torque, (N.m)

$B^{\rightarrow} stator$ – Magnetic field of the stator, (Teslas)

$B^{\rightarrow} rotor$ - Magnetic field of the rotor, (Teslas).

This expression states that the maximum torque is achieved when the stator and rotor magnetic fields are orthogonal (90°) to each other as shown in the Figure 3-5.

이 표현은 고정자와 회전자 자기장이 그림 3-5 와 같이 서로 직각(90 도)일 때 최대 토크가 달성됨을 나타낸다.

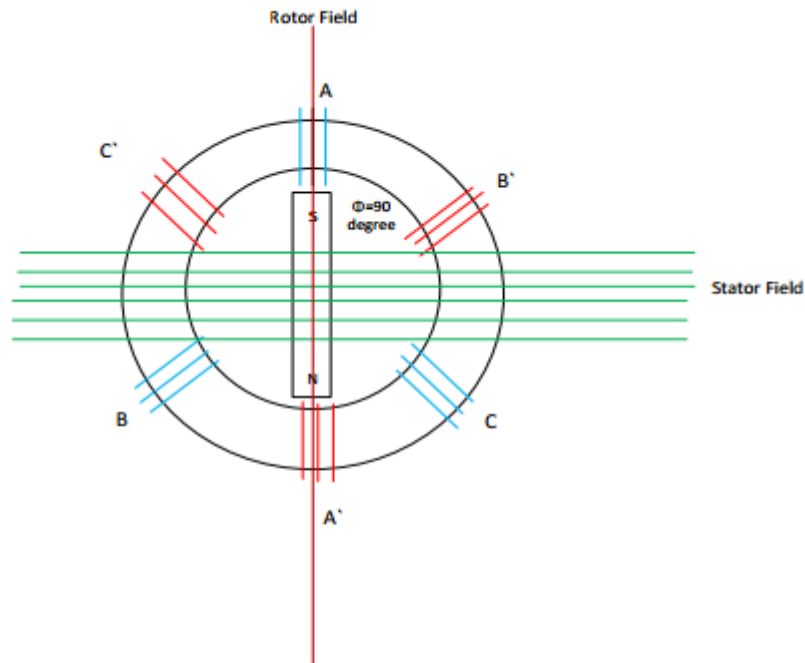


Figure 3-5: Rotor and Stator 90 Degree Position in the BLDC [13]

In brief, the FOC technique goal is to maintain the rotor and stator flux in quadrature by having the stator and rotor flux orthogonal to each other[13].

요약하면, FOC 기술의 목적은 고정자와 회전자의 자속을 서로 직교 시켜서 직각으로 회전자와 고정자 자속을 유지하는것이다.

This control method is computationally intensive.

이 제어 방법은 계산 집약적이다.

3.3.1 Rotating Reference Frame

In FOC, the rotor position is estimated by mapping the motor current into a rotating frame.

FOC 에서 모터의 전류를 회전 프레임에 매핑하여 회전자 위치를 추정한다.

The rotating frame constitutes of two axes – direct (d) and quadrature (q).

회전 프레임은 직접 축(d)과 직교 축(q)의 두 축으로 구성됩니다.

The d axis is defined to be on the magnetic axis passing through the center of a set of permanent magnets on the rotor.

d 축은 회전자상의 영구 자석 세트의 중심을 통과하는 자기 축에 정의된다.

The q axis is located orthogonally to the d axis.

q 축은 d 축에 직각으로 배치됩니다.

This is shown in the Figure 3-6.

그림 3-6 에 나와있다.

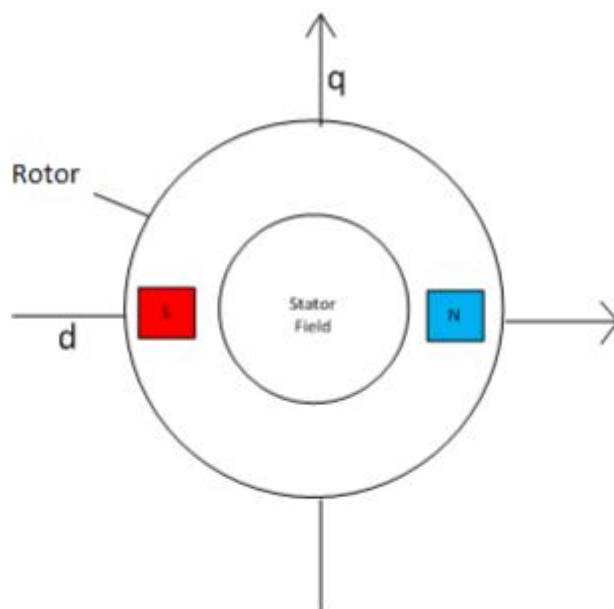


Figure 3-6: Rotating Frame Representation of the d and q Axes [13]

In order to find the rotor position, FOC needs two constants as input references: the torque component (aligned with the q co- ordinate) and the flux component (aligned with d co- ordinate)[13].

회전자 위치를 찾기 위해 FOC 는 입력 참조로 두개의 상수가 필요하다: 토크 성분(q 좌표와 정렬)과 유동성분 (d 좌표와 정렬)

3.3.2 Space Vector Definition and Projection

공간 벡터 정의 및 투영법

The stator currents of two phases are known and third phase is determined using Kirchoff's current law [14]. The current from the three phases are transformed into a time invariant two coordinate system. This is achieved by the following two steps:

2 상 고정자 전류는 잘알려져 있고 Kirchoff 의 전류 법칙을 사용하여 3 상을 결정한다. 3 상으로 부터의 전류는 시간 불변 2 개 좌표계로 변환된다. 이것을 다음 두단계에 의해 달성된다.

♣ $(a,b,c) \rightarrow (\alpha,\beta)$ Projection (Clarke Transformation)

♣ $(\alpha,\beta) \rightarrow (d,q)$ Projection (Park Transformation)

3.3.2.1 The $(a,b,c) \rightarrow (\alpha,\beta)$ Projection (Clarke Transformation) 투영 (클라크 변환)

The Clarke transformation transforms the current in the three phases into a 2- axis co- ordinate system ($i_s\alpha$ and $i_s\beta$) as shown in Figure 3-7

클라크 변환은 그림 3-7 과 같이 3 상전류를 2 축좌표계($i_s\alpha$ 와 $i_s\beta$)로 변환한다.

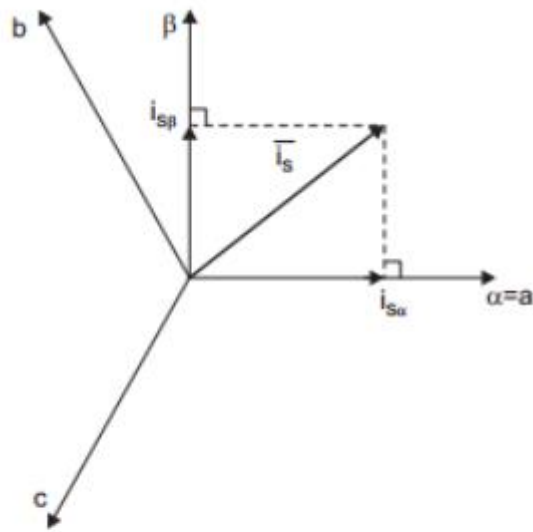


Figure 3-7: Two Axis Coordinate System [13]

3.3.2.2 The $(\alpha, \beta) \rightarrow (d, q)$ Projection (Park Transformation)

The final stage in FOC is the Park Transformation which transforms the two phase (α, β) system obtained from the Clarke Transformation to the d, q rotating reference frame to locate the position of the rotor.

