

Tech Web Hand Book

Brush DC 모터와 구동 방법의 기초

— 목차 —

서론	1
1. Brush DC 모터란?	1
1-1. 구조	1
1-2. 회전 원리	2
1-3. 발전 원리	3
1-4. 쇼트 브레이크	4
1-5. 기본 특성	4
2. H-bridge 회로에 의한 Brush DC 모터의 구동	5
2-1. H-bridge 회로란?	5
2-1-1. 실제의 H-bridge 회로 예	6
2-1-2. 실제의 구동 회로 구성 예	6
2-1-3. 출력 상태의 전환	7
2-2. High-side 전압 리니어 제어	8
3. BTL 앰프 회로에 의한 Brush DC 모터의 구동	9
3-1. 리니어 전압 구동	9
3-2. 리니어 전류 구동	10
4. PWM 출력에 의한 Brush DC 모터의 구동	11
4-1. PWM 구동이란?	11
4-1-1. 전류 회생 방법	12
4-1-2. 손실의 개념	14
4-1-3. 주의점	15
4-2. H-bridge PWM 구동	16
4-3. H-bridge PWM 정전류 구동	17
4-4. BTL 앰프 입력 형식 PWM 구동	18
5. 1 스위치 회로 구동	19
6. Half-bridge 회로에 의한 구동	19
7. 정리	21
• Brush DC 모터의 구동 회로와 특징	21
• Brush DC 모터의 특징	21
• Brush DC 모터의 용도 예	22
개정 이력	23
주의 사항	24

서론

Brush DC 모터는 가장 범용적인 모터로, 완구나 모형에서 산업기기에 이르기까지, 매우 많은 어플리케이션에 사용되고 있습니다.

본 핸드북에서는 Brush DC 모터와 구동 방법의 기초로서, 구조, 동작 원리, 특성, 구동 방법에 대해 설명하겠습니다.

1. Brush DC 모터란?

그림 1은 Brush DC 모터의 외관으로, 모형 등에 많이 사용되는 타입입니다. 이러한 외관을 염두에 두고, 구조 및 동작 원리 등에 대해 설명하겠습니다.



그림 1. Brush DC 모터의 외관 예

※이미지 출처

Photo P15_1 : <http://item.rakuten.co.jp/robotshop/> ROBOT SHOP

Photo P15_2 : <http://blog.joshinweb.jp/joshinvariety/> Game / Hobby Play and Fight Club

1-1. 구조

그림 2는 일반적인 2극 (2개의 자석), 3슬롯 (3개의 코일) 타입의 Brush DC 모터를 분해하여, 각 부분 설명한 이미지입니다.

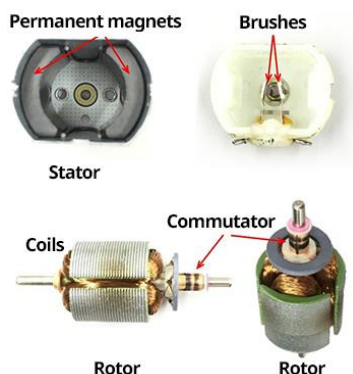


그림 2. Brush DC 모터의 구조

영구 자석은 고정되어 있고, 코일이 내부 중심에서 회전하는 구조입니다. 고정된 축을 Stator, 회전하는 축을 Rotor 라고 합니다.

그림 3과 그림 4는 구조 개념을 나타낸 구조도입니다.

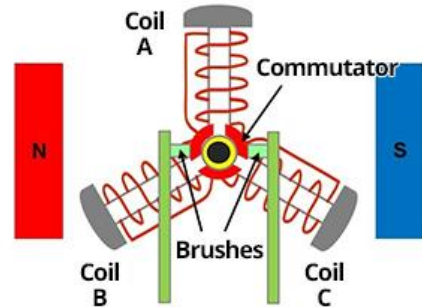


그림 3. Brush DC 모터의 내부 구조도

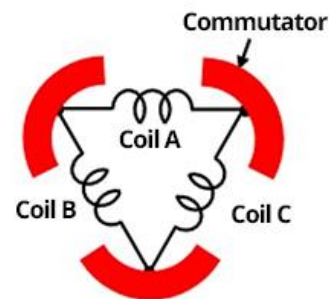


그림 4. Brush DC 모터의 정류자와 코일 접속 등가 회로

회전의 중심이 되는 축 주위에 3개의 정류자 (Commutator / 전류 전환용 만곡 금속편)가 있습니다. 정류자는 서로 접촉하지 않도록 120° 간격으로 ($360^\circ \div 3$ 개) 배치됩니다. 정류자는 축의 회전에 따라 회전합니다.

1개의 정류자는 1개의 코일 끝과 다른 1개의 코일 끝에 접속되며, 3개의 정류자와 3개의 코일은 회로망으로서, 도넛 모양의 구조를 형성합니다 (그림 4 참조).

2개의 Brush (그림 3. Brush DC 모터 내부 구조도 참조)는 0°와 180°의 위치에 고정되어 있으며, 정류자와 접촉하도록 배치되어 있습니다. Brush에는 외부의 DC 전원이 접속되어, Brush → 정류자 → 코일 → Brush의 경로로 전류가 흐릅니다.

<정리>

- Brush DC 모터에는 명칭과 같이 Brush 라고 불리는 전극이 존재한다.
- 구조는 Stator, Rotor 로 구성되며, Stator 에는 자석, Rotor 에는 코일과 정류자가 포함된다.

1-2. 회전 원리

그림 5 를 사용하여, Brush DC 모터가 회전하는 원리에 대해 설명하겠습니다.

①초기 상태에서 반시계 방향으로 회전

코일 A 가 가장 위쪽에 위치한 상태에서, Brush 에 전원을 접속시켜 왼쪽을 (+), 오른쪽을 (-)로 설정합니다. 이때 정류자를 통해 왼쪽 Brush 에서 코일 A 로 큰 전류가 흐릅니다. 이는, 코일 A 의 상부 (외측)가 S 극이 되는 구조입니다.

반면, 왼쪽 Brush 에서 코일 B 와 코일 C 로, 코일 A 의 1/2 에 해당하는 전류가 코일 A 와 반대 방향으로 흐르기 때문에, 코일 B 와 코일 C 의 외측은 약한 N 극 (그림에서는 작은 글자로 표현)이 됩니다.

이러한 코일에 발생한 자계와 자석의 반발과 흡인에 의해, 코일은 반시계 방향으로 회전하는 힘을 받게 됩니다.

②다시 반시계 방향으로 회전

다음으로, 코일 A 가 반시계 방향으로 30° 이동한 상태에서, 오른쪽 Brush 가 2 개의 정류자에 접촉하고 있다고 가정할 때, 코일 A 는 왼쪽 Brush 에서 오른쪽 Brush 를 통해 전류가 계속 흘러, 코일 외측은 S 극을 유지합니다.

코일 B 에는 코일 A 와 같은 양의 전류가 흘러, 코일 B 의 외측은 강한 N 극이 됩니다. 코일 C 는 코일의 양끝이 Brush 에 의해 단락 상태가 되므로, 전류가 흐르지 않아 자계가 발생하지 않습니다.

이러한 조건으로도 반시계 방향으로 회전하는 힘을 받게 됩니다.

③, ④ 위쪽의 코일은 왼쪽으로, 아래쪽의 코일은 오른쪽으로 움직이는 힘을 연속적으로 받아, 반시계 방향으로 계속 회전

다시 30° 씩 ③과 ④의 상태로 회전하는 경우, 중앙의 수평축보다 코일이 위쪽에 위치하면 코일의 외측은 S 극이 되고, 아래쪽에 위치하면 N 극이 되는 것을 반복합니다.

즉, 위쪽 코일은 왼쪽으로, 아래쪽 코일은 오른쪽으로 (모두 반시계 방향) 움직이는 힘을 반복적으로 받게 되며 이에 따라, Rotor 는 항상 반시계 방향으로 회전합니다.

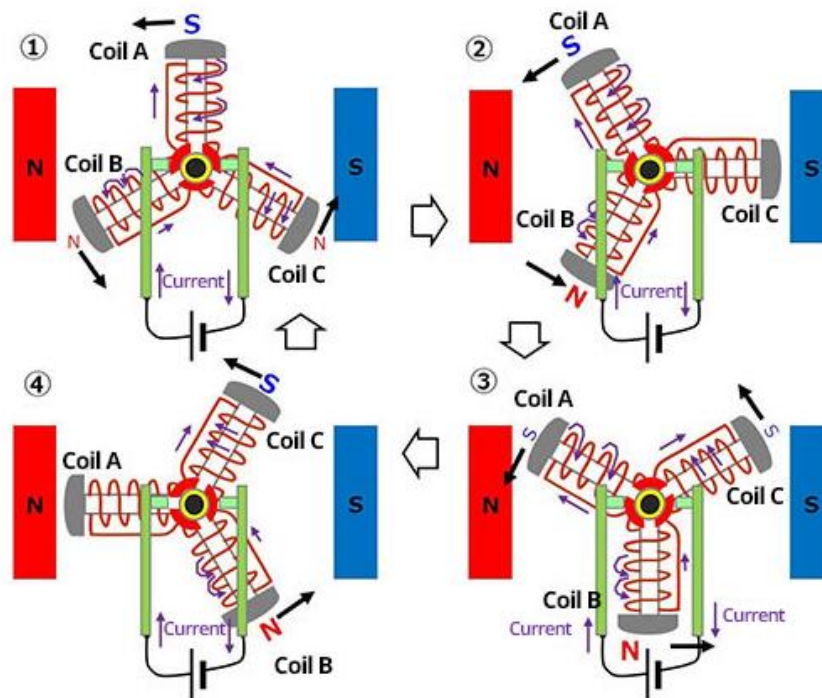


그림 5. Brush DC 모터의 회전 원리 모식도

전원의 접속을 반대로 하여 왼쪽 Brush (-), 오른쪽 Brush (+)가 되면, 코일에 발생하는 자계도 반대가 되므로, 코일에 인가되는 힘의 방향이 반대가 되어 시계 방향으로 회전하게 됩니다.

또한, 전원을 분리하면 회전을 계속하는 자계의 발생이 없어지므로 Rotor 는 정지됩니다.

<정리>

- Brush DC 모터는 Brush 와 정류자의 접속 상태, 전류와 자계의 발생, 고정 자석과 코일 외측의 극성 관계에서, 코일이 연속하여 같은 방향으로 이동함으로써 Rotor 가 회전한다.

1-3. 발전 원리

모터는 전자 유도를 통해, 기계적 에너지 (운동)를 전기 에너지로 변환할 수 있습니다. 이것이 모터의 발전 작용으로, 회전 동작과 마찬가지로 전류와 자계의 힘에 관한 법칙을 바탕으로 합니다. 여기에서는 그림 6 의 Brush DC 모터 모식도를 사용하여, 실제 발전 원리에 대해 설명하겠습니다.

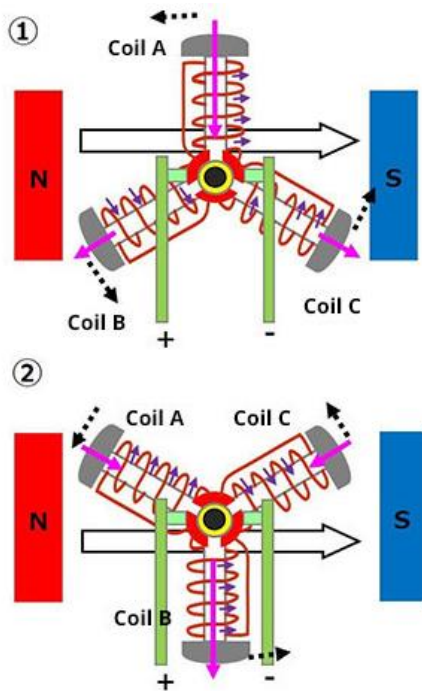


그림 6. Brush DC 모터의 발전 원리 모식도

Brush 에 전원이 연결되지 않은 상태에서, 코일 (Rotor)이 반시계 방향으로 회전한다고 가정할 때, 현실적인 예로는 회전하고 있는 모터의 전원을 차단한 후에도 타성으로 인해 Rotor 가 회전하는 경우가 있습니다.

