

# BLDC Motor의 구동회로와 제어회로

황 병 창\*

(\*LG 정밀(주) 정밀기구 OBU 모터팀)

## 1. 서 론

상용전원을 직접 사용하는 AC전동기는 제작이 쉽고 사용이 용이하나 소비전력이 많고, 속도제어회로의 복잡성 및 제어범위의 제약 등으로 성능 향상에 한계가 있다. 이에 비하여 DC전동기는 브러시와 정류자의 구조에 의해 전동기 성능, 수명 및 유지보수에 단점이 있다. 이러한 DC전동기의 단점을 보완한 브러시리스 DC전동기는 AC유도전동기에 비하여 넓은 범위의 속도제어가 가능하고 고효율의 장점이 있어 중·소형 정밀모터에 많이 이용되고 있으며 앞으로 그 응용범위가 더욱 확대될 것으로 판단된다.

특히 지구 온난화방지를 위해 산업부문에 있어서 에너지 효율에 대한 규제가 점차 강화되고있고, 일본의 경우 에너지의 고효율화에 관한 법률을 1993년도에 제정하여, 1999년 4월 개정 실시 중으로 2004년에는 산업부문에 있어서 전면 적용될 것으로 추정된다. 특히, 가전기기 중 에어컨, 냉장고, 세탁기 등과 같이 소비전력이 높은 제품에 인버터의 사용하여 에너지 효율을 높이고 기존의 AC유도전동기에 비하여 효율이 높은 브러시리스 DC모터의 적용이 가속화되고 있다. 이러한 추세에 따라 1999년 일본국내수요의 약 50% 이상이 인버터제어용 전동기 및 브러시리스 DC모터로 사용될 것으로 판단된다.

이러한 장점을 갖는 브러시리스 DC전동기는 직류전동기의 브러시와 정류자의 기계적 기능에 의한 정류구조를 전자적으로 대체한 전동기로서 필연적으로 구동회로 및 제어회로를 가지게 된다. 이러한 전자회로는 브러시리스모터의 가격을 향상시켜 경쟁성 면에서 단점을 가지게 된다. 따라서 최근에는 센서리스 제어 등 브러시리스모터의 경쟁력을 향상시키기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 본고에서는 브러시리스 DC모터에 대한 기본 동작원리와 구동회로, 제어회로 및 고효율회로의 설계사례를 소개하여 브러시리스모터의 제어에 대한 기술적인 추세에 대하여 소개하고자 한다.

## 2. 브러시리스 DC모터의 구동

### 2.1 전동기의 동작원리

브러시리스DC모터의 구동원리는 일반적인 DC전동기의 구동원리와 동일하다. 그림 1은 DC전동기의 구동원리로서 영구자석에 의한 자계와 코일에 흐르는 전류의 상호작용으로 플레밍의 왼손법칙에 의해 화살표 방향의 토크가 발생하게 된다. 이때 전동기가 회전함에 따라 발생토크가 역방향으로 되므로 정류자에 의해 전류를 반전시키면 일정방향의 토크를 발생시키게 된다. 브러시리스 DC모터는 DC전동기의 브러시와 정류자의 구조를 전자적으로 대체한 것으로 DC전동기의 회전자인 코일을 고정하고 고정자인 영구자석을 회전자로 하여 영구자석 감지용 센서와 파워소자(보통 트랜지스터를 사용함)에 의한 전류를 절환하여 일정방향으로 토크가 발생될 수 있도록 한 구조이다. 따라서 브러시리스모터에서는 회전자의 자극을 검출할 수 있는 센서와 그에 따라서 통전방향을 바꾸어주는 구동회로가 필요하게 된다.