FOC 의 마지막 단계는 Clarke 변환에서 얻은 2 상 (α, β) 시스템을 d,q 회전 기준 프레임으로 변환하여 회전자 위치를 파악하는 Park Transformation 이다.

The d and q components are determined through the rotor flux position θ .

d 와 q 성분은 회전자 자속 위치 θ 를 통해 결정된다.

The block diagram of the FOC technique is shown in Figure 3-8

FOC 기술의 블록 다이어그램은 그림 3-8 에 나와있다.

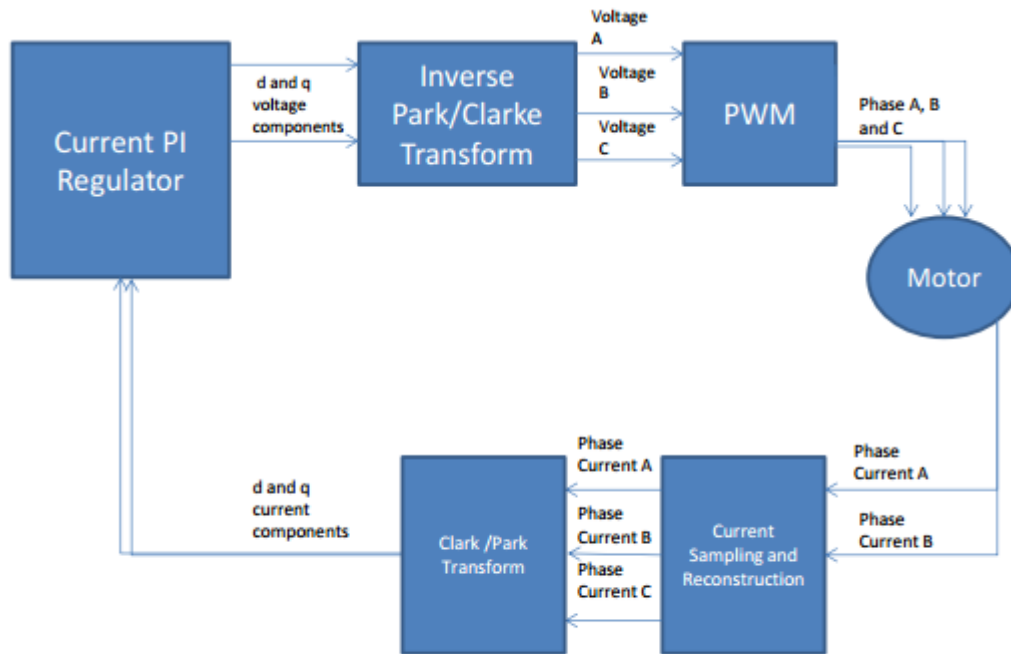


Figure 3-8: Internal Block Diagram of FOC [13]

3.3.3 Rotor flux position

회전자 자속 위치

The measure of the rotor flux position is a key component in finding the rotor position using the FOC algorithm.

회전자 자속 위치의 측정은 FOC 알고리즘을 사용하여 회전자의 위치를 찾는 핵심 구성요소다.

In a synchronous machine, the rotor speed is equal to the rotor flux speed. Rotor flux is directly measured by a position sensor or by Back-EMF.

동기식 기계에서 회전자 속도는 회전자 유동 속도와 같다. 회전자 유동은 위치 센서 또는 역기전력으로 직접 측정된다.

In an asynchronous machine the rotor speed is not equal to the rotor flux speed.

비동기식 기계에서 회전자 속도는 회전자 유동 속도와 같지 않다.

This needs to be calculated by a particular method using the d, q reference frame as explained in the above section.

이것은 위 섹션에서 설명한 d,q 참조 프레임을 사용하는 특정 방법으로 계산해야 한다.

The FOC provides various advantages which include 100% torque at start up, and quick calculation of rotor position that is required for commutation.

FOC 는 시동 시 100% 토크와 정류에 필요한 회전자 위치의 신속한 계산을 포함하여 다양한 이점을 제공한다.

It works well for various motors such as induction, PMSM or BLDC.

유도, PMSM 또는 BLDC 와 같은 다양한 모터에 적합하다.

One of the main disadvantages of the FOC technique is the complexity of the algorithm which has to be programmed in a microcontroller to find the rotor position for commutation.

FOC 기술의 가장 큰단점 중 하나는 정류를 위해 회전자 위치를 찾기 위해 마이크로 컨트롤러에 프로그래밍 해야 하는 알고리즘의 복잡성이다.

Chapter 4

Speed- Torque Relationship of the BLDC

BLDC 의 속도-토크 관계

BLDCs have been introduced to replace DC motors to provide more efficiency and lower cost.

BLDC 는 DC 모터를 대체하여 효율성과 비용을 낮추기 위해 도입되었다.

The speed vs. torque relationship for the BLDC is linear, but speed decreases as the load torque increases.

BLDC 에 대한 속도 대 토크 관계는 선형이지만 부하 토크가 증가함에 따라 속도는 감소한다.

In comparison, the speed of separately excited DC motor decreases only gradually as load torque increases.

비교하여, 별도로 작동된 DC 모터의 속도는 부하 토크가 증가함에 따라 서서히 감소한다.

A velocity control loop is used in some BLDC controllers to provide constant speed over the torque range.

속도 제어 루프는 일부 BLDC 제어기에서 토크 범위에서 일정한 속도를 제공하기 위해 사용된다.

This chapter has two objectives: first is to understand the speed vs torque characteristics of BLDCs and second, to understand the principles and design of a velocity control loop using a proportional integral (PI) controller.

이 장에는 두 가지 목적이 있다: 첫째, BLDC 의 속도와 토크 특성을 이해하고, 비례적분(PI)제어기를 사용하여 속도 제어 루프의 원리와 설계를 이해하는 것이다.

4.1 Torque- Speed characteristics

토크-속도 특성

For the study of electric motors, it is important to understand the term torque.

전기 모터에 대한 연구를 위해서는 토크라는 용어를 이해하는 것이 중요하다.

By definition, torque is the product of force and radius to rotate an object about its axis [15]

정의에 따르면, 토크는 축을 중심으로 물체를 회전시키는 힘과 반경의 곱이다.

$$Torque(N, m) = Force(N) \times Radius (m) \quad (4.1)$$

Therefore for a BLDC, torque can be increased by either increasing the force or the radius.

그러므로 BLDC 의 경우 힘 또는 반경을 증가시켜 토크를 증가 시킬 수 있다.

The force can be increased by using stronger magnets or increasing the currents in the phases.

힘은 강한 자석을 사용하거나 단계에서 전류를 증가시킴으로써 증가 될 수 있다.

A typical speed- torque characteristic graph of a BLDC is shown in Figure 4-1.

BLDC 의 일반적인 속도-토크 그래프가 그림 4-1 에 나와있다.