①의 상태에서 **코일 A** 는 자석 N 과 S 의 중간에 위치합니다. 자석에 의한 자계가 N에서 S로 향하고 있고, 반시계 방향의 회전에 따라 코일 A는 자석 N에 가까워지므로, 회전축으로 향하는 자속의 변화는 (+)로 최대치가 됩니다 (분홍색 화살표). 이에 따라, 코일 A에는 회전축에서 외측으로 전류 (보라색 화살표)를 흘리는 기전력이 발생합니다.

코일 B 는 자석 N에서 멀어지고, **코일 C** 는 자석 S에 가까워지므로 자속의 변화는 (-)가 되며 (분홍색 화살표), 위치가 자석에 가까워 자속의 변화치는 최대치보다 작은 값이 됩니다. 이에 따라, 코일 B, C에는 외측에서 회전축으로 전류 (보라색 화살표)를 흘리는 기전력이 발생합니다.

이때의 **코일 A, B, C**의 기전력을 합하면, **왼쪽 Brush**에는 **오른쪽의 Brush**에 대해 (+) 전압이 발생합니다.

②의 상태가 되었을 때, **코일 B** 는 자석 N과 S의 중간에 위치하고, S에 가까워지므로 자속의 변화가 (-)로 최대치가 됩니다. 이에 따라, 코일 B에는 외측에서 회전축으로 전류를 흘리는 기전력이 발생합니다.

코일 A 는 자석 N에 가까워지고, **코일 C** 는 자석 S에서 멀어지므로 자속의 변화는 (+)가 되며, 위치가 자석에 가까워 최대치보다 작은 값이 됩니다. 이에 따라, 코일 B, C에는 회전축에서 외측으로 전류를 흘리는 기전력이 발생합니다.

이때의 **코일 A, B, C**의 기전력을 합하면, **왼쪽 Brush**에는 **오른쪽 Brush**에 대해 (+) 전압이 발생합니다.

이와 같이, 코일 (Rotor)이 반시계 방향으로 회전하면, 항상 오른쪽 Brush에 대해 왼쪽 Brush에 (+) 전압이 발생합니다. 코일이 시계 방향으로 회전하는 경우에는 반대 동작에 따라 오른쪽 Brush에 (+) 전압이 발생합니다. 발생한 전압은 정류자에 의해 정류되어 직류 전압이 되며, 발전 전압은 회전수가 클수록 높아집니다.

1-4. 쇼트 브레이크

Brush DC 모터에서는 전원 차단 후 타성으로 회전하는 Rotor 를 빠르게 멈추기 위해, Brush 와 Brush 를 쇼트 (단락)시키는 방법을 사용하는 경우가 있습니다. 그림 7 을 통해 이러한 동작에 대해 설명하겠습니다.

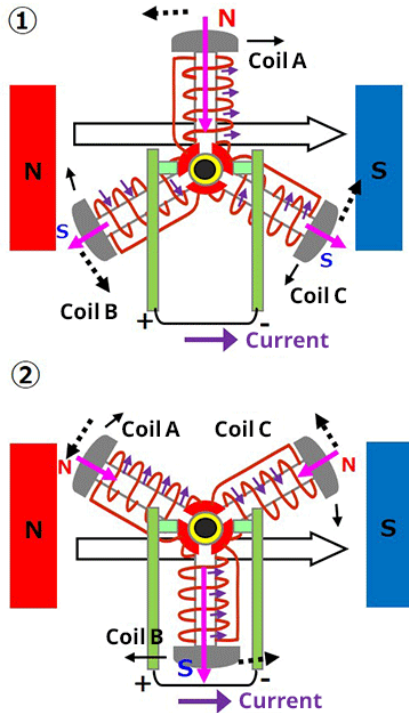


그림 7. Brush DC 모터의 쇼트 브레이크 모식도

Brush 가 전원에서 분리된 후 코일 (Rotor)이 아직 반시계 방향으로 회전하는 상태에서 Brush와 Brush 를 쇼트시킵니다.

발전 원리에서 설명한 바와 같이, ①의 상태에서 왼쪽 Brush 에는 오른쪽 Brush 에 대해 (+)의 기전압이 발생하므로, Brush 와 Brush 가 단락되어 전류가 흐릅니다. 이에 따라, 코일 A 의 외측은 N 이 되고 코일 B, C 의 외측은 S 가 됩니다.

②의 상태로 바뀐 경우도 마찬가지로 전류가 흘러, 코일 B 의 외측은 S, 코일 A, C 의 외측은 N 이 됩니다.

이와 같이, Brush 와 Brush 를 쇼트하면 이때의 회전 방향과 반대의 회전력이 발생하여 (검정색 실선 화살표), 원래의 회전을 멈추는 브레이크 동작을 합니다. 이를 쇼트 브레이크라고 합니다.

회전을 멈추려 하는 힘은 흐르는 전류가 많을수록 크므로, 회전수가 큰 경우에는 강한 브레이크가 걸리지만, 회전수가 적어질수록 약해지고, 회전이 정지하면 zero 가 됩니다.

1-5. 기본 특성

모터는 전원전압을 인가하면 전류가 흘러 회전합니다. 전원전압, 회전수, 토크와 같은 특성은 각각 연관되어 있습니다. 그림 8 의 Brush DC 모터의 등가 회로도와 식을 사용하여 설명하겠습니다.

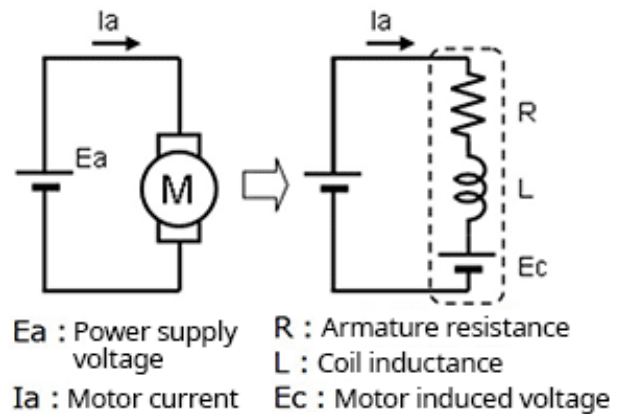


그림 8. Brush DC 모터의 등가 회로

● 폐회로의 DC 관계식 : $E_a = R \times I_a + E_c$

* E_a : 전원전압, R : 전기자 저항, I_a : 모터 전류
 E_c : 모터의 유기전압

전원전압 E_a 는 전기자 저항 R 과 모터 전류 I_a 을 곱한 값에 유기전압 E_c 를 더한 값입니다. 전기자 저항은 권선이나 철심의 저항 성분입니다. 저항×전류가 전압이 되는 것은 옴 (Ω)의 법칙입니다. 유기전압은 모터가 회전하여 발생하는 전압 (발전)으로, 추가 전압이 됩니다.

● 모터의 유기전압 : $E_c = K_e \times N$

* E_c : 모터의 유기전압, K_e : 발전 정수, N : 회전수

모터의 유기전압 E_c 는 발전 정수 K_e 에 회전수 N 을 곱한 값이므로, 모터의 유기전압은 회전수에 비례합니다.

● 모터 토크 : $T = K_t \times I_a$

* T : 토크, K_t : 토크 정수, I_a : 모터 전류

모터의 토크 T는 토크 정수 Kt에 모터 전류 Ia를 곱한 값이므로, 모터의 토크는 전류에 비례합니다.

● 회전수와 토크의 관계 : $N = \frac{E_a}{K_e} - \frac{R}{K_e \times K_t} \times T$

앞에서 설명한 바와 같이, 모터의 유기전압과 토크의 식을 정리하여, 회전수 N과 토크 T의 관계를 나타냈습니다. Ke와 Kt는 정수이므로, 1) 토크 T가 증가되면 회전수 N은 일정치로 저하, 2) 토크 T가 일정한 경우에는 전원전압 Ea에 비례하여 회전수 N이 상승하는 것을 알 수 있습니다.

상기 관계를 그림 9에 정리하였습니다. 토크-회전수 (T-N) 특성은, 토크가 증가되면 회전수가 일정치로 저하, 즉 반비례합니다. 또한, 전원전압을 높이면 모터에 인가되는 전압이 커지므로, 회전수는 상승합니다. 회전수가 zero일 때, 최대 토크가 발생합니다.

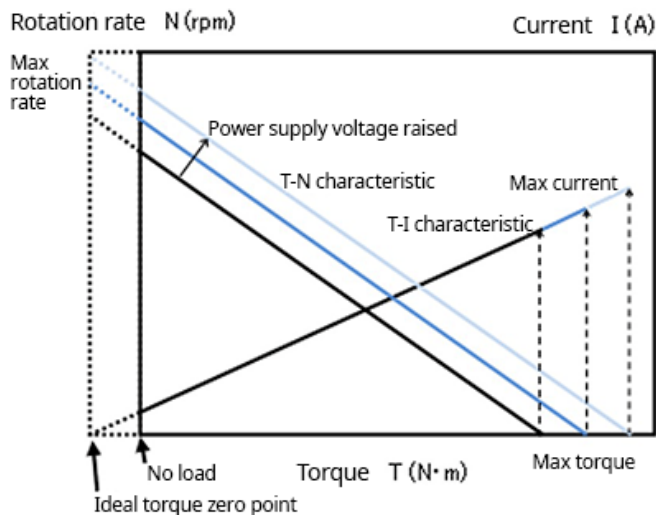


그림 9. Brush DC 모터의 T-N / T-I 특성

토크 전류 (T-I) 특성은, 토크가 증가되면 모터 전류는 일정하게 증가, 즉 비례합니다. 최대 토크 시 = 회전수 zero일 때, 모터 전류는 최대가 됩니다.

모터를 구동하는 경우 이러한 관계를 바탕으로 구동 조건을 고려해야 합니다.

● 모터 파라미터의 단위

앞서 언급한 모터 파라미터의 일반적인 단위계는 다음과

같습니다.

회전수 N : min-1, rpm, rad/s

토크 T : N · m

발전 정수 Ke : V · s/rad, V/rpm

토크 정수 Kt : N · m/A

여러 단위계를 가지는 파라미터가 있지만, 전기 에너지를 기계 에너지로 변환하는 경우의 단위계로는 굵은 글씨로 표시한 N · m, rad/s, V · s/rad로 통일할 필요가 있습니다.

<정리>

- 토크가 증가되면 회전수가 일정하게 저하된다.
- 전원전압을 높이면 회전수는 상승한다.
- 토크가 증가되면 모터 전류는 일정하게 증가한다.
- 최대 토크 시 = 회전수 zero 시 = 모터 전류 최대.

2. H-bridge 회로에 의한 Brush DC 모터의 구동

이제, H-bridge 회로에 의한 Brush DC 모터의 구동 방법에 대해 설명하겠습니다.

2-1. H-bridge 회로란?

기본적으로 Brush DC 모터는 2개의 전원 단자가 있으며, 이 2개의 단자에 전압을 인가하면 모터가 구동합니다. 단자 2개의 접속 조합은 하기와 같습니다.

- ① 2개의 단자를 각각 어디에도 접속하지 않는다 (한쪽은 접속하고, 다른 한쪽은 접속하지 않는 경우도 동일).
- ② 한쪽 단자에 DC 전원의 (+), 다른 한쪽에 (-)를 접속한다.
- ③ DC 전원을 ②와 반대의 극성으로 모터에 접속한다.
- ④ 2개의 단자끼리 접속한다.

이러한 4종류의 상태는, 4개의 스위치를 사용한 그림 10의 회로로 실현할 수 있습니다. 회로의 형상이 알파벳 「H」와 비슷하여, H-bridge 회로라고 부릅니다. 또한, Full-bridge 회로라고 부르는 경우도 있습니다. 회로의 번호는 상기의 단자 접속 조합 번호에 해당됩니다.