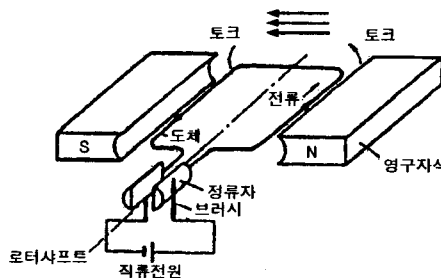


그림 1. 직류전동기의 동작원리

### 2.2 구동방식

브러시리스모터에 일반적으로 사용되는 구동방식으로서

는 전압구동, 전류구동 및 펄스구동방식이 있다. 그림 2는 대표적인 구동방식의 기본회로로서 코일에 흐르는 전류를 제어하고 발생하는 자속을 제어하는 의미로서는 기본적으로는 동일하지만 각 방식은 효율, 제어특성이 다르고 장·단점이 있으므로 각 용도에 맞추어서 구동방식을 선택하여야 한다. 그림 2(a)는 전압구동회로로서 코일은  $V_{IN} - V_{BE}$ 의 정전압에 의해 구동된다. 그림 2(b)는 전류구동회로로서 코일은  $(V_{IN} - V_{BE})/R$ 의 정전류에 의해 구동된다. 그림 2(c)는 펄스구동에 있어서 입력되는 펄스의 주파수를 코일의 시정수 ( $L/r_a$ )에 비하여 충분히 크게 하면 구동용 트랜지스터 Q가 통전될 때 인덕턴스(L)에 자기적 에너지 ( $\frac{1}{2}LI^2$ )가 축적되어 Q가 off일 때도 다이오드 D를 통하여 전류가 흐르게 되므로 트랜지스터의 on, off시에 관계없이 구동전류가 흐르게 된다.

그림 2(a),(b)의 전압, 전류구동방식에 대한 효율을 살펴보면 전압구동의 경우 트랜지스터 Q에 의한 스위칭 동작에 의해서 소비전력은 식(1)로 표현된다.

$$P_{d1} = V_{CE(SAT)} \times I_c \quad (1)$$

콜렉터에 접속된 시리즈저항 R에서의 소비전력( $P_{d2}$ )은 식(2)로 된다.

$$P_{d2} = I_L^2 \times R \quad (2)$$

따라서 구동회로 전체에서의 소비전력( $P_d$ )는 식(3)과 같다.

$$P_d = P_{d1} + P_{d2} \quad (3)$$

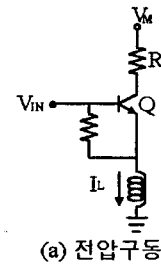
전압구동에서 코일에 인가되는 전압  $V_L$ 은 구동전압  $V_M$ 과 관계없고 입력전압  $V_{IN}$ 에 의존한다. 따라서  $V_M$ 을 올리면 시리즈저항 R의 소비전력을 증가시키므로 효율을 저하시키게 된다. 즉,  $V_M$ 이 높고,  $V_L$ 이 낮으면 효율이 악화되므로  $V_M$ 을 가능한 낮출 수 있으면 고효율화 된다. 직렬 저항 R이 없어도 회로동작에는 영향을 미치지 않으나 저항이 소비하는 전력을 구동 트랜지스터가 소비하게 되므로 이 구동 트랜지스터를 허용손실이 큰 것을 사용한다면 된다.

전류구동방식에서 구동 트랜지스터는 스위칭 동작이 아니라 정전류 영역에서 동작하므로 구동전압  $V_M$ 에서 코일 인가전압  $V_L$  및 에미터 저항 R의 전압강하를 뺀 전압이 콜렉터와 에미터간의 전압이 된다. 이때 소비전력은 식(4)로 된다.

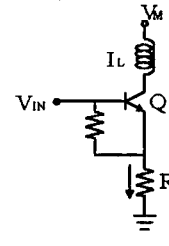
$$P_{d1} = V_M \times I_L - I_L^2 \times (R + r) \quad (4)$$

$$P_{d2} = I_L^2 \times R$$

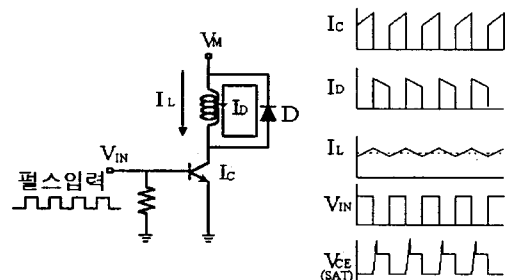
전류구동방식에서도 구동전압  $V_{IN}$ 과 코일에 인가되는 전압의 차가 크면 구동트랜지스터의 소비전력이 증가하고, 이로 인하여 효율이 저하한다 따라서 전압구동방식과 전류구동방식에서는 구동트랜지스터, 시리즈저항의 소비전력은