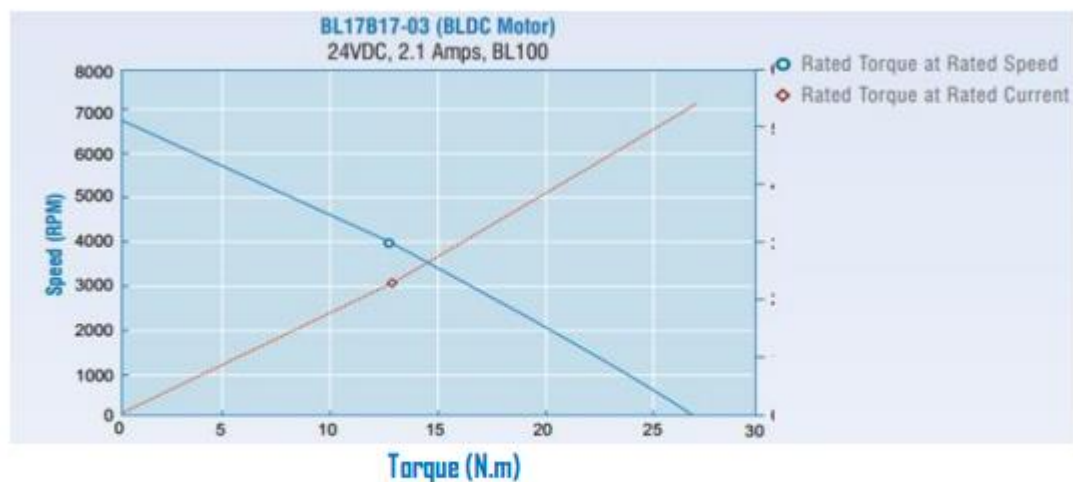


Figure 4-1: Speed vs. Torque of a BLDC [2]

The torque of a separately excited DC motor shown in Figure 4.2 is provided by equation (4.2)[16]

그림 4.2 에 나타난 별도로 작동된 DC 모터의 토크는 식(4.2)에 의해 보여진다.

$$Torque = K_a \phi I_a (N. m) \quad (4.2)$$

Where: K_a - Armature constant 전기자 정수

ϕ - Flux of the machine (Weber) 기계의 유동

I_a - Armature current (Ampere) 전기자 전류

From Figure 4-2, V_f and I_f are the field voltage and field current respectively.

그림 4-2 에서 V_f 와 I_f 는 각각 영역 전압과 영역 전류다.

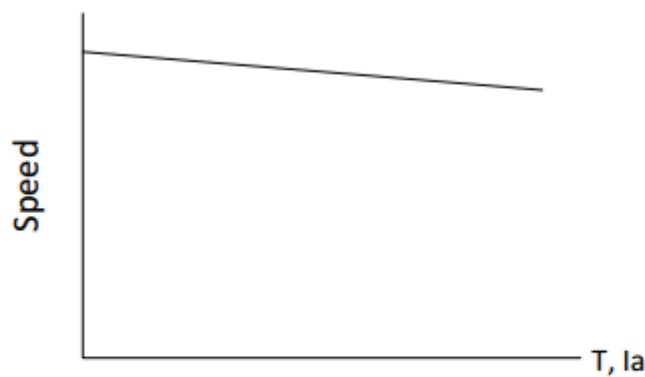


Figure 4-3: Speed vs. Torque of a Separately Excited DC Motor [15]

The speed- torque characteristic graph of a separately excited DC motor is shown in Figure 4-3.

별도로 작동된 DC 모터의 속도-토크 특성 그래프가 그림 4-3 에 나와있다.

As shown in the figure, the speed drop over the torque range is very small, hence providing good speed regulation, unlike the BLDC.

그림에서 볼 수 있듯이 토크 범위에서의 속도 강하는 매우 적기 때문에 BLDC 와는 달리 속도 조절이 뛰어나다.

Speed in a DC machine increases as the terminal voltage increases.

DC 장비의 속도는 단자 전압이 증가함에 따라 증가한다.

By adding a velocity loop to a BLDC control system, speed can be held constant across varying torque.

BLDC 제어 시스템에서 속도 루프를 추가 함으로써 다양한 토크에 걸쳐 속도가 일정하게 유지 될 수 있다.

This velocity control loop uses a Proportional Integral (PI) Controller for speed regulation.

이 속도 제어 루프는 속도 조절을 위해 비례적분(PI)제어기를 사용한다.

A PI controller corrects the error between a measured process variable and desired set point by calculating and then outputting corrective action that can adjust the process accordingly [17]as shown in Figure 4-4.

PI 제어기는 그림 4-4 와 같이 공정을 적절하게 조정할 수 있는 시정 조치를 계산하고 출력하여 측정된 공정변수와 원하는 설정 점 사이의 오차를 보정한다.

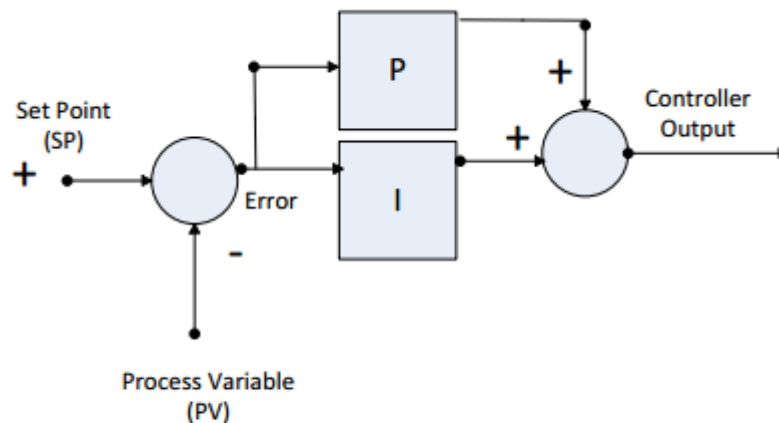


Figure 4-4: Block Diagram of a PI Controller [16]

The PI controller has two modes of control – Proportional (P) and Integral (I).

PI 제어기에는 비례(P)와 적분(I)의 두가지 제어 모드가 있다.

For a given error signal changing over time in a control closed loop system, the proportional mode multiplies the error by the gain K_p .

제어달린 루프시스템에서 시간에 따라 변하는 주어진 오류신호에 대해 비례모드는 오류에 K_p 이득을 곱한다.

Therefore, if the error is large the proportional gain will produce a larger output and if the error is zero the proportional gain will produce a zero output.

따라서 오차가 크면 비례이득은 더 큰 출력을 생성하고 오차가 0 이면 비례이득은 0 출력을 생성한다.

The integral mode continuously sums and multiplies the error (changing over time) with the gain K_i .

적분 모드는 계속적으로 합하고 K_i 이득과 함께 오류(시간에 따라 변하는) 를 곱한다.

The integral mode is used to remove constant error.

정수 모드는 상수 오류를 제거하는데 사용된다.

Therefore, no matter how small the constant error is, the summation of the error is going to be significant enough to adjust the controllers output [17].

그러므로 상수 오차가 얼마나 작더라도, 오차 합산은 제어기 출력을 조정하기에 충분히 중요할 것이다.

The PI controller output is:

PI 제어기 출력은 다음과 같다.

$$Output = K_p e(t) + K_i \int e(\tau) d\tau \quad (4.4)$$

Where:

K_p - Proportional gain 비례이득

K_i - Integral gain 적분이득

e - Error ((S_p (Set Point) - P_v (Process Variable)) 오류

t - Time 시간

4.2 Velocity Control Using a PI Controller in a BLDC Drive:

BLDC 드라이브에서 PI 제어기를 사용한 속도 제어:

The speed is controlled using a velocity controller which is implemented using a conventional PI controller.

속도는 기존의 구현된 PI 제어기를 사용하여 제어 된다.

The difference between the actual speed and the desired speed is fed as an input to the PI controller, and based on this difference, the PI controller controls the duty cycle of the PWM pulses to the 6 transistors in the inverter.

실제 속도와 원하는 속도의 차이가 PI 제어기의 입력으로 공급되며, 이 차이를 기반으로 PI 제어기는 인버터의 6 개 트랜지스터에 대한 PWM 펄스의 듀티 사이클을 제어한다.

This controls the voltage amplitude required to maintain the desired speed.

이것은 원하는 속도를 유지하는데 필요한 전압 진폭을 제어한다.

This process is illustrated in the block diagram shown in Figure 4-5

이 프로세스는 그림 4-5의 블록 다이어그램에 나와있다.