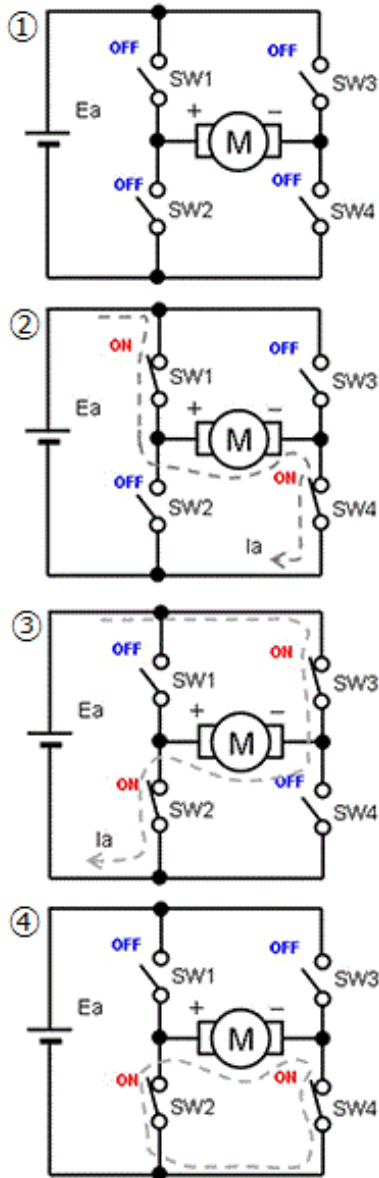


그림 10. H-bridge 회로에 의한 4 가지 상태

①의 전원 단자가 어디에도 접속하지 않은 상태는, SW1~SW4 가 모두 OFF 일 때입니다.

②의 한쪽 단자에 DC 전원의 (+), 다른 한쪽에 (-)를 접속하기 위해서는 SW1, SW4 를 ON, SW2, SW3 을 OFF 합니다. 이에 따라, 모터는 특정 방향으로 회전합니다.

③은 ②와 반대로 접속합니다. SW1, SW4 를 OFF, SW2, SW3 을 ON 하면 ②와는 반대 방향으로 회전합니다.

④는 전원 단자간 접속입니다. SW1, SW3 을 OFF, SW2, SW4 를 ON 하면 단자간 접속 상태가 됩니다.

2-1-1. 실제의 H-bridge 회로 예

그림 10에서는 접속의 조합을 알기 쉽게 설명하기 위해 스위치를 사용했지만, 실제의 전자 회로에서는 4 개의 스위치로 반도체인 파워 트랜지스터를 사용합니다. 그림 11 은 실제의 H-bridge 회로입니다. 이 회로에서는 전원의 (+)측 트랜지스터 (Q1, Q3)에 Pch MOSFET, (-)측 트랜지스터 (Q2, Q4)에 Nch MOSFET 를 사용하였습니다.

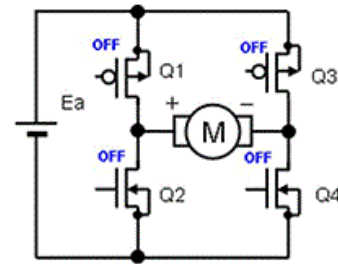


그림 11. 트랜지스터를 사용한 실제의 H-bridge 회로

2-1-2. 실제의 구동 회로 구성 예

모터의 회전수를 변화시키기 위해서는 모터에 인가하는 전압을 변화시켜야 합니다. 이를 위해, 전원과 모터 사이에 전압 제어 회로를 삽입하여 직접 또는 간접적으로 모터에 인가되는 전압을 제어합니다. (-)측은 직접 모터에 연결하는 방법과 제어 회로를 삽입하여 (-)측도 제어하는 방법이 있습니다. 실제의 구동 회로는 접속을 변경하는 H-bridge 회로와 전압 제어 회로를 조합하여 구성합니다 (그림 12 참조).

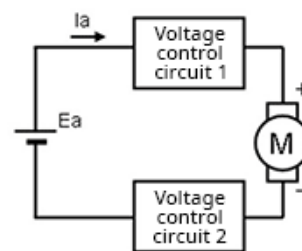


그림 12. 실제의 H-bridge 구동 회로 구성 예

<정리>

- H-bridge 회로는 모터의 접속 상태를 변경하기 위한 회로.

- 4 개의 스위치 (트랜지스터)를 사용하여 4 종류 접속 상태의 전환을 실행한다.
- 실제의 Brush DC 모터의 구동 회로는 H-bridge 회로와 전압 제어 회로의 조합으로 구성된다.

2-1-3. 출력 상태의 전환

앞서 설명한 바와 같이, 모터의 2 개의 단자에 전압을 인가할 때의 접속 조합은 4 종류입니다. 이러한 4 종류의 상태는 2 값 입력이 2 개 있으면, 이를 조합하여 만들 수 있습니다. 간단한 예로, 로직 입력 단자가 2 개인 경우, $2^2=4$ 종류의 조합을 얻을 수 있습니다. 그림 13 은 H-bridge 회로를 탑재한 Brush DC 모터 드라이버의 예로, 개략적인 내부 기능 블록을 나타낸 것입니다.

H-bridge 의 상태를 전환하기 위한 로직 회로는, IN1 과 IN2 를 입력으로 하는 점선으로 표시한 블록입니다. 이러한 로직 회로의 진리표는 표 1 과 같습니다.

IN		VG				OUT		접속 상태
1	2	Q1	Q2	Q3	Q4	1	2	
L	L	H	L	H	L	OPEN		①
L	H	H	H	L	L	L	H	② 또는 ③
H	L	L	L	H	H	H	L	③ 또는 ②
H	H	H	H	H	H	L	L	④

표 1 . 그림 13 로직 회로의 진리표

표를 통해, IN 의 입력 로직에 대한 VG 의 상태를 알 수

있습니다. VG 는 Q1~Q4 의 각 MOSFET 의 게이트 전압 상태입니다. 예를 들어, Q1 의 VG 가 H 인 것은 H 레벨의 전압이 인가되어 있음을 의미하며, Q1 의 ON / OFF 를 직접적으로 나타내는 것은 아니므로 주의하여 주십시오.

이 H-bridge 는 Pch MOSFET (Q1, Q3)와 Nch MOSFET 의 조합으로 구성되어 있습니다. High-side 가 Pch, Low-side 가 Nch 의 페어 (Q1 과 Q2, Q3 과 Q4)로, 각 드레인과 소스가 결선되어 OUT1 (Q1 과 Q2의 페어)과 OUT2 (Q3 과 Q4 의 페어)의 출력이 됩니다.

블록도에서 알 수 있듯이, Pch 의 Q1 과 Q3 은 게이트에 Active L 의 기호가 있으므로, VG 가 L 일 때 ON 됩니다. Q2 와 Q4 는 Active H 으므로, VG 가 H 일 때 ON 됩니다. 이것만 보면 CMOS 인버터 로직 회로와 동일하지만, 게이트는 IN1, IN2 에 의해 개별적으로 제어됩니다.

OUT 은 필요한 4 종류의 상태를 만드는 것에 대응합니다. OPEN 은 모든 MOSFET 가 OFF 로, 높은 임피던스 상태를 의미합니다. L 은 MOSFET 를 통해 GND 에 접속, H 는 모터 전원 VM 에 접속하는 것을 의미합니다.

기능 블록에 기재되어 있는 레벨 시프트와 동시 ON 방지 기능은 H-bridge 의 제어 로직에는 직접적인 관련이 없지만, 하드웨어 제어를 위해 필요한 기능의 예입니다.

레벨 시프트는 저전압 로직 회로의 출력전압을 고전압 MOSFET 의 구동에 대응하도록 변환하는 회로입니다. 로직 회로부는 일반적인 3.3V 나 2.5V 의 로직 레벨에서

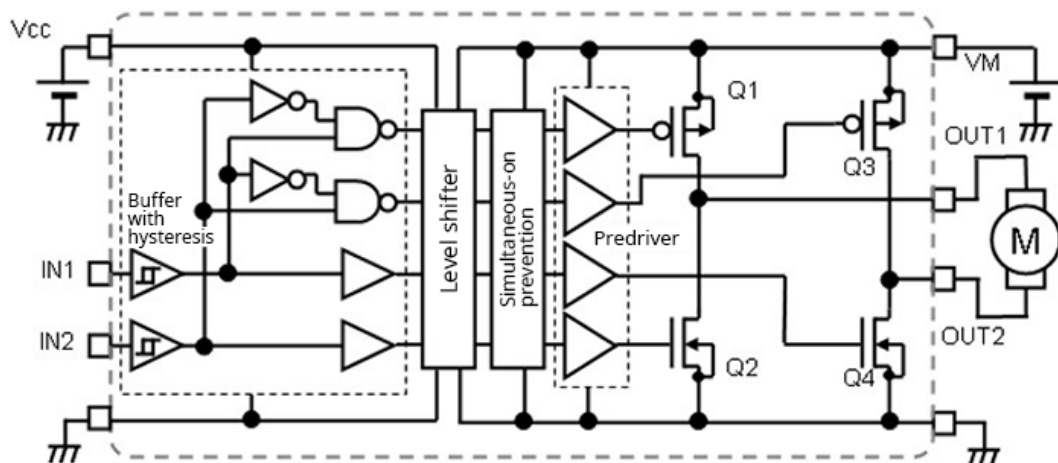


그림 13. H-bridge 회로를 탑재한 Brush DC 모터 드라이버의 예

동작하도록 설계되어 있지만, H-bridge 부는 모터의 구동 전압인 5V, 12V, 24V 등의 높은 전압에서 동작하기 때문에, 저전압 로직의 출력 레벨 자체로는 구동할 수 없으므로, 레벨 시프트 회로가 필요합니다.

동시 ON 방지 기능은, High-side 트랜지스터와 Low-side 트랜지스터의 ON / OFF 전환 시, 양쪽 트랜지스터의 ON 상태가 오버랩되는 순간이 존재할 수 있기 때문에, 이를 방지하는 기능입니다. 이는 로직에서의 전환 시 미세한 타이밍에 기인하는 현상입니다. 동기정류 스위칭 전원에서는, Shoot-Through 라는 명칭을 사용하기도 하며, ON 상태가 오버랩되는 순간 전원에서 GND로 관통 전류가 흘러, 스위칭 트랜지스터나 IC가 파괴될 위험성이 있는 현상입니다.

정리하자면, H-bridge 회로에 의한 4 종류의 상태를 얻기 위해 2bit 로직 입력을 이용하는 것이 포인트입니다.

<정리>

- H-bridge 회로의 4 종류 접속 상태의 전환은 2bit 로직으로 실행할 수 있다.
- 실제 Brush DC 모터 드라이브 IC에는 H-bridge와 제어 로직 회로 외에, 레벨 시프트나 동시 ON 방지 기능이 포함되는 제품이 많다.

2-2. High-side 전압 리니어 제어

그림 14의 예는 High-side의 Pch MOSFET를 리니어

제어함으로써, OUT 단자의 H 전압을 가변하여 모터에 인가되는 전압을 제어할 수 있습니다. OUT 단자의 H 전압은 Vref 단자에 인가되는 DC 전압에 의해 제어됩니다. 이론상의 전압은 Vref에 인가되는 전압과 동일해집니다. 이에 따라, 모터의 회전수 및 토크를 제어할 수 있습니다.

이 예에서는 H-bridge 전환 제어 로직으로 High-side MOSFET (Q1, Q3)를 ON 하는 경우, OP Amp가 High-side MOSFET의 게이트에 바이어스를 인가하여 MOSFET를 ON하고, MOSFET의 드레인 전압은 OP Amp의 비반전 입력에 피드백됩니다. OP Amp 피드백 회로의 원칙에 입각하여, 반전 입력과 비반전 입력의 전압이 동등해지도록 피드백 제어를 실시합니다. 이 예에서는, Vref 단자에 인가된 전압 = OP Amp의 반전 단자의 전압이, OP Amp의 비반전 단자 = MOSFET의 드레인 전압 = OUT 단자의 H 전압과 동등해집니다. 이 피드백 회로의 게인은 +1이므로, Vref와 OUT의 전압비도 1:1입니다.