(a) 전압구동



(b) 전류구동



(c) 펄스 구동회로

그림 2. 구동회로 및 파형특성

로 인하여 고효율에 제약을 받으나 설계방법에 의해 어느 정도 고효율화가 가능하다. 즉, 구동전압  $V_M$ 을 가능한 최대한 낮추면 효율이 증대되고 특히 전압구동방식에 있어서 효과가 크다. 또한 전압구동방식에서 코일의 구동전력을 상승시키므로써 구동 트랜지스터가 소비하는 전력은 전류증가에 의한  $V_{CE(SAT)}$ 의 증가분이 더하여지는 것만이 되고 약간의 상승으로 끝나는 것도 트랜지스터의 방열을 고려하면 장점을 갖게 된다.

보통 전압구동방식에서는 콜렉터의 시리즈 저항을 삽입하지 않고 스위칭 레귤레이터의 출력을 직접구동전원으로 이용하는 경우가 많다. 이 경우, 스위칭 레귤레이터를 PWM 제어하기 위한 입력오차신호로서 회전수 신호를 이용하면 루프내에 스위칭 레귤레이터를 포함한 고효율의 전압제어 방식의 전동기구동회로를 구성할 수 있다. 전압제어의 경우 구동트랜지스터의 에미터측 즉 저임피던스측에 코일이 접속되므로 제어하기 쉬운 장점이 있다. 따라서, 가장 효율이 높은 것은 펄스구동이지만 이 경우, 구동 트랜지스터의 소비전력  $P_{d(sw)}$ 은 On시의 손실과 축적손실, 턴 오프 손실의 합이 되어 식(5)와 같이 된다.

$$P_d(sw) = V_{CE} \times I_L + P_{stg} + P_{off} \quad (5)$$

구동회로 전체손실은 플라이휠 다이오드 D의 순방향손실 및 회복시의 축적손실, On시의 손실의 합으로 된다. 그러나 트랜지스터, 다이오드로서도 턴 오프시의 손실은 무시할 수 있을 정도로 작고 축적손실도 스위칭특성이 우수한 것을 이용하면 충분히 작아지므로 간이적으로 전체손실은 트랜지스터가 On시의 손실 및 다이오드의 동일한 On시의 순방향손실을 합으로 보아도 된다.

### 2.3 구동회로

#### 2.3.1 상수와 통전방식에 의한 분류

구동회로를 통전방식에 따라 분류하면 코일에 일정한 방향으로 전류를 흘리는 반파구동방식과 양방향으로 전류를 흘리는 전파구동방식으로 분류할 수 있다. 2상 반파구동방식과 단상 전파구동방식은 회로구성이 간단하여 속도변동이 문제가 되지 않는 팬 모터 등에 많이 적용되는 구동방식이다.

#### 2.3.2 통전각에 의한 분류

토크를 발생하기 위한 통전각을 몇도로 통전하는가에 따라 90도통전, 120도 통전, 180도 통전등으로 구분한다. 2상전파구동방식은 90도 통전방식이며, 3상전파구동방식은 120도 통전방식과 180도 통전방식이 있다.

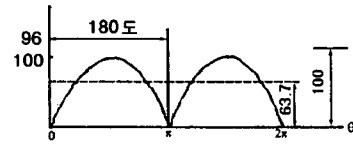
#### 2.3.3 구동원에 의한 분류

전류원과 스위칭소자를 사용해서 전동기를 구동하는 전류구동과 전압원에 의해 구동하는 전압구동으로 구분된다. 전류구동은 일반적으로 스위칭에 따른 임펄스 노이즈발생으로 시스템의 성능에 영향을 미칠 수 있으므로 전류구동을 사용할 경우 유의하여 사용하여야 한다. 이에 비하여 전압구동중 정현파구동은 원리적으로 토크리플이 0 이고 상대적으로 토크가 최대가 되나 센서의 감도차이와 회로의 게인차 및 오프셋 등에 의해 매우 어려운 구동방식이다.