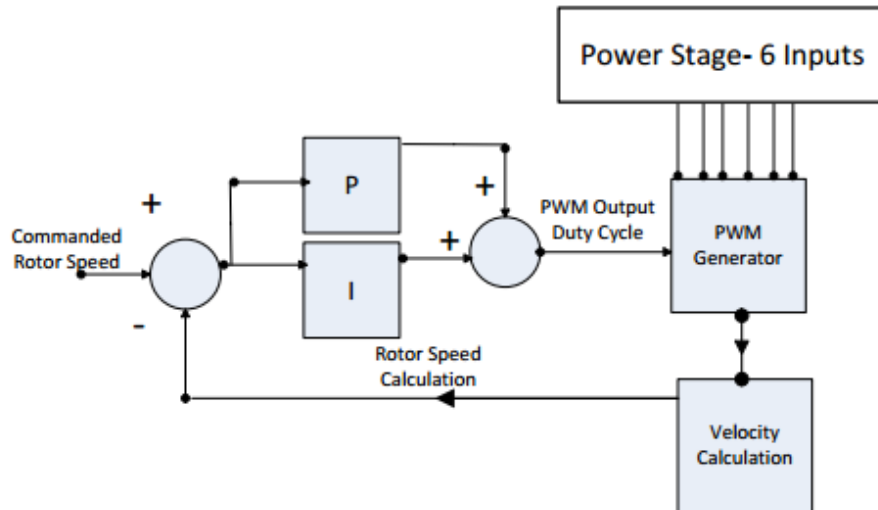


Figure 4-5: Block Diagram of a Velocity Control Loop for a BLDC with PI Control [17]

4.2.1 Tuning the K_p and K_i Gains:

K_p 및 K_i 이득 조정:

Speed control depends on knowledge of the inertia of the load, mechanical linkages, and desired response [18].

속도 제어는 부하의 관성, 기계적 연결 및 원하는 응답에 대한 지식에 달려있다.

Gains K_p and K_i need to be tuned accordingly to get a stable system. K_p and K_i are initialized using a "rule of thumb", which works well for most motors [18].

K_p 와 K_i 이득은 안정적인 시스템을 얻으려면 그에 따라 조정해야 합니다. K_p 와 K_i 는 대부분 모터에서 잘 작동하는 "경험 법칙"을 사용하여 초기화 된다.

The open loop transfer function of the system presented in equation (4.5) and (4.6) [18] is obtained from the closed loop velocity control system in Figure 4-6.

방정식(4.5)와 (4.6)에 제시된 시스템의 열린 루프 전달 함수는 그림 4-6 의 닫힌 루프 속도 제어 시스템에서 얻어진다

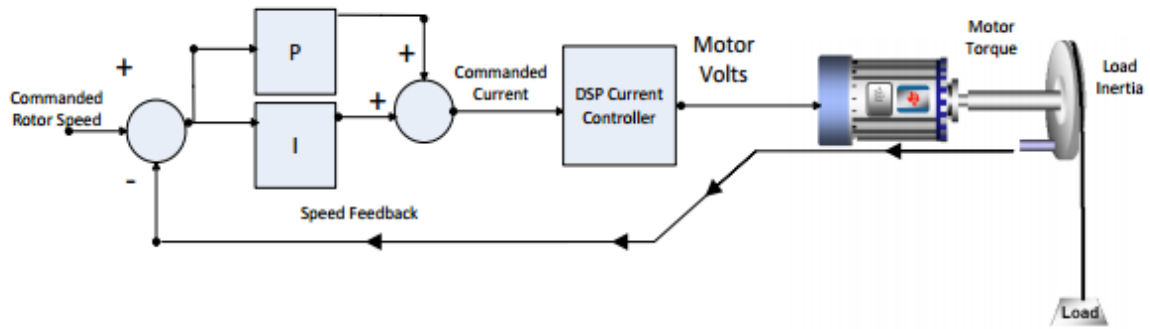


Figure 4-6: Closed Loop Velocity Control using PI for a BLDC [17]

$$G_{loop}(s) = PI(s) \times K_{curr} \times Mech(s) = K_i \left(\frac{1 + \frac{K_p}{K_i s}}{s} \right) K_{curr} \left(\frac{K}{s} \right) \quad (4.5)$$

$$G_{loop}(s) = \frac{K K_{curr} K_i}{s^2} \left(1 + \frac{K_p}{K_i} s \right) \quad (4.6)$$

Where,

K_{curr} - Gain of current controller

The closed loop transfer function $\left(\frac{G_{loop}(s)}{1 + G_{loop}(s)} \right)$ of (4.6) is

$$G_{loop}(s) = \frac{K K_{curr} K_i \left(\frac{1 + \frac{K_p}{K_i s}}{s} \right)}{s^2 + K K_{curr} K_p s + K K_{curr} K_i} \quad (4.7)$$

Stiffness is the property of a system that dictates how aggressively the system will reject disturbances [18].

강성도는 시스템이 방해를 얼마나 적극적으로 거부 할지를 결정하는 시스템의 속성이다.

The stiffness of the motor depends on K_i , and as we increase K_i the stiffness of the motor system increases.

모터의 강성도는 K_i 에 의존하고 K_i 를 증가시키면 모터의 시스템의 강성도도 증가한다.

Similarly, gain K_p controls the damping of the system, which is a property that reduces or dissipates heat energy as rapidly as possible in order to reduce oscillations and get a stable system [19].

유사하게 K_p 이득은 진동을 줄이고 안정적인 시스템을 얻기 위해 가능한 빨리 열 에너지를 줄이거나 방산하는 특성인 시스템의 감쇠를 제어한다.

By applying a load to this system, it was observed that by having a high K_i and low K_p the system had large oscillations and was unstable.

이 시스템에서 부하를 가함으로써 높은 K_i 와 낮은 K_p 를 갖는 시스템은 큰 진동을 가지며 불안정한 것으로 관찰되었다.

Therefore, to achieve a stable system the gain K_p was increased.

따라서 안정적인 시스템을 달성하기 위해서는 이득이 증가했다.

The proper K_p and K_i can vary for different BLDCs.

적절한 K_p 와 K_i 는 서로 다른 BLDC에 따라 다를 수 있다.

This is due to the duration of the commutation interval.

For a given test, the gains are set high which results in a stable system at higher speed, but once the speed is lowered, the system tends to be unstable.

주어진 테스트의 경우 이득은 높게 설정되어 더 빠른 속도로 안정적인 시스템이 되지만, 일단 속도가 낮아지면 시스템이 불안정한 경향이 있다.

This is due to the duration of the commutation interval.

이것은 정류 간격의 지속 시간 때문이다.

When the motor is spinning at high speed, there are many commutation intervals per second, which means that the velocity feedback value is updated many times per second.

모터가 고속으로 회전 할 때 마다 초당 정류 간격이 많아서 속도 피드백 값이 초당 여러 번 업데이트 된다.

However, when the motor is spinning at low speed, the commutation rate is low, which means the update rate for the velocity value is also low, and this causes a phase lag between the true velocity and the measured velocity.

그러나 모터가 저속으로 회전할 때, 정류율은 낮아서 속도값에 대한 업데이트 속도도 낮다는 것을 의미하며, 이는 실제 속도와 측정된 속도 사이의 위상 지연을 유발한다..

Since the velocity value is not updated frequently, the control becomes unstable.

속도 값이 자주 업데이트 되지 않으므로 제어가 불안정해 진다.

Chapter 5

Experimental Results

5.1 Prony Brake Dynamometer

The speed vs. torque characteristics of two different BLDCs were measured using a Prony Brake Dynamometer, which is a simple type of dynamometer used to measure the torque.