비반전 단자에 피드백하는 회로에 위화감을 느끼실 수도 있지만, Pch MOSFET가 Active L이므로 OP Amp 출력의 반전 전압이 피드백되기 때문입니다. PNP 트랜지스터를 부스터로 사용하는 피드백 회로와 동일한 이미지입니다.

H-bridge 제어 회로의 동작은 「2-1-3. 출력 상태의 전환」에서 설명한 내용과 같습니다.

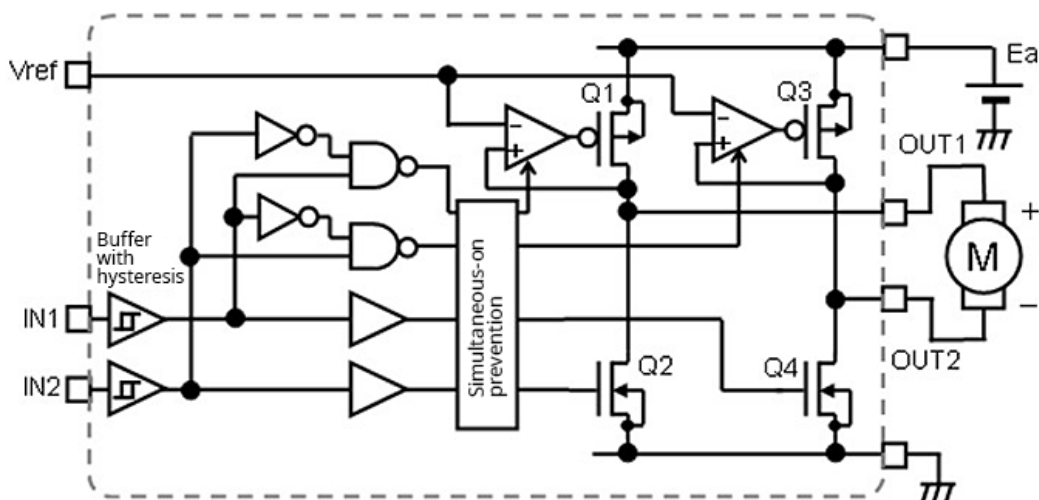


그림 14. H-bridge 회로에 의한 High-side 전압 리니어 제어 모터 드라이버의 예

<정리>

- H-bridge 회로의 High-side 전압을 리니어 제어할 수 있는 회로 구성.
- OUT 단자의 H 전압을 제어함으로써, 모터의 회전수 및 토크의 리니어 제어가 가능해진다.

3. BTL 앰프 회로에 의한 Brush DC 모터의 구동

BTL (Bridged Transformer Less 외 여러가지 설 존재) 앰프란, 원래 스테레오 앰프의 두가지 출력을 스피커에 접속하고 한쪽을 정상 구동, 다른 한쪽을 역상 구동하여 모노럴 앰프로 사용하는 방법입니다. 이를 모터 구동에 응용하는 방법에 대해 설명하겠습니다. BTL 앰프에 의한 구동에는 전압 구동과 전류 구동이 있습니다.

3-1. 리니어 전압 구동

그림 15는 Brush DC 모터를 리니어 전압으로 구동하는 BTL 앰프 회로의 예입니다. 이 회로는 2개의 입력 (IN1, IN2)에 인가되는 DC 전압을 제어함으로써 모터에 인가되는 DC 전압 (OUT1, OUT2)을 제어하고, 전류의 방향에 대해서도 제어합니다. 회로 예는 입력단 앰프와 그에 연결되는 2개의 출력단 파워 앰프로 구성되어 있습니다. 회로도가 나타내는 바와 같이, 모터는 2개의

출력 사이에 접속합니다.

동작은 다음과 같습니다. 출력 M0와 입력 IN1, IN2로 구성된 입력단 앰프는 단순한 차동 앰프입니다. 따라서 M0는 하기와 같이, IN1과 IN2에 인가되는 전압의 차분을 R2/R1로 결정되는 게인을 곱한 값에 Vref를 더한 전압이 됩니다.

$$VM0 = \frac{R2}{R1} \times (VIN2 - VIN1) + Vref$$

출력단 파워 앰프의 입력 M0 (=입력단 앰프의 출력)와 각 출력 OUT1, OUT2와의 관계에 대해 설명하겠습니다. 입력단 앰프와 마찬가지로 차동 앰프 구성이므로 다음과 같습니다. OUT1의 앰프는 M0를 반전 입력으로 인식하고, OUT2의 앰프는 M0를 비반전 입력으로 인식하므로, 입력전압 차의 향이 달라집니다.

$$VOUT1 = \frac{R4}{R3} \times (Vref - VM0) + \frac{VM}{2}$$

$$VOUT2 = \frac{R4}{R3} \times (VM0 - Vref) + \frac{VM}{2}$$

이 식에 VM0를 구하는 식을 대입하면, 다음과 같습니다.

$$VOUT1 = \frac{R4}{R3} \times \frac{R2}{R1} \times (VIN1 - VIN2) + \frac{VM}{2}$$

$$VOUT2 = \frac{R4}{R3} \times \frac{R2}{R1} \times (VIN2 - VIN1) + \frac{VM}{2}$$

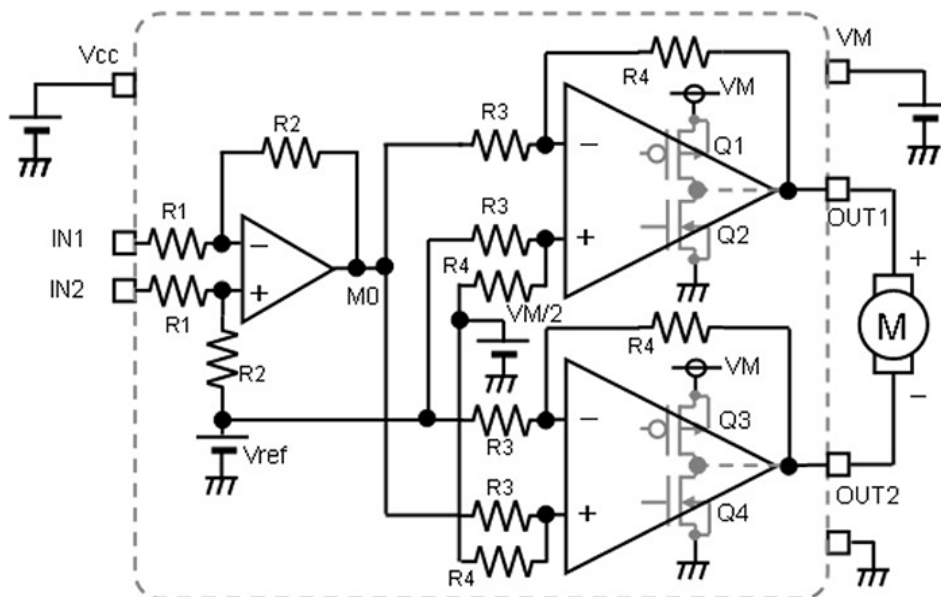


그림 15. Brush DC 모터를 리니어 전압으로 구동하는 BTL 앰프 회로의 예

따라서, OUT1 과 OUT2 의 전압차는 하기 식으로 나타낼 수 있습니다.

$$V_{OUT1} - V_{OUT2} = 2 \times \frac{R_4}{R_3} \times \frac{R_2}{R_1} \times (V_{IN1} - V_{IN2})$$

상기 식은, IN1 의 전압이 IN2 의 전압보다 높은 경우에는 OUT1 보다 OUT2 가 낮아지므로 OUT1 에서 OUT2 로 전류가 흐르고, 반대의 경우에는 OUT2 에서 OUT1 로 전류가 흐르는 것을 나타내고 있습니다. 그리고 모터에 인가되는 전압은 IN1 과 IN2 의 전압차에 전압 게인, $2 \times (R_4/R_3) \times (R_2/R_1)$ 를 곱한 값이 됩니다. 이로써 정회전과 역회전을 제어할 수 있습니다.

IN1 과 IN2 를 동일한 전압으로 설정하면, OUT1 과 OUT2 는 동일한 전압 ($=V_M/2$)이 되므로, 쇼트 브레이크 상태가 가능합니다. 단, 앰프에 오프셋이 있으면 출력의 전압차가 완전히 zero 가 되지 않으므로, 조정이 필요한 경우가 있습니다.

이 회로에서는 OPEN 상태가 불가능합니다. OPEN 상태를 만들기 위해서는 별도로 회로를 구성해야 합니다.

3-2. 리니어 전류 구동

그림 16 은 리니어 전류로 Brush DC 모터를 구동시키는 BTL 앰프의 회로 예입니다.

모터와 출력 OUT1 사이에 전류 검출용 저항 R_s 를 삽입하여, 모터에 흐르는 전류를 전압으로서 검출하고, 이를 입력단 앰프로 부귀환 (네거티브 피드백)합니다. 이에 따라, 입력단 반전 앰프는 2개의 출력단 파워 앰프의 출력전압을 피드백 제어합니다. 출력단 앰프는 차동 앰프이며, 입력단 앰프의 출력 M_0 를 OUT1 의 앰프는 반전 입력으로 인식하고, OUT2 의 앰프는 비반전 입력으로 인식하기 때문에, OUT1 에 대해 OUT2 는 역상이 됩니다. 전체적으로는 싱글 엔드 입력의 차동 출력 (정상 / 역상) 앰프라고 할 수 있습니다.

다음으로, 입력전압과 출력전류의 관계에 대해 설명하겠습니다. 출력전류 (모터 구동 전류)는 전류 검출 저항 R_s 양끝의 전압차 (전압 강하분)를 검출하여 증폭시키는 차동 앰프 출력 V_{so} 로서, 입력단 반전 앰프의 반전 단자에 피드백됩니다. V_{so} 는 하기 식으로 구할 수

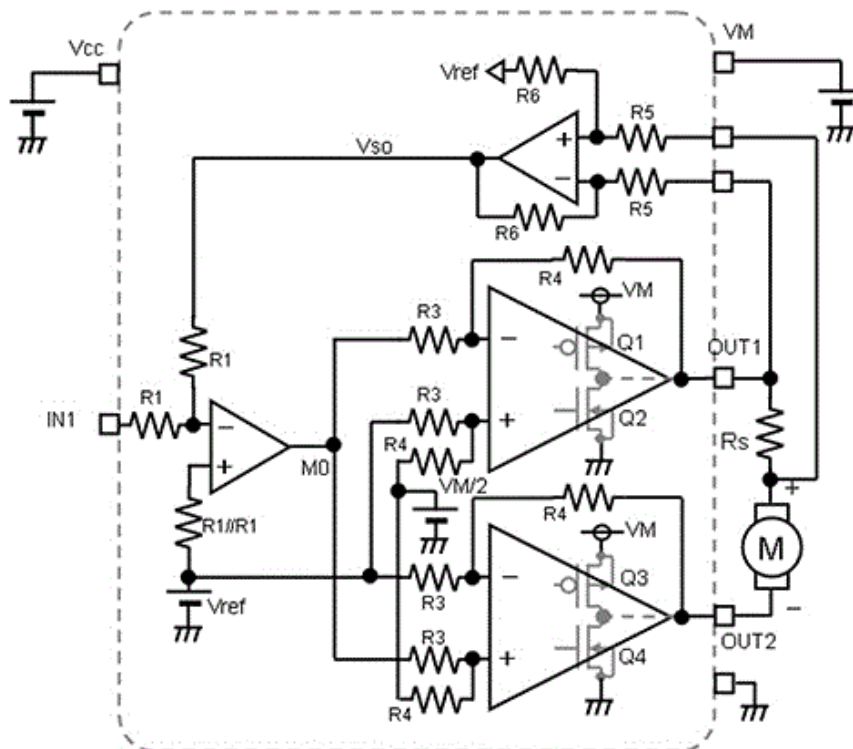


그림 16. Brush DC 모터를 리니어 전류로 구동하는 BTL 앰프 회로의 예

있습니다. R_s 의 접속에서 알 수 있듯이, 전류 방향에 대해, V_{so} 는 반전된 전압입니다.

$$V_{so} = -R_s \times I_o \times (R_6/R_5) + V_{ref}$$

또한, 입력 단자 IN1에 인가되는 전압이 V_{IN1} 일 때, 입력단 반전 앰프의 게인을 무한대로 하면, 반전 입력 단자의 전압은 V_{ref} 가 됩니다.