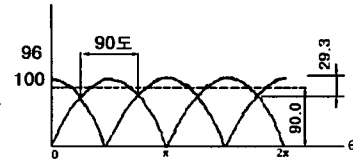
그림 3은 이와 같은 구동방식에 대한 전동기의 토크 파형을 나타낸 것이다.

#### 2.3.4 센서레스구동방식

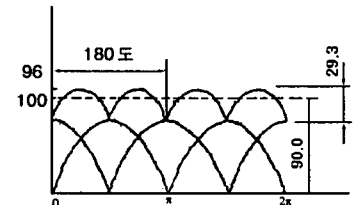
앞에서 언급한 구동방식은 기본적으로 자극의 위치를 검출할 수 있는 홀센서를 사용한 구동회로이다. 그러나 공간적 제약으로 센서를 설치하기 곤란한 박형 HDD 스핀들 모터 및 캠코더용 드럼모터와 온도가 높아서 홀센서의 사용이 어려운 콤프레서용 전동기 등에서는 홀센서를 사용하지 않는 센서레스구동이 이루어지고 있다. 그림 4는 일반적인 센서레스구동회로로써 기본적인 구동원리는 홀센서를 사용한 구동방식과 동일하나 회전자의 자극 검출신호로 고정자 코일의 역기전압신호가 사용되는 것이 차이점이다. 그러나 센서레스구동방식은 전동기가 기동시 역기전력신호가 없으므로 전동기가 회전할 수 없게 된다. 따라서 자기발전



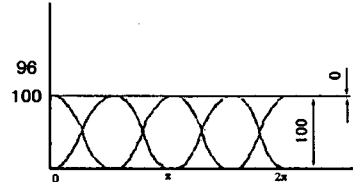
(a) 2상 유니폴라 180도 정전류구동



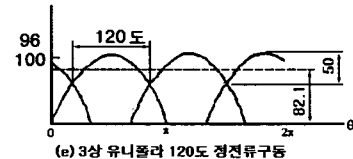
(b) 2상 바이폴라 90도 정전류구동



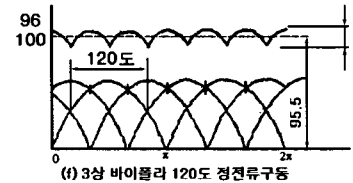
(c) 2상 바이폴라 180도 정전류구동



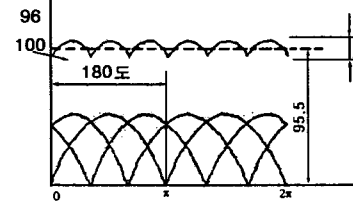
(d) 2상 바이폴라 정현파구동



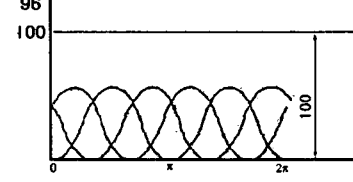
(e) 3상 유니폴라 120도 정전류구동



(f) 3상 바이폴라 120도 정전류구동



(g) 3상 바이폴라 180도 정전류구동



(h) 3상 바이폴라 정현파구동

· 그림 3. 구동방식과 토크파형

회로에 의해 코일에 임의로 전류를 인가함으로써 회전자에 움직이게 되며, 일정크기 이상의 역기전력신호가 발생되면 역기전력신호로부터 코일의 전류를 절환 공급하는 자기 동회로가 추가되어 있다. 센서레스구동회로를 사용할 경우 출력측 트랜지스터가 스위칭모드로 동작되므로 스위칭에 의한 노이즈제거 대책이 요구된다.