두개의 다른 BLDC 의 속도대 토크 특성은 토크를 측정하는데 사용되는 간단한 유형의 동력계인 Prony Brake Dynamometer 를 사용하여 측정되었다.

This device was invented by French Engineer Gaspard de Prony in 1821.

이 장치는 1821 년 프랑스 엔지니어 Gaspard de Prony 에 의해 고안되었다.

A Prony brake consists of a leather strap wrapped around a pulley which is connected directly to the shaft of the motor as shown in Figure 5-1.

PronyBrake 는 그림 5-1 과 같이 모터 샤프트에 직접 연결되는 도르래에 감겨진 가죽 스트랩으로 구성 되어 있습니다.

Two spring scales are attached to both ends of the leather strap to measure the force on the pulley when the motor is running in either direction.

가죽 스트랩의 양 끝에 2 개의 스프링 저울이 부착되어 모터가 어느 방향으로도 달릴 때 풀리는 힘을 측정한다.

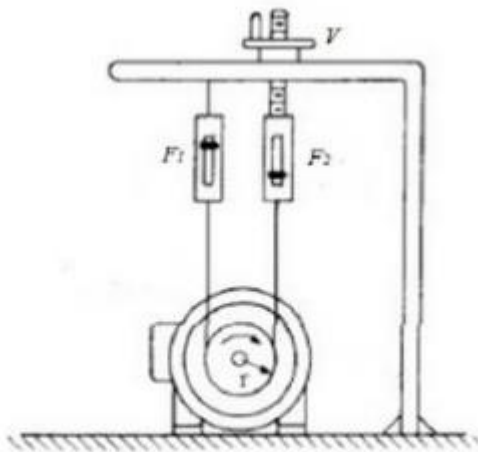


Figure 5-1: Prony Brake Dynamometer[20]

From Figure 5-1, F_1 and F_2 are the two force deflections on the spring scales.

그림 5-1 에서 F_1 과 F_2 는 스프링 저울에 대한 두 가지 힘의 처짐이다.

When the motor is spinning in clockwise direction there is deflection in spring F_1 but not F_2 , and when the motor is spinning in counter clockwise there is deflection on spring F_2 but not F_1 .

모터가 시계방향으로 회전할 때 스프링 F1 은 편향되지만 F2 는 편향되지 않으며 모터가 반시계 방향으로 회전 할 때 스프링 F2 는 편향되지만 F1 은 편향 되지 않습니다.

The prony brake dynamometer setup in the lab is shown in Figure 5-2.

실험실에서 prony brake dynamometer 설정은 그림 5-2 에 나와 있다.

The measured torque is given by (5.1)

측정된 토크(5,1)

$$Torque = F \times r \text{ (lbs. ft)} \quad (5.1)$$

Where,

F- Spring force (lbs.) r- Radius (ft.)

F-스프링 힘(lbs) r-반경(ft)



Figure 5- 2: Prony Brake Setup

5.2 Test Results of Speed vs. Torque for Different BLDC Control Techniques

서로 다른 BLDC 제어 기법에 대한 속도 대 토크의 시험 결과

To compare speed vs. torque characteristics for different control techniques, a BLDC kit from Texas Instruments (TI) – DRV8312- 69M and one from Freescale – 3Phase- LV kits were tested.

다양한 제어 기술에 대한 속도와 토크 특성을 비교하기 위해 Texas instruments(TI)의 BLDC 키트 - - DRV8312- 69M 과 Freescale – 3Phase- LV 키트의 BLDC 키트를 테스트 했다.

These kits were operated using various control techniques such as Hall Effect sensors, Trapezoidal Back EMF (Direct Back EMF Zero Crossing), Indirect Back EMF and Field Oriented Control (FOC).

이 키트는 홀 효과 센서, 사다리꼴 역기 전력, 간접 역기 전력 및 FOC 와 같은 다양한 제어기술을 사용하여 작동 되었다.

The speed vs. torque characteristics were measured using a strobe light and Prony brake dynamometer.

속도 대 토크 특성은 스트로브 라이트와 Prony brake 동력계를 사용하여 측정되었다.

5.2.1 TI Kit- DRV8312- 69M

The DRV8312- 69M kit shown in Appendix A.1 uses a control technology developed by Texas Instruments called InstaSPIN.

부록 A.1 에 제시된 DRV8312- 69M 키트는 Texas Instruments 에서 개발한 InstaSPIN 이라는 제어 기술을 사용한다.

The InstaSPIN technology provides sensorless features such as InstaSPIN- FOC, InstaSPIN- BLDC and InstaSPIN- DRV8312 to control the motor using FOC, Indirect Back- EMF, and Trapezoidal control, respectively.

InstaSPIN 기술은 as InstaSPIN- FOC, InstaSPIN- BLDC 와 InstaSPIN- DRV8312 같은 센서리스 기능을 제공하여 FOC, Indirect Back- EMF, 와 Trapezoidal 제어를 사용하여 모터를 각각 제어한다.

This kit also provides sensed Trapezoidal Back- EMF control using Hall Effect sensors.

이 키트는 홀 효과 센서를 사용하여 감지된 사다리꼴 역기전력 제어도 제공한다.

The speeds vs. torque curves for different InstaSPIN technology are shown in Figure 5-3, 4, 5 and 6.

다른 InstaSPIN 기술에 대한 속도 대 토크 곡선이 그림 5-3,4,5,6 에 나와 있다.