반전 앰프의 동작 원리에서, 입력단 반전 앰프의 반전 입력 단자에서의 전류의 합은 0A가 되도록 제어됩니다. 즉, 하기 식과 같이 나타낼 수 있습니다.

$$\frac{V_{IN1} - V_{ref}}{R_1} + \frac{V_{so} - V_{ref}}{R_1} = 0$$

이 식을 변형하면,

$$I_o = \frac{V_{IN1} - V_{ref}}{R_s(R_6/R_5)}$$

이 됩니다. R_s (R_6/R_5)는 고정치이므로, 출력전류 I_o 는 V_{IN1} 을 조정하여 원하는 값으로 설정할 수 있습니다.

전류 구동은 설정 전류보다 낮을 때 최대 전압으로 모터를 구동하므로, 설정 전류 도달 시간이 빨라 모터의 반응이 빨라진다는 특징이 있습니다. 또한, PWM 출력의 경우도 마찬가지로 전류를 검출하여 부귀환 제어를 통해 전류 구동할 수 있습니다.

4. PWM 출력에 의한 Brush DC 모터의 구동

PWM (Pulse Width Modulation=펄스 폭 변조)은 모터 구동 외에도 많이 사용되고 있으며, DC-DC 컨버터나 AC-DC 컨버터 등 전원의 전력 변환에도 폭넓게 사용되고 있습니다. DC 모터의 PWM 구동은 드라이버 전원의 소비전력을 삭감할 수 있어, 최근 채용이 증가하고 있는 구동 방식입니다.

4-1. PWM 구동이란?

PWM은 펄스의 ON / OFF를 통해, 필요한 전력을 전송하는 방법입니다. 펄스의 크기와 주기는 일정하고, ON시의 펄스 폭(시간)을 조정하여 전송하는 전력을 제어합니다. 출력전압은 ON과 펄스 주기의 시간 비율=Duty비에 해당하는 평균화된 크기입니다.

그림 17은 Brush DC 모터의 PWM 구동 원리를 나타낸 모식도입니다. 모터는 모터 기호와 저항 R+인덕턴스 L+유기 전압 E_c 로 나타냈습니다. 전압 인가 시에는, 모터 전압 E_a 가 모터의 양끝에 인가되어, 모터 전류 I_a 가 흐릅니다. 반면에, OFF의 경우 모터 단자의 양끝이 쇼트됩니다. 이러한 상태에서는 전류 회생이 발생합니다. 코일의 인덕턴스는 전류를 유지하도록 동작하므로, 인덕터 L과 저항 R의 시정수에 따라 충분히 짧은 주기로 전압 인가와 모터 양끝의 쇼트를 반복하면 일정한 전류가 흐릅니다.

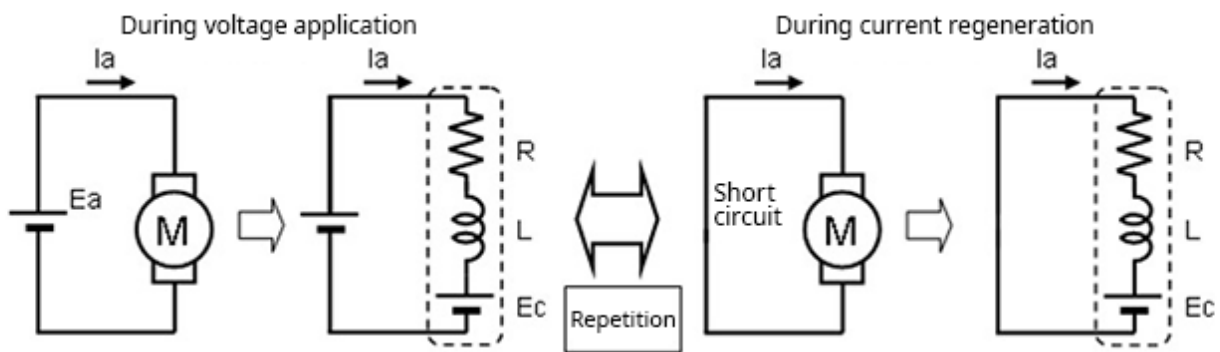


그림 17. Brush DC 모터의 PWM 구동 원리를 나타내는 모식도

그림 17 을 H-bridge 로 나타내면, 그림 18 과 같습니다. 전압 인가 시에는 SW1 과 SW4 가 ON, SW2 와 SW3 이 OFF 되어, 모터 전류 I_a 는 회색 점선과 같이 흐릅니다. 모터 양끝이 쇼트된 상태에는, SW2 와 SW4 가 ON, SW1 과 SW3 이 OFF 됩니다.

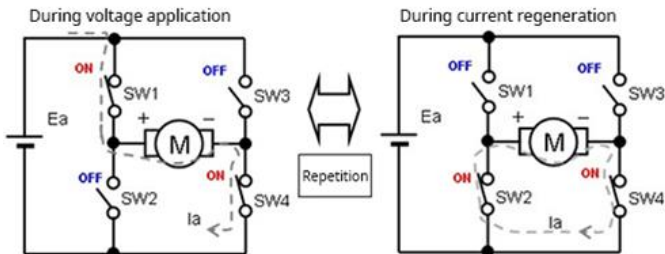


그림 18. 그림 17 을 H-bridge 로 나타낸 경우

이러한 경우의 전압 파형과 전류 파형은 그림 19 와 같아집니다. 전압 파형은 모터 인가 전압 E_a 가 일정한 주기로 반복하며 ON 구간에 인가되고, OFF (모터 양끝의 쇼트에 의한 회생) 구간은 인가되지 않습니다. 전류는 1 사이클 ON 시에 증가, OFF 시에 감소를 반복하여 정상적인 상태가 됩니다. 이때, 평균 전류 I_{ave} 는 인가 전압 E_a 에 Duty 비 m 을 곱한 값을 저항 R 로 나눈 값입니다. 단순한 예로, $E_a=12V$ 일 때 m 이 0.5 (Duty 비 50%)라고 가정하면, 모터에는 6V가 인가됩니다. 전압 인가 시에만 전원에서 전류가 공급되므로, 전원의 소비전력은 감소합니다.

4-1-1. 전류 회생 방법

지금까지 OFF 상태는 모터 양끝의 쇼트에 의한 전류 회생 방법이라고 설명했지만, 전류 회생 방법에는 그 이외에도 다른 방법이 존재하며, 각각 검토 사항도 다릅니다.

그림 20 은 전압 인가 시, 그림 21 은 지금까지 설명에 사용한 모터 양끝의 쇼트에 의한 전류 회생입니다. 기재의 필요성이 없는 트랜지스터는 생략했습니다.

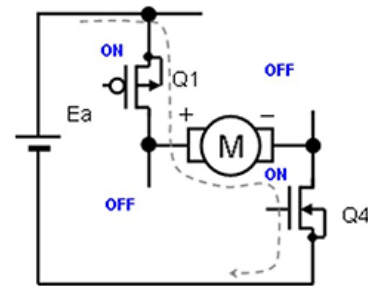


그림 20. 전압 인가 시의 스위치 상태와 전류

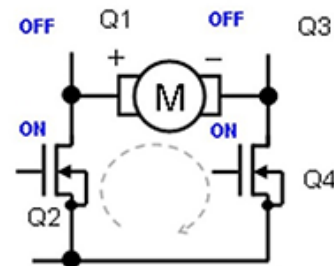


그림 21. 모터 양끝의 쇼트에 의한 전류 회생 ①

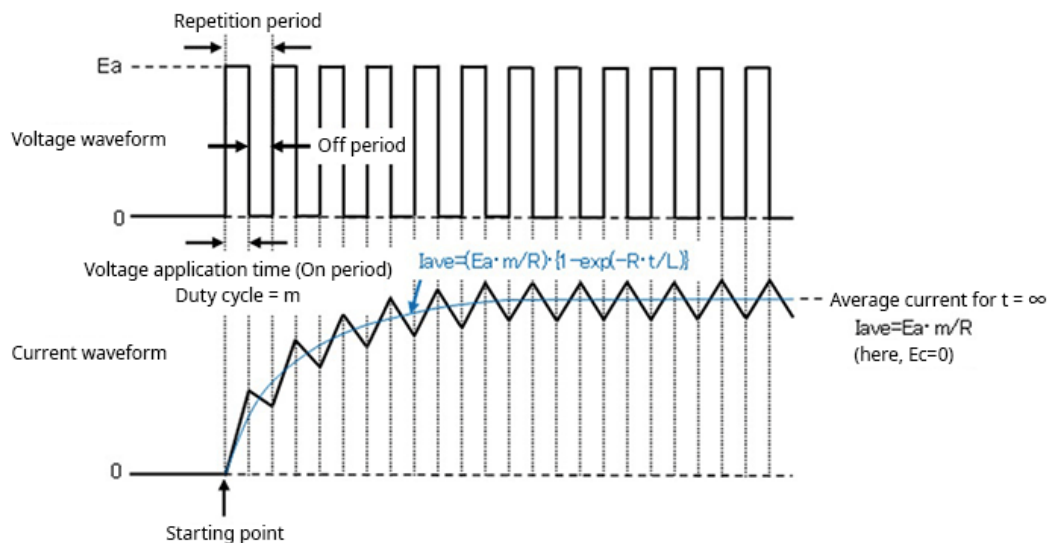


그림 19. H-bridge PWM 동작 시의 전압 파형과 전류 파형의 모식도

전류 회생 방법에는 그림 21의 모터 양끝의 쇼트에 의한 전류 회생 이외에도 3가지 방법이 있습니다.

그림 22의 전류 회생 방법 ②는 전압 인가 시의 상태에서 Q1을 OFF (Q2, Q3은 OFF 상태, Q4는 ON 상태)하기만 하는 방법입니다. 이러한 경우의 회생 전류는, OFF 상태인 Q2의 기생 (바디) 다이오드를 경유하여 그림 21과 같이 흐릅니다. 경로에는 MOSFET의 ON 저항뿐만 아니라, 기생 다이오드의 순방향 전압 VF가 포함됩니다. 이에 따라, 전류가 급격하게 감쇠합니다. 또한, 등가적으로 모터에 인가되는 평균 인가 전압은, VF만큼의 손실로 인해 Duty 비만큼의 전압보다 작아집니다.

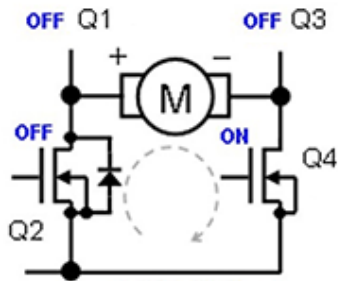


그림 22. 전류 회생 ②

그림 23의 전류 회생 방법 ③은 모든 트랜지스터를 OFF 하는 방법입니다. 이러한 경우의 회생 전류는 OFF 상태인 Q2와 Q4의 기생 다이오드를 통해 흐릅니다. 이 경로에서는 Q2와 Q3의 기생 다이오드 2개만큼의 VF가 손실이 됩니다.