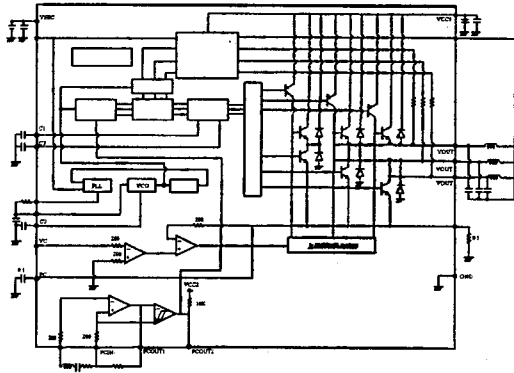


그림 4. 센서레스 구동회로

### 3. 제어회로

#### 3.1 제어회로의 종류

전동기 구동회로에서 구동회로의 제어부에 일정한 신호를 입력하여도 전동기자체의 특성에 의해 토크리플이 발생하며, 이 토크리플은 전동기의 속도변동의 주요인이 된다. 따라서 속도 정밀도가 요구되는 경우 전동기에서의 토크리플 최소화 이외에 별도로 전동기의 속도를 용도에 알맞게 제어할 필요가 있다. 속도제어를 위해서는 속도검출이 필요하며 DC 전동기에서는 유기전압을 속도신호로하는 제어방법이 사용되고 있다. 이러한 방법은 온도특성이나 제어성이 좋지 않으므로 회전속도를 주파수로 하여 검출하는 FG (Frequency Generator)를 사용한 속도제어 방법이 많이 사용되고 있다. 다음은 가장 일반적으로 사용되는 몇 가지의 제어회로에 대하여 소개하기로 한다.

##### 3.1.1 F/V서보

주파수 신호를 이것에 비례 또는 반비례하는 전압신호로 변환하는 방법으로서 단 안정멀티 바이브레이터를 사용하는 방법과 S/H(Sample and Hold)법, DAC(D/A Converter)에 의한 방법이 많이 사용된다. S/H법은 회로가 복잡하나 변환출력의 리플이 적고 필터의 시정수를 줄일 수 있으며, 제어성도 좋기 때문에 현재까지도 아날로그방식이 주류가 되고 있다. 그러나 변환특성이 회로부품의 시정수에 의존하기 때문에 부품의 오차와 온도특성으로 인해 F/V 변환특성이 변화하게 되는 단점을 갖고 있다. 그림 5는 일반적인 F/V서보에 대한 블록 다이어그램을 나타낸 것이다.

##### 3.1.2 PLL서보

수정진동자의 발진주파수는 온도, 습도, 시간 기타 환경조건에 대해 매우 안정적이므로 전동기의 속도를 온도, 부하변동, 시간 등에 대해서도 아주 정밀하게 제어하기 위해서 PLL서보를 채택하고 있다. PLL서보는 회로의 복잡함, 부품의 수, 공간, 가격 면에서 단점을 가지므로 전용 IC화가 필요하다. 안정적인 제어를 실현하기 위해 속도루프와 위상을 병용하는 것이 일반적이며 전용 IC가 개발되면서 많이 사용되고 있다. 그림 6은 대표적인 PLL서보회로를 나타낸 것이다. 이상에서 소개한 것은 아날로그서보에 관한 것이며, 디지털서보로서 마이콤을 이용한 마이콤서보가 있다.

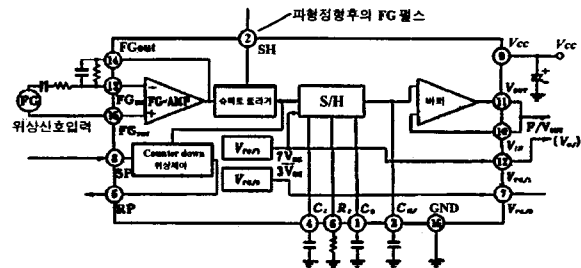


그림 5. F/V 서보회로

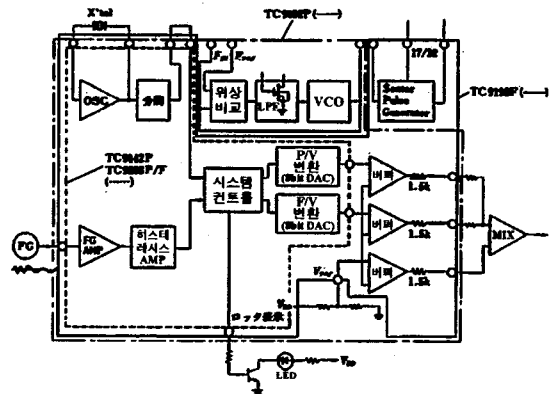


그림 6. PLL서보회로

### 3.2 브리시레스DC모터의 회전수 제어

브리시레스 DC모터의 회전수 제어방식으로는 전압, 전압 및 펄스방식이 있고, 사용되는 기기의 요구특성에 맞게 선택할 수 있으며, 다음은 각각의 특성 및 동작상태를 언급한다.