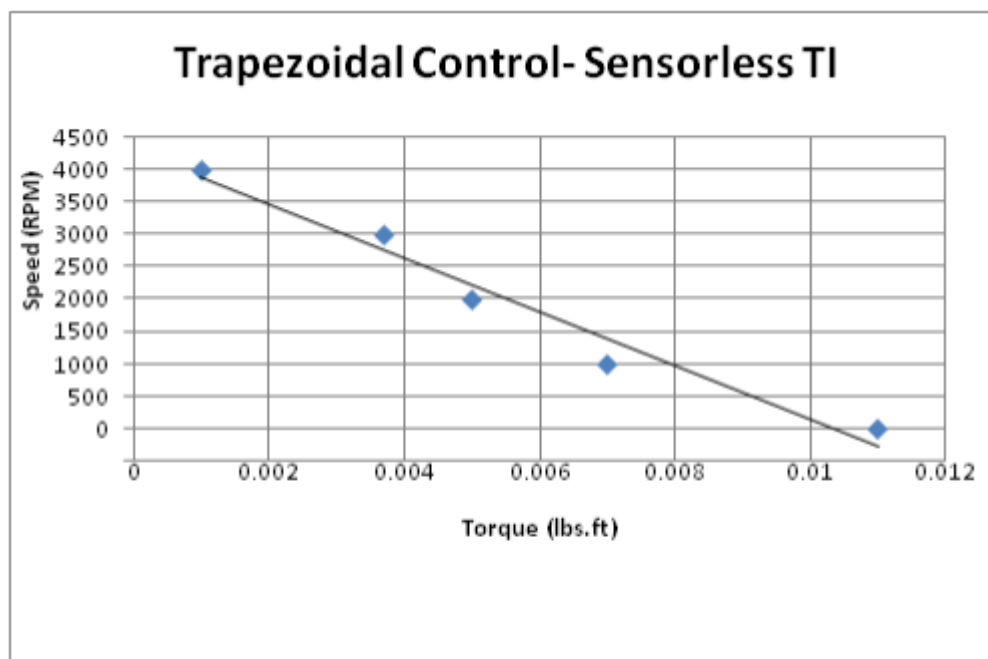


Figure 5-3: Speed vs. Torque of Trapezoidal BLDC Control by TI

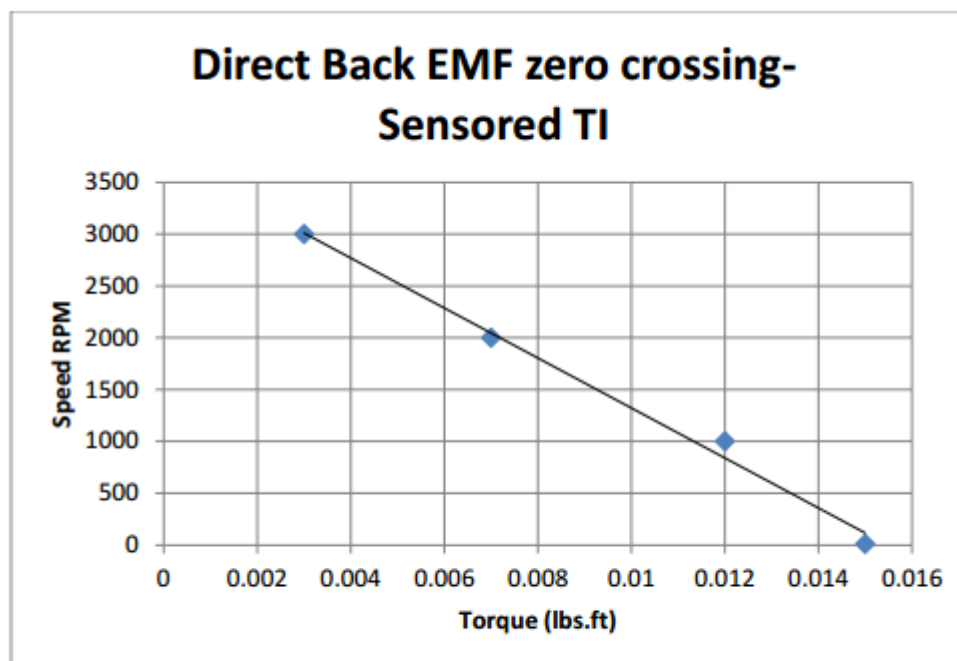


Figure 5-4: Speed vs. Torque of the Direct Back- EMF using Hall Effect Sensors by TI

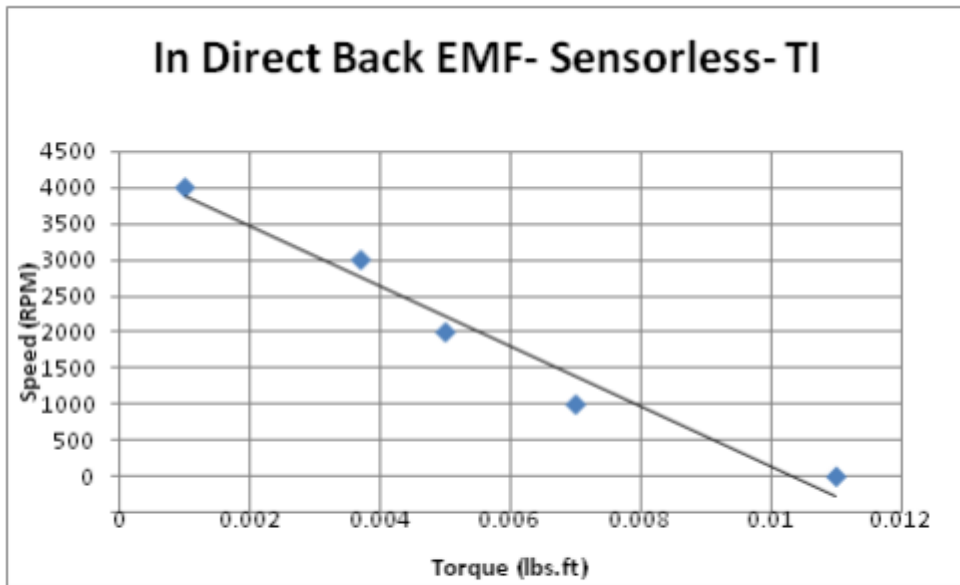


Figure 5-5: Speeds vs. Torque of Indirect Back EMF by TI

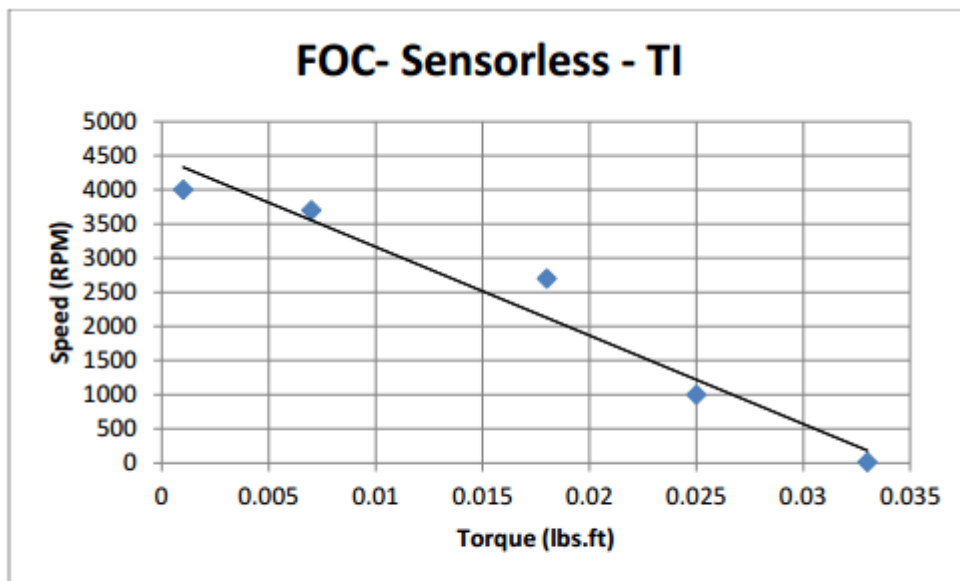


Figure 5-6: Speed vs. Torque of FOC by TI

5.2.2 Freescale- 3PhaseLV

The 3PhaseLV kit shown in Appendix A.2 comes with two microcontrollers: the MC56F8006 (32bit) and the MC9S08MP16 (8bit).

부록 A.2 에 있는 3 상 LV 키트에는 the MC56F8006 (32bit) 와 the MC9S08MP16 (8bit)의 두 가지 마이크로 컨트롤러가 함께 제공된다.

The kit can operate the motor using the Indirect and Direct Back EMF techniques.

이 키트는 간접 및 역기전력 기술을 사용하여 모터를 작동 시킬 수 있다.

The speed vs. torque curves are shown in the Figures 5-7 and 5-8.

속도 대 토크 곡선은 그림 5-7 과 그림 5-8 에 나와 있다.