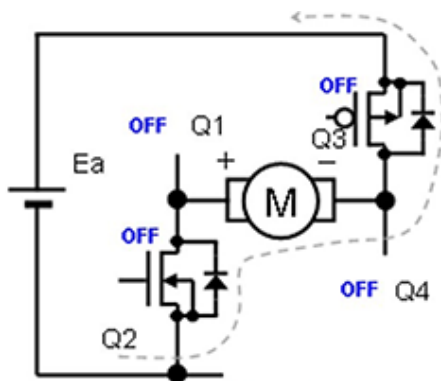


그림 23. 전류 회생 ③

또한, 전류 경로에 전원 Ea가 공급되어 역방향으로 전류를 흐르게 하므로 회생 전류의 감쇠가 극단적으로 빨라지고, ON Duty에 대해 등가의 모터에 인가되는 평균 전압은 극단적으로 낮아집니다. 50% Duty로 구동하는 경우, 등가적인 평균 인가 전압은 zero에 가까워집니다. 이러한 경우, 다이오드가 있으므로 전류=zero가 되면 회생이 멈추고, 반대 방향으로 전류가 흐르지 않습니다.

그림 24의 전류 회생 방법 ④는 전압 인가 시와 반대의 트랜지스터를 ON 합니다. 즉, Q1, Q4=ON, Q2, Q3=OFF인 전압 인가 상태에서 Q1, Q4=OFF, Q2, Q3=ON인 상태로 전환하는 방법으로, 역바이어스 상태가 됩니다.

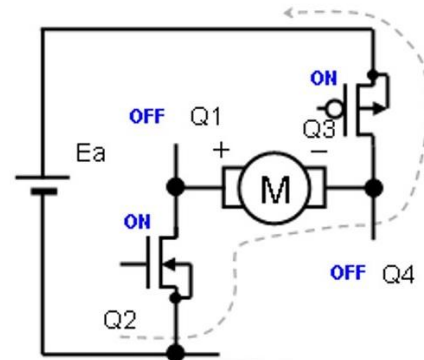


그림 24. 전류 회생 ④

이 역시, 전류 경로에 전원 Ea가 공급되어, 반대로 전류를 흐르게 하므로, 회생 전류의 감쇠가 극단적으로 빠르고, 다이오드를 통해 회생 전류가 흐르는 경우에는 전류=zero가 되면 회생은 멈추지만, 트랜지스터가 ON 상태이므로 전류가 반대로 흐르게 됩니다.

따라서, 그림 23의 전류 회생 ③과 마찬가지로 50% Duty로 구동하는 경우, 등가적으로 모터에 인가되는 평균 인가 전압은 zero가 됩니다. 100% Duty인 경우에는 등가적인 평균 인가 전압은 최대가 되고, Duty가 100%~50%일 때는 Duty에 비례하여 최대 전압 인가에서 zero 전압 인가를 제어할 수 있게 됩니다. 그리고 Duty가 50%~0%일 때는, Duty가 100%~50%일 때와 반대 방향으로 전류가 흐릅니다. 이러한 조건에서의 PWM 전압과 전류 파형을 그림 25에 나타냈습니다.

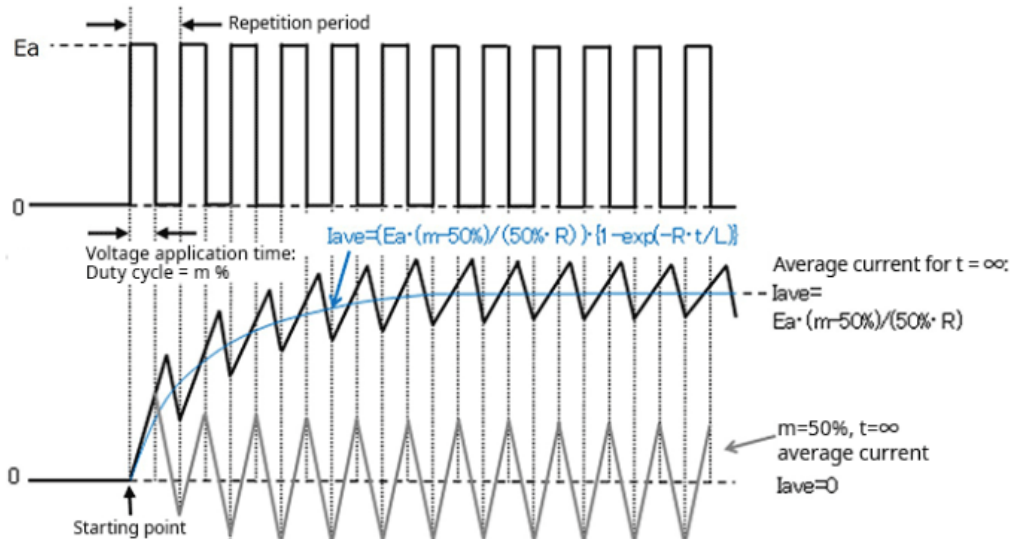


그림 25. 전류 회생 방법 ③, ④의 PWM 전압 파형과 전류 파형의 모식도

4-1-2. 손실의 개념

현실적인 고려 사항으로서, H-bridge 전환에는 트랜지스터 (본 예에서는 MOSFET)를 사용하므로, 각각의 경로에는 트랜지스터의 ON 저항을 손실로서 고려해야 합니다. 그리고, 전류 회생 시에는 MOSFET의 기생 다이오드의 VF도 손실이 되며, PWM 구동은 펄스 구동이므로 DC 구동 시의 손실과 개념이 달라집니다.

PWM 구동 시의 소비전력은, 단순히 1 주기에 대한 모터의 전압 인가 (ON) 구간의 소비전력과 전류 회생 (OFF) 구간의 소비전력의 평균치입니다. 엄밀히 말하자면, 그림 26과 같이 전압 인가 구간 (적색), 전류 회생 구간 (청색), 전환 시 (황색)의 3 가지 상태의 소비전력을 구분합니다. 일반적으로 정상 시 손실은 도통 손실이며, ON / OFF 전환 시 손실은 스위칭 손실이 됩니다.

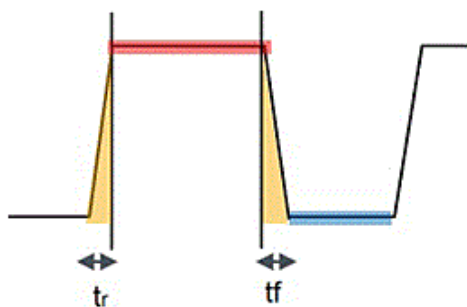


그림 26. 3 가지 상태의 소비전력

3 가지 상태의 소비전력은 다음과 같습니다.

● 전압 인가 구간의 소비전력

그림 20은 전압 인가 시의 스위치 (MOSFET) 상태를 나타낸 것입니다. 2 개의 MOSFET가 ON 상태인 경로에 전류가 흐르므로, 손실은 ON 상태인 MOSFET의 ON 저항의 합 × 전류의 제곱이 됩니다.

● 전류 회생 구간의 소비전력

앞서 설명한 바와 같이, 전류 회생에는 4 가지 방법이 있으며, 각각 전류 경로가 다르므로 손실도 달라집니다.

그림 21의 전류 회생 방법 ①과 그림 24의 전류 회생 방법 ④는 ON 상태인 2 개의 MOSFET가 전류 경로가 되므로, 손실은 ON 상태인 MOSFET의 ON 저항의 합 × 전류의 제곱이 됩니다.

그림 22의 전류 회생 방법 ②는 ON 상태인 MOSFET와 OFF 상태인 MOSFET의 기생 다이오드를 경유하므로, ON 상태인 MOSFET의 ON 저항 × 전류의 제곱 + OFF 상태인 MOSFET의 기생 다이오드의 VF × 전류가 됩니다.

그림 23의 전류 회생 방법 ③은 2 개의 MOSFET의 기생 다이오드를 경유하므로, 각 기생 다이오드의 VF의 합 × 전류가 됩니다.

●전환 시의 손실

조금 복잡하지만, 일반적으로 스위칭 손실은 하기의 식으로 구할 수 있습니다.

$$\text{전환 시의 손실} = 0.5 \times E_a \times I \times (t_r + t_f) \times f_{sw}$$

E_a : 인가 전압, I : 전류, t_r : 상승 시간

t_f : 강하 시간, f_{sw} : 스위칭 주파수

단, t_r 과 t_f 는 실제의 파형에서 구해야 합니다. 실제 파형은 그림 26 과 같이 깨끗한 선형이 아닐 수도 있으므로, 이에 대한 고려가 필요합니다. 또한, 인가 전압 및 전류 역시 실제로 측정하는 것이 확실한 결과를 얻을 수 있습니다.

<정리>

• Brush DC 모터의 PWM 구동에 있어서의 손실은 전압 인가 시, 전류 회생 시, 전환 시를 고려해야 한다.

• H-bridge 에 의한 전류 회생 방법에는 여러가지 방법이 있으며, 회생 전류 경로에 따라 손실이 달라진다.

• 전환 시의 스위칭 손실은 실제의 파형에서 구해야 하며, 실제 파형이 선형이 아닐 수도 있다는 점을 고려해야 한다.

4-1-3. 주의점

Brush DC 모터의 PWM 구동에 있어서의 주의점에 대해 설명하겠습니다.

●전환 시의 손실과 노이즈

전환 시의 손실, 즉 스위칭 손실은 앞에서 설명한 식과 같이, 상승 시간 t_r 과 강하 시간 t_f 가 빠를수록 작아집니다. 스위칭 속도 (Slew rate)가 빠를수록 스위칭 손실이 작아져, 결과적으로 소비전력이 작아지는 (= 효율이 향상) 반면, 스위칭 노이즈는 커집니다. 이는 효율과 노이즈의 트레이드 오프 관계를 의미하므로, 효율과 노이즈의 타협점을 도출해내야 합니다.

●High-side / Low-side 스위치의 전환 타이밍

동기전류 스위칭 레귤레이터에서도 필수적인 제어로, H-bridge 의 High-side 와 Low-side 가 동시에 ON

되는 구간이 발생하지 않도록 H-bridge 를 제어해야 합니다. 만약, 동시에 ON 되면, 전원과 GND 가 단락 상태가 되어 관통 전류 (Shoot-through)라고 불리는 대전류가 흘러, 파괴에 이르게 될 가능성이 있습니다.

동시 ON 을 방지하기 위해서는 반드시 양쪽 스위치가 OFF 되는 구간 (데드 타임)을 포함한 스위칭이 가능한 제어 회로가 필요합니다. 단, 데드 타임 구간은 손실이 되므로 최소한으로 설정해야 하며, 고효율의 고속 스위칭 (Slew rate)과의 양립을 위해서는 고도의 제어가 필요합니다. 실제로 이러한 제어 회로를 외부 회로로 구성하는 것은 어렵기 때문에, 모터 드라이버 IC 에 탑재된 동시 ON 방지 회로를 이용하는 것이 일반적입니다.

●PWM 주파수

PWM 주파수, 즉 전압 인가와 전류 회생의 사이클이 빨라지면 스위칭 손실은 증가합니다. 이는 앞서 설명한 전환 시 손실을 구하는 식에서도 알 수 있습니다. 고주파 수화로 전류 리플을 완화하고자 하는 등의 경우 효율과의 트레이드 오프 관계가 있으므로 주의해야 합니다.

●모터 드라이버 IC 의 PWM 구동 대응 여부 확인

모터 드라이버 IC 에 「PWM 구동 가능」 표기가 없는 경우, PWM 구동에 대응하지 않을 가능성이 있으므로, 해당 메이커에 확인해야 합니다. PWM 구동에 대응하지 않는 드라이버를 PWM 구동으로 사용하게 되면, 동작하지 않을 가능성이 높고, 동작하더라도 오동작을 일으키거나, 외장 부품 및 회로가 필요한 경우도 있으므로, 기본적으로는 사용하지 않는 것이 좋습니다.

<정리>

• 스위칭 (Slew-rate)을 고속화하면 효율은 향상되지만, 노이즈가 증가한다.