#### 3.2.1 전압제어방식

그림 7은 3상 전파 구동방식에서 전압제어방식을 사용한 회로이다. 출력단의 6개 트랜지스터는 앞에서 설명한 구동

원리에 의해 싱크측 트랜지스터 1개와 소스측 트랜지스터 1개가 On상태가 되며, 전압제어방식의 경우 스위칭모드에서 동작한다. 그러므로 전동기 코일을 구동하는 전압  $V_M$ 은 전동기가 필요로 하는 토크회전수에 의해 결정된다. 코일 양단의 전압을  $V_{LR}$ 이라 하면,  $V_M$ 은 식 (6)으로된다.

$$V_M = V_{CE}(SAT)U + V_{CE}(SAT)L + V_R \quad (6)$$

이때의 회전수에 의해 얻어지는 역기전압을 고려한  $V_{LR}$ 을 선택하여야 한다. 따라서, 필요한 회전수에 맞게 제어하기 위해  $V_M$ 을 적절히 변화시킨다. 이 경우 속도제어를 위해서는 전동기로부터 입력되는 회전검출 신호(FG)가 사용되어 제어회로에서 설명한 F/V서보회로 혹은 PLL서보회로를 통해 출력된 신호가 전압으로 변환되어  $V_M$ 으로 입력되는 것이다.

### 3.2.2 전류제어방식

그림 8은 3상 전파 구동방식에서 전류제어방식을 사용한 회로를 나타낸 것이다. 제어신호입력과 귀환단자가 있다는 것과 코일구동 전원단자  $V_M$ 이 없는 것이 전압제어방식과 상이한 점이다. 이때  $V_M$ 은  $V_s$ 와  $V_{cc}$ 가 동일전원으로 사용되는 것이 일반적이거나 실제로는  $V_M$ 이 별도의 전원으로 사용되는 경우도 있다.

전압제어방식과 달리 소스측 트랜지스터는 완전히 스위칭 모드로 동작하지만, 싱크측 트랜지스터는 정전류 영역에서 동작한다. 이때 회전수 제어를 위해서는 정전류 영역에서 동작하는 트랜지스터의 콜렉터, 에미터간의 전압을 변화시키는 것으로서 코일의 전류를 귀환저항  $R_{NF}$ 에 따라 전압을 변환하여 이 출력과 FG신호에 따른 제어회로의 출력신호를 비교하여 피드백 루프를 만든다. 양신호의 비교출력은 드라이버 출력의 정전류 동작을 하는 측의 트랜지스터의 드라이브전류를 제어하여 이 콜렉터, 에미터간의 전압을 변화하여 전동기의 구동 코일에 걸리는 전압을 제어한다.

### 3.2.3 펄스제어방식

그림 9 및 그림 10은 3상 전파구동방식에서 펄스구동방식의 대표적인 PWM방식을 나타낸 것이다. 그림 9는 프리드라이버와 파워모듈을 사용한 구동회로에서 프리드라이버의 출력단을 PWM제어하는 방식으로 코일을 펄스구동함으로써 코일의 역기전압의 처리가 문제되지만, 플라이휠 다이오드, 고내압파워트랜지스터 모듈의 사용에 의해 고신뢰성을 갖는 간단한 회로구성이 가능하도록 되어 있다.

그림 10에 있어서는 전류구동방식의 드라이브 IC의 귀환단자를 직접 GND로 하고 제어입력에 PWM신호를 입력시킨 회로이다. 이 방식은 전류구동방식이나 완전한 스위칭구동을 하게 된다.