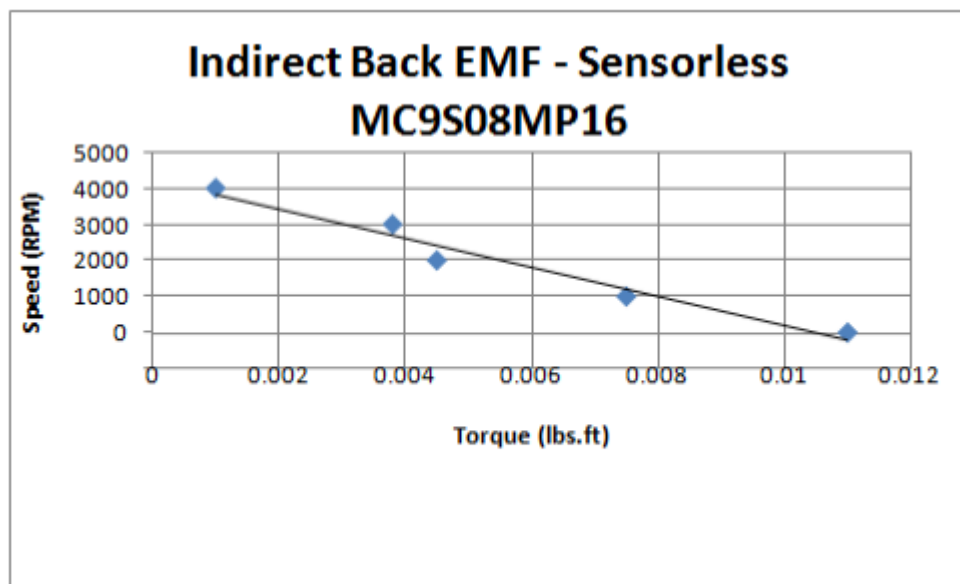


Figure 5-7: Speed vs. Torque of the Indirect Back EMF by Freescale

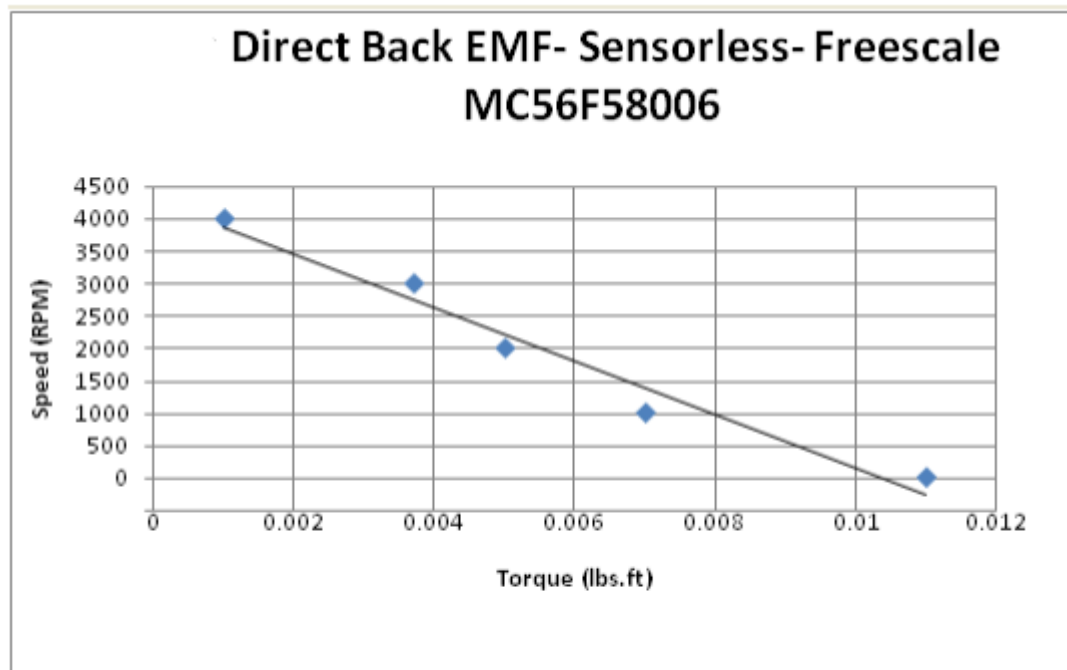


Figure 5-8: Speed vs. Torque of the Direct Back EMF by Freescale

As shown in Figures (5-3) to (5-8) the speed vs. torque curves for the sensed and sensorless control techniques share similar results.

그림 (5-3)에서 (5-8)에 표시된 바와 같이 센서 형 및 센서리스 제어 기술에 대한 속도 대 토크 곡선은 유사한 결과를 공유한다.

The speed varies linearly with respect to torque.

속도는 토크와 관련하여 선형적으로 변화한다.

The only difference between the graphs is the speed performance over load torque changes.

그래프 간의 유일한 차이점은 부하 토크 변화에 대한 속도 성능이다.

The motor used in a Freescale kit is the 45ZWN24-40 (Rated Torque is 990 g.cm and Rated Power is 40 W) is a bigger motor than the motor used in the TI kit, the DT4260-24-055-04(Rated Torque is 640 g.cm and Rated Power is 26 W).

프리스케일 키트에 사용된 모터는 45ZWN24-40 (정격 토크는 990 g.cm 고 정격 출력은 40 W)은 TI 키트에 사용된 모터보다 큰 모터인 DT4260-24-055-04(정격 토크는 640 g.cm 정격 출력은 26 W)다.

FOC sensorless control by TI had the highest stall torque of all the methods including the Hall Effect sensor.

TI 의 FOC 센서리스 제어는 홀 효과 센서를 포함한 모든 방법에서 가장 높은 실속 토크를 가진다.

This was very odd since Freescale had a bigger motor than TI.

프리스케일은 TI 보다 더 큰 모터를 보유하고 있어 매우 이상한 일이었다

In order to provide constant speed as torque varies, a velocity control loop has to be used for speed regulation.

토크가 변화함에 따라 일정한 속도를 제공하기 위해서는 속도 조절 루프가 속도 조절을 위해 사용되어야 한다.

This is an important feature for the fixed speed applications.

이것은 고정 속도 응용에서 중요한 기능이다.

The speed vs. torque characteristics of two velocity control systems using sensorless FOC and sensorless Indirect Back EMF control are shown in Figures 5-9 and 5- 10.

센서리스 FOC 및 센서리스 간접 역기 전력 제어를 사용하는 두 속도 제어 시스템의 속도 대 토크특성은 그림 5-9 와 5-10 에 나와있다.