• PWM 주파수를 높이면 전류 리플을 저감할 수 있지만, 효율은 저하된다.

• PWM 구동에 대응하지 않는 모터 드라이버 IC 는 기본적으로 PWM 구동으로 사용하지 않는 것이 좋다.

4-2. H-bridge PWM 구동

H-bridge 회로를 사용하여 PWM 구동을 하는 경우의 대표적인 예 2 가지에 대해 설명하겠습니다.

●입력 단자 한쪽에 PWM 신호를 입력하여 직접 구동

「2-1-3. 출력 상태의 전환」에서, H-bridge 회로에 의한 모터 구동은 2 개의 로직 입력을 통해 4 종류의 상태 (정지, 정회전, 역회전, 브레이크) 전환이 가능하다고 설명했습니다. 첫번째의 PWM 구동 방법은 이러한 2 개의 입력 단자 중 한쪽에 PWM 신호를 입력합니다.

그림 27 은 예시로서 어떤 Brush DC 모터 드라이버 IC 의 블록도입니다. IN1 과 IN2 로직으로 H-bridge 를 전환합니다.

2 개의 진리표 중 왼쪽은 표준적인 전환 로직입니다. 여기에서 정회전 (H/L)과 역회전 (L/H)의 H 입력을 PWM 입력으로 합니다. 이를 나타낸 것이 오른쪽의 진리표입니다. 이로써 정지 (OPEN), 정회전 PWM 구동, 역회전 PWM

구동, 브레이크가 됩니다. 이러한 제어를 위해서는, 마이컴 등에서 IN1 / IN2 로 로직 신호 및 PWM 신호를 송신해야 합니다. 물론, 드라이버 IC 는 이러한 구동 방법에 대응해야 합니다.

이 방법에서는, PWM 입력 신호의 Duty 비와 전원전압 VM 을 곱한 값이 증가적인 평균 인가 전압입니다.

●Vref PWM 제어 기능을 탑재한 모터 드라이버 사용

모터 드라이버 IC 에는 PWM 기능을 탑재한 타입이 있습니다. 이 예는 내부에 삼각파 발생기와 콤퍼레이터를 탑재하여, 출력 PWM 구동 및 PWM Duty 비 조정이 가능한 타입입니다.

그림 28 의 블록도와 파형도는 그 구조를 나타낸 것입니다. 콤퍼레이터는 삼각파 발생기의 삼각파와 외부로부터의 기준 전압 Vref 를 비교한 결과를 출력합니다. 콤퍼레이터의 출력 Duty 비는 Vref 에 의해 결정되며, Vref 가 삼각파의 최소 진폭 0V 일 때는 Duty 비 0%, 삼각파의 최대 진폭 Vph 일 때는 100%가 됩니다. 이러한 콤퍼레이터 출력

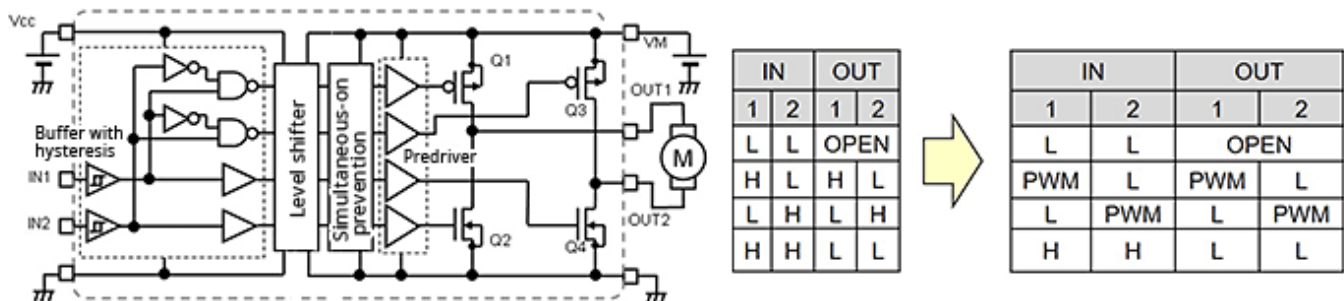


그림 27. H-bridge PWM 구동 : 입력 단자의 한쪽에 PWM 신호를 입력하여 직접 구동

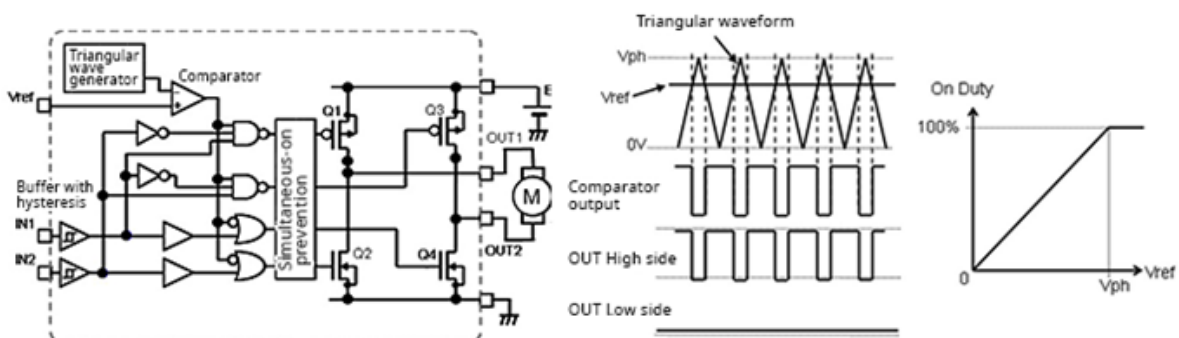


그림 28. H-bridge PWM 구동 : Vref PWM 제어 기능을 탑재한 모터 드라이버 사용

(PWM 신호)은 IN1 / IN2 의 로직과 조합되어 H-bridge 를 거쳐, OUT1 / OUT2 로 출력됩니다.

원리적으로는 2 가지 방법 모두 H-bridge 에 의한 PWM 구동이 가능하지만, 내장되어 있는 동시 ON 방지 회로의 관계나 PWM 신호 생성에 아날로그 회로를 사용하고 있다는 점 등으로 인해 이론대로 되지 않고, 직선성이나 오차 등 약간의 조정이 필요한 경우가 있습니다.

<정리>

- PWM 구동 대응 H-bridge Brush DC 모터 드라이버 IC 에는 몇가지 타입이 있다.
- IN1 / IN2 에 직접 PWM 신호를 입력할 수 있는 타입.
- Vref 단자, 삼각파 발생기, 콤퍼레이터에 의한 PWM 신호 생성 회로를 갖춘 타입.

4-3. H-bridge PWM 정전류 구동

그림 29 는 PWM 에 의한 정전류 구동 회로의 예입니다. 일반적인 드라이버 회로이며, 내장된 콤퍼레이터를 이용하여 모터 전류의 ON / OFF 제어, 즉 PWM 제어를 실행합니다.

파워 트랜지스터 (MOSFET)의 GND 측 (RNF 단자)에 접속된 저항 Rs 는 전류 검출용 저항입니다. 내장된 콤퍼레이터는, Rs 에 발생하는 전압과 기준 전압 설정 단자 (Vref)의 전압을 비교합니다. RNF 단자 전압이 Vref

전압을 초과하면 콤퍼레이터 출력이 L 이 되어, 전류를 공급하고 있는 전원측 파워 트랜지스터를 OFF 합니다. 전류의 공급, 정지는, 정회전이나 역회전 등의 동작 모드에 따라 트랜지스터의 ON / OFF 상태가 달라지지만, 결론적으로 모터에 전류를 공급하거나 차단하는 것은 Vref, Rs, 콤퍼레이터로 실행합니다.

OFF 구간 (toff)은 발진기 (OSC)의 주파수를 카운트하는 방법으로 설정되며, OFF 구간은 전류가 회생합니다. 설정한 OFF 시간이 지나면, OFF 상태인 파워 트랜지스터를 다시 ON 하여 전류를 공급합니다. 이를 반복함으로써, Vref 전압 ÷ Rs 값을 피크 전류 (Ipeak)로 하는 정전류 제어로 모터를 회전시킬 수 있습니다. 그림 29 의 오른쪽 파형은 모터 전류, Rs 전류, RNF 전압의 파형입니다.

주의점으로는 회생 전류가 흐르는 동안에는 Rs 에 전류가 흐르지 않으므로, 전류 공급 재개 시 Rs 에는 큰 전류 변화가 발생합니다. 이에 따라, 기생 인덕턴스로 인해 큰 전압 노이즈가 발생하거나 파워 트랜지스터의 기생 용량을 충전하는 전류가 흘러, Vref 전압을 초과하게 되는 경우가 있습니다.

이러한 전압 노이즈로 인해 파워 트랜지스터가 OFF 되지 않도록 단시간의 블랭크 시간 (tblank)을 설정해야 합니다. 블랭크 시간은 전류 ON / OFF 시뿐만 아니라, 모터의 회전 상태 전환 시의 전압 노이즈로 인해 오동작하지 않도록 설정해야 합니다. 블랭크 구간은 드라이버 IC 에 의해 최적화되어 있거나 조정이 가능합니다.

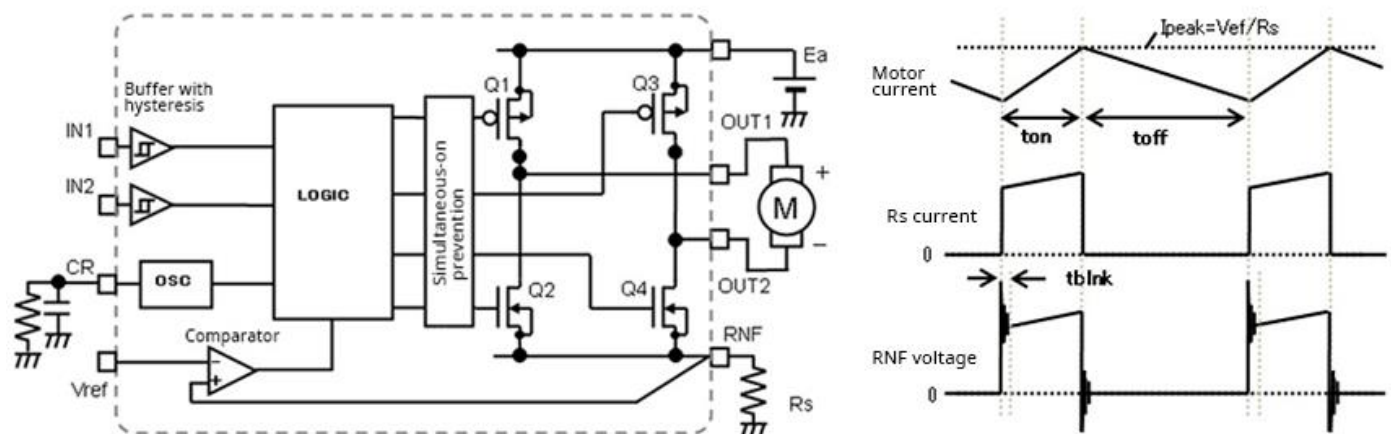


그림 29. H-bridge PWM 정전류 구동

<정리>

- H-bridge PWM 정전류 구동의 방법 중 하나로, 전류 검출 저항에 의해 모터 전류를 검출하고, 콤퍼레이터를 통해 기준 전압과 비교하여 PWM 을 제어하는 방법이 있다.
- 전류 검출 저항에는 큰 전류 변화가 발생하므로, 노이즈 전압이 발생하여 오동작을 일으킬 가능성이 있다.
- 오동작 제어에는 블랭크 시간을 설정하는 방법이 있다.

4-4. BTL 앰프 입력 형식 PWM 구동

그림 30 은 BTL 앰프의 입력 형식으로 PWM 구동하는 회로의 예입니다.