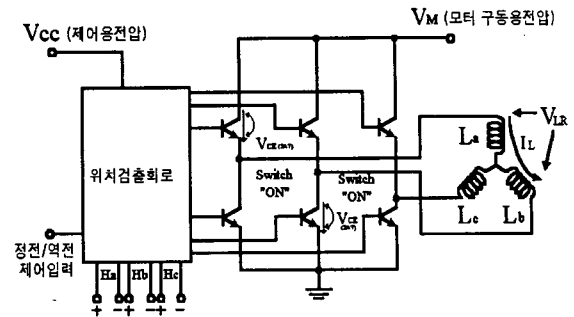


그림 7. 전압제어방식

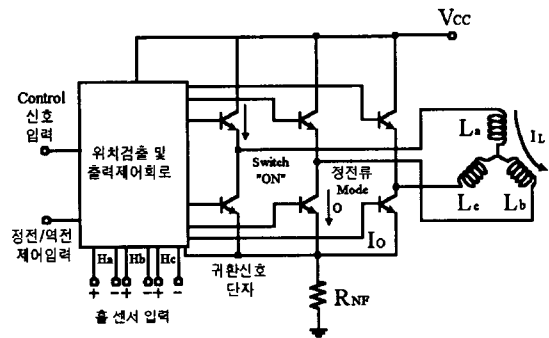


그림 8. 전류제어방식

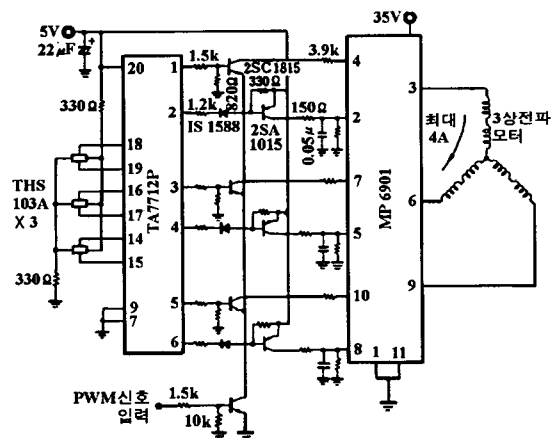


그림 9. PWM 제어방식(1)

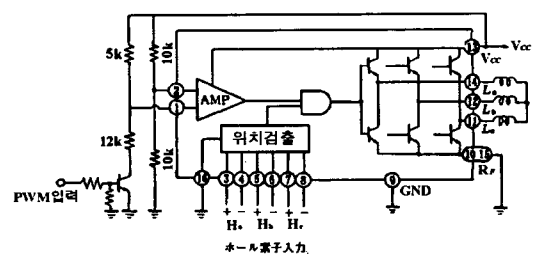


그림 10. PWM 제어방식(2)

#### 4. 결 론

본고에서는 브러시리스DC모터의 기본특성, 구동회로 및 제어회로에 대하여 간단히 소개하였다. 앞으로 브러시리스 DC모터의 소형화 및 고효율을 실현하기 위해서 마그네트 및 코어 등 핵심소재의 고성능화에 대한 기술개발이 절실히 요구된다. 또한 소비전력을 극소화하기 위해서는 보다 높은 전압에서 구동이 가능하고 고전압구동에 따른 회로적인 안전성과 손실, 노이즈의 최소화를 실현할 수 있는 인버터회로의 개발 및 제어기술의 개발이 계속되어야 할 것으로 판단된다. 브러시리스 DC모터는 기존의 전동기에 비하여 고효율이 가능하나 기존의 전동기와 동등한 수준의 가격

경쟁력을 가지기 위하여 기술개발의 여지가 많이 남아 있다. 따라서 국내에서도 선진국과의 기술경쟁력을 높이기 위하여 고성능, 고효율의 브러시리스DC모터개발을 위한 적극적인 연구개발이 필요할 것이다.

### 저 자 소 개



**황병창(黃炳昌)**

1959년 11월 27일생. 1985년 경북대학교 전자공학과 졸업. 현재 LG정밀(주) 정밀기구 OBU 모터팀 책임연구원 재직중