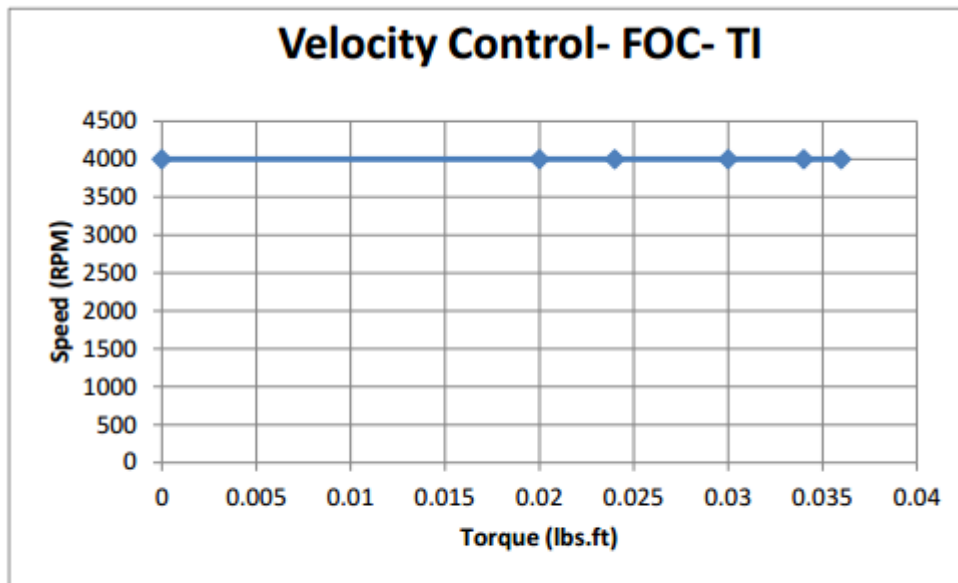


Figure 5-9: Speed vs. Torque of Velocity Control Loop Using FOC

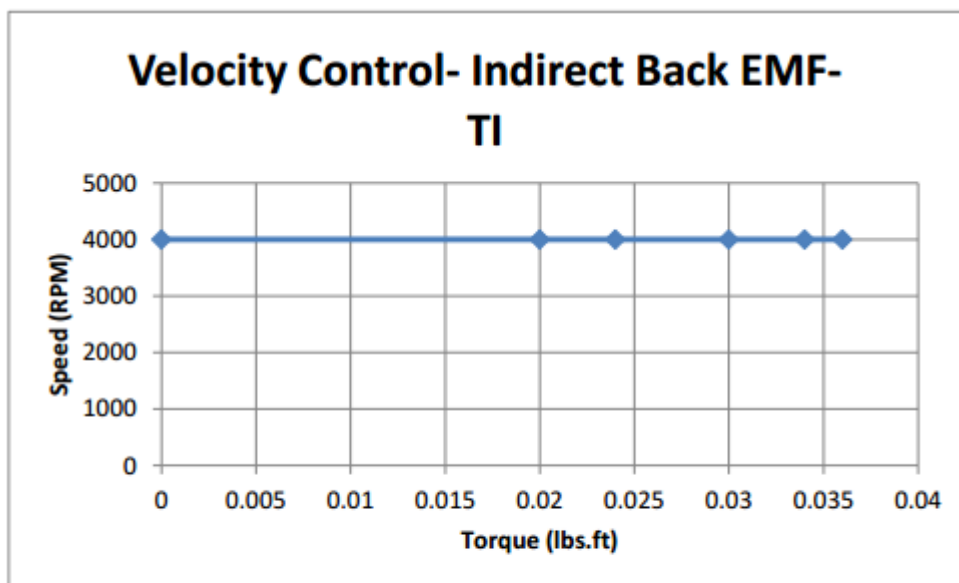


Figure 5-10: Speed vs. Torque of Velocity Control Loop Using Indirect BackEMF

Chapter 6

Conclusion and Future Work

6.1 Conclusion

BLDC are constantly replacing DC motors in various applications.

BLDC 는 다양한 응용 분야에서 DC 모터를 지속적으로 대체하고 있다.

These applications vary from fans, pumps, steering wheel and blowers to name a few.

이러한 응용은 팬, 펌프, 조정 휠, 송풍기로 다양하다.

A typical BLDC behaves as a PM DC motor with linear speed vs. torque characteristics where the speed decreases as the load increases.

일반적인 BLDC 는 부하가 증가함에 따라 속도가 감소하는 선형 속도 대 토크 특성을 갖는 PM DC 모터로 동작한다.

Some applications, such as an automobile (Windscreen wiper), require the motor to have a fairly constant speed for different loads.

자동차와 같은 일부 응용은 모터가 서로 다른 부하에 대해 상당히 일정한 속도를 유지해야 한다.

DC motors such as shunt and compound work reasonably well in these applications, but a BLDC with a PI controller improves the performance.

직류발전기와 복합체 같은 DC 모터는 이러한 응용에서 적절하게 작동하지만 PI 제어가 있는 BLDC 성능을 향상 시킨다.

The speed vs. torque characteristics shown in Figure 5-9 and 10 show that the speed remains virtually constant across the torque range.

그림 5-9 와 10 에 표시된 속도 대 토크 특성은 속도가 토크 범위에서 사실상 일정하게 유지된다는 것을 보여준다.

These curves are more similar to a separately excited DC motor, but they are actually much better because of the feedback control.

이 커브는 별도로 여기 된 DC 모터와 더 유사하지만 실제로는 피드백 제어로 인해 훨씬 더 좋다.

Various sensorless control techniques are being introduced and researched in order to replace the use of sensor control techniques in a BLDC system.

BLDC 시스템에서 센서 제어 기술의 사용을 대체하기 위해 다양한 센서리스 제어 기술이 도입되고 연구 되고 있다.

By doing this, the cost of the system can be reduced and BLDC can be more affordable.

이렇게 하면 시스템 비용을 줄이고 BLDC 를 더 저렴하게 사용할 수 있다.

Techniques such as Direct Back EMF Zero Crossing, Indirect Back EMF Integration and Field Oriented Control (FOC) were studied in this research.

본 연구에서는 직접 역기전력,간접 역기전력 통합 및 FOC 같은 기술을 연구했다.

Direct Back EMF, Indirect Back EMF Integration and FOC share similar linear speed vs torque relationship.

직접 역기전력,간접 역기전력 통합 및 FOC 은 유사한 선형 속도 대 토크 관계를 공유한다.

This is illustrated in Figure 5-3, 5-4, 5-5, 5-6, 5-7 and 5-8.

이것은 그림 5-3, 5-4, 5-5, 5-6, 5-7,5-8 에 나와있다.

The only difference noticed in the speed vs torque curve is the stall torque.

속도 대 토크 곡선에서 유일한 차이점은 실속 토크다.

The stall torque was different for all the techniques.

실속 토크는 모든 기술에 따라 다르다.

FOC had the highest stall torque when compared to Direct Back Zero Crossing, Indirect Back EMF Integration and Hall Effect Sensor.

직접 역기 제로 크로싱, 간접 역기전력과 홀 효과 센서에 비해 FOC의 실속이 가장 컸다.

6.2 Future Work

To extend the research work presented in this thesis, future work may consider the following possibilities:

이 논문에서 제시된 연구 결과를 확장하기 위해 미래연구는 다음과 같은 가능성을 고려할 수 있다.

- ♣ Various other sensorless techniques apart from the techniques mentioned in this thesis report can be researched and applied to BLDCs.

다양한 다른 기술을 BLDC의 속도 대 토크 특성에 대해 테스트할 수 있으며 별도로 작동된 DC 모터의 속도 대 토크 특성과 비교할 수 있다.

- ♣ Various other techniques can be tested for speed vs. torque characteristics of BLDCs and can be compared to the speed vs. torque characteristics of a separately excited DC motor.

다양한 기술의 실속 토크를 측정하고 비교할 수 있다.

- ♣ Stall torque of various techniques can be measured and compared.

피트백 제어 루프를 적용할 수 있으며 속도와 토크 특성을 테스트할 수 있다.

♣ A feedback control loop can be applied and speed vs. torque characteristics can be tested.

피드백 제어 루프를 적용할 수 있으며 속도와 토크 특성을 테스트 할 수 있다.

The three sensorless control techniques studied in this thesis are Direct Back EMF Zero Crossing, Indirect Back Integration and FOC. FOC is the most mathematically complex technique.

이 논문에서 연구된 3 가지 센서리스 제어 기술은 직접 역기전력 제로 크로싱, 간접 역기전력, FOC 이다. FOC 는 수학적으로 가장 복잡한 기법이다.

The complexity of this technique is considered as a disadvantage, as this techniques algorithm is difficult to comprehend.

이 기법은 복잡성은 단점으로 간주된다. 왜냐하면 이 기법 알고리즘은 이해하기 어렵기 때문이다.

Future work in the study of simplifying the control algorithm of FOC is very important.

FOC 의 제어 알고리즘을 단순화하는 연구에서 앞으로 작업은 매우 중요하다.

It is very important to tune K_p and K_i gain of the velocity control loop in order to get a stable system.

안정된 시스템을 얻으려면 속도 제어 루프의 K_p 와 K_i 이득을 조정하는 것이 매우 중요하다.

In this study, the "rule of thumb" was applied in tuning the gains K_p and K_i .

이 연구에서는 K_p 와 K_i 이득을 조정에 엄지 손가락 규칙이 적용되었다.

However, to obtain more accurate values of K_p and K_i , future studies should consider applying more reliable tuning methods such as the Ziegler- Nicholas method [21].

그러나 K_p 와 K_i 의 보다 정확한 값을 얻으려면 앞으로의 연구에서 Ziegler- Nicholas 방법[21]과 같은 보다 신뢰성 있는 튜닝 방법을 적용하는 것이 고려 되어야 한다.