이 드라이버는 입력 회로에 BTL 앰프와 동일한 차동 앰프 구성을 이용하여 H-bridge 를 제어합니다. Vref 를 기준 바이어스점으로 하는 차동 입력 앰프와 Vph-Vpl 진폭으로 Vph 와 Vpl 의 중심 값이 Vref 가 되는 삼각파 발생기를 구비하고 있습니다. PWM 신호는, 앰프의 출력과 삼각파를 콤퍼레이터로 비교하여 구형파화함으로써 생성됩니다. 2 개의 구형파 출력 중 한 쪽은 반전입니다 (그림 30 의 파형도 참조).

입력 (VIN1-VIN2)이 zero 일 때, 앰프 출력 (Amp Out)은 Vref 와 같은 전압이 됩니다. 2 개의 출력 모두 50% Duty 로 구동되며, 모터에 흐르는 평균 전류는 zero 가 됩니다 (그림 30 의 그래프 참조).

입력 (VIN1-VIN2)이 플러스일 때, OUT1 의 ON Duty 가 50%보다 커지고, OUT2 의 ON Duty 는 50%보다 작아져

OUT1 에서 OUT2 로 전류가 흐릅니다. 그리고, 입력 (VIN1-VIN2)이 마이너스일 때, OUT1 의 ON Duty 가 50%보다 작아지고, OUT2 의 ON Duty 는 50%보다 커져 OUT2 에서 OUT1 로 전류가 흐릅니다.

첫단 앰프의 전압 게인이 Gv 일때, $VIN1 - VIN2 = (V_{ph} - V_{ref}) \div G_v$ 로, OUT1 은 100% ON Duty (H 측 항상 ON)가 되고, OUT2 는 0% ON Duty (L 측 항상 ON)가 됩니다.

$VIN1 - VIN2 = (V_{ph} - V_{ref}) \div G_v$ 에서 OUT1 은 0% ON Duty (L 측 항상 ON), OUT2 는 100% ON Duty (H 측 항상 ON)가 됩니다.

이러한 Duty 제어에는 주의점이 있습니다. 본 구성 역시 High-side 와 Low-side 트랜지스터의 동시 ON 상태가 발생하지 않도록 동시 ON 방지 회로를 필요로 합니다. 동시 ON 방지 회로가 있는 경우, Duty 가 0%나 100% 부근에서 제어의 직선성을 유지하지 못하는 경우가 있으므로, 해당 특성을 확인해 두어야 합니다. 또한, 첫단 앰프, 삼각파 발생기, 콤퍼레이터에는 각각 오프셋의 편차가 있으므로, 입력전압에 대한 Duty 의 편차가 존재한다는 점에도 주의가 필요합니다.

<정리>

- BTL 앰프 입력 형식을 이용한 H-bridge PWM 구동에서 VIN 의 전압차를 이용하여 Duty 를 제어한다.
- 동시 ON 방지 회로가 있는 경우, Duty 가 0%나 100% 부근에서 제어의 직선성을 유지하지 못하는 경우가 있다.
- 첫단 앰프, 삼각파 발생기, 콤퍼레이터에 각각

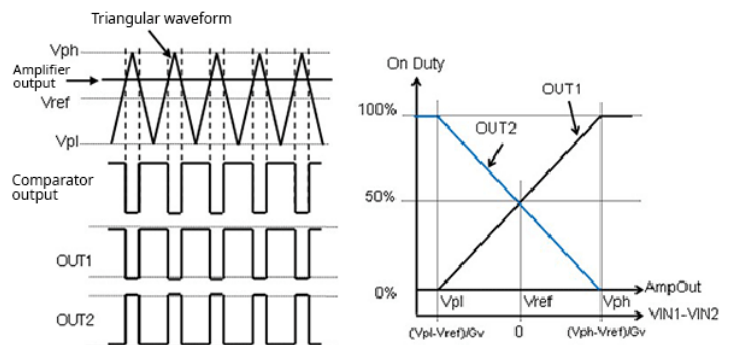
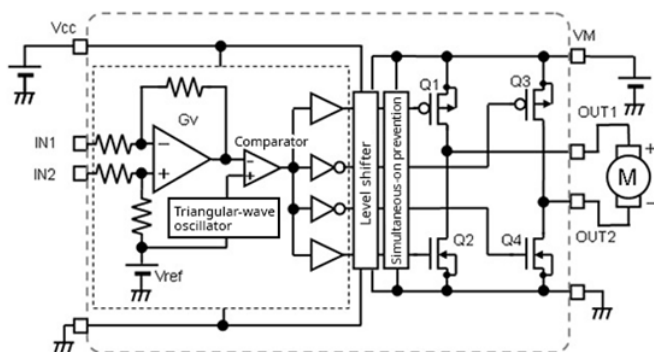


그림 30. BTL 앰프 입력 형식 PWM 구동

오프셋의 편차가 있으므로, 입력전압에 대한 Duty 에 편차가 존재한다는 점에도 주의해야 한다.

5. 1 스위치 회로 구동

그림 31 은, 1 개의 스위치를 사용하여 DC 전원의 (+)와 (-)를 모터에 접속하는 상태와, 모터와 DC 전원의 (+) 또는 (-)와의 접속을 차단하는 2 가지 상태를 만드는 회로이며, 1 개의 스위치로 실현 가능하므로 「1 스위치 회로」라는 명칭을 사용합니다.

스위치를 ON 하면 모터가 극성을 따라 한 방향으로 회전하고, OFF 하면 전압이 인가되지 않으므로 공회전 후 정지합니다. 스위치의 위치는 ①과 같은 (-)측, ③과 같은 (+)측에 위치해도 문제되지 않습니다. 스위치를 반도체 파워 트랜지스터 (그림 31 에서는 MOSFET)로 대체하여 전자 회로를 구성할 수도 있습니다. ②와 같이 (-)측에 삽입하는 경우는 Nch MOSFET, ④와 같이 (+)측에 삽입하는 경우는 Pch MOSFET 를 사용합니다.

파워 트랜지스터를 사용하는 경우에는 주의해야 할 부분이 있습니다. 이 회로에서는 OFF 직후에 모터의 인덕턴스가 전류를 계속 흘리려고 하므로, ①에서는 모터의 (-)측이 전원전압 이상으로, ③에서는 모터의 (+)측이 GND 이하로 치우치게 됩니다. 이 전압은 전원전압의 수 배 이상이 됩니다. 따라서, 파워 트랜지스터를 사용하는 경우에는, ②와 ④의 회로도에 기재되어 있는 바와 같이, 파워 다이오드를 모터와 병렬로 접속하여 다이오드 순방향 전압으로 발생 전압을 억제 (클램프)

함으로써 트랜지스터를 보호해야 합니다.

클램프 다이오드가 있는 경우, 모터의 발전에 의한 전류는, 발전 전압이 다이오드의 순방향 전압보다 높은 구간은 클램프 다이오드를 통해 흐르므로, 회전 방향의 반대 방향으로 토크가 작용함에 따라 쇼트 브레이크 동작을 하게 되어 모터는 신속하게 정지합니다.

이러한 회로는 DC 전압 구동과 더불어 PWM 구동도 가능하고, 모터 전류를 검출하여 부귀환함으로써 전류 구동도 가능하게 됩니다.

<정리>

- 1 스위치 회로 구동은 회전, 공회전의 2 가지 상태를 1 개의 스위치로 제어한다.
- 1 스위치 회로 구동에 파워 트랜지스터를 스위치로 사용하는 경우, 역기전압으로 인해 트랜지스터에 데미지가 발생할 가능성이 있으므로, 클램프 다이오드를 사용할 필요가 있다.

6. Half-bridge 회로에 의한 구동

그림 32 는 전원 사이에 2 개의 스위치를 세로로 접속한 구동 회로로, 4 개의 스위치를 사용한 H-bridge (Full-bridge)의 절반이므로 Half-bridge 회로라는 명칭을 사용합니다. 또한, H-bridge 1 개를 1ch 이라고 하므로, 절반인 0.5ch 이라고 부르는 경우도 있습니다.

①에서 SW2, ③에서 SW1 을 ON 하면, 모터가 극성에

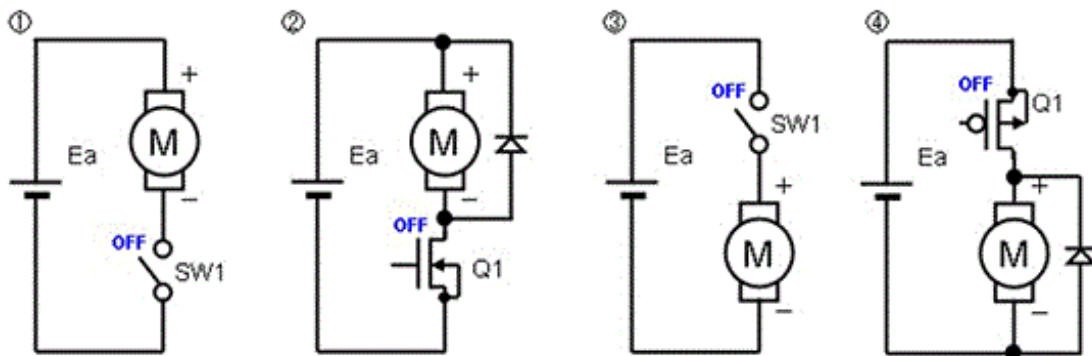


그림 31. 1 스위치 회로에 의한 구동

따라 일정한 방향으로 회전합니다. ①의 경우, 회전하고 있는 상태에서 동시에 SW2 를 OFF, SW1 을 ON 하면 쇼트 브레이크 동작을 하여 모터는 신속하게 정지합니다. 이와 반대로, ③의 경우, 동시에 SW1 을 OFF, SW2 를 ON 하면 쇼트 브레이크 동작을 합니다. 그리고 ①과 ③이 모두 회전 상태일 때 SW2 와 SW1 을 OFF 하면, 전압이 인가되지 않으므로 공회전 후 정지합니다.

「5. 1 스위치 회로」와 마찬가지로, ①과 ③의 스위치 부분을 반도체 파워 트랜지스터로 대체할 수 있습니다. 회로 예에서는 DC 전원의 (-)측에 Nch MOSFET, (+)측에 Pch MOSFET 를 사용했습니다. MOSFET 에는 기생 다이오드가 존재하기 때문에, 회전 상태에서 Q1 과 Q2 를 OFF 해도 모터에 대해 병렬 접속되는 MOSFET 의 기생 다이오드가 전류를 회생하므로 쇼트 브레이크와 같은 동작을 합니다. 모터의 발전 전압이 기생 다이오드의 순방향 전압 이하로 낮아지지 않는 구간은 이러한 쇼트 브레이크 상태가 계속됩니다.

H-bridge 회로와 마찬가지로 Half-bridge 회로 역시 전원-GND 사이에 2 개의 스위치 (트랜지스터)가 직렬로 접속되므로, 스위치 전환 시에 양쪽의 스위치가 동시에 ON 되지 않는 동시 ON 방지 제어가 프리 드라이브 회로에 필요합니다. 동시 ON 이 발생하면, 전원 사이에 숏 스루 (Shoot-through) 등으로 불리는 대전류가 흘러, 스위치 (트랜지스터)를 파괴할 가능성이 있습니다.

또한 회전, 브레이크, 공회전 3 가지 출력 상태를 만들기 위해서는, 2 값 입력을 2 개, 3 값 입력을 1 개 구비해야 합니다. 2 값 입력이 1 개인 경우, 3 가지 출력 상태에서 2 가지를 선택하게 됩니다.

이 회로에서도 PWM 구동이 가능하고, 모터 전류를 검출하여 부귀환함으로써 전류 구동도 가능하게 됩니다.

<정리>

- Half-bridge 는 회전, 공회전, 브레이크의 3 가지 상태를 제어할 수 있다.
- Half-bridge 는 스위치에 MOSFET 를 사용하는 경우, MOSFET 의 기생 다이오드에 의한 브레이크 동작이 가능하다. 1 스위치, Half-bridge 모두 PWM 구동, 전류 구동이 가능하다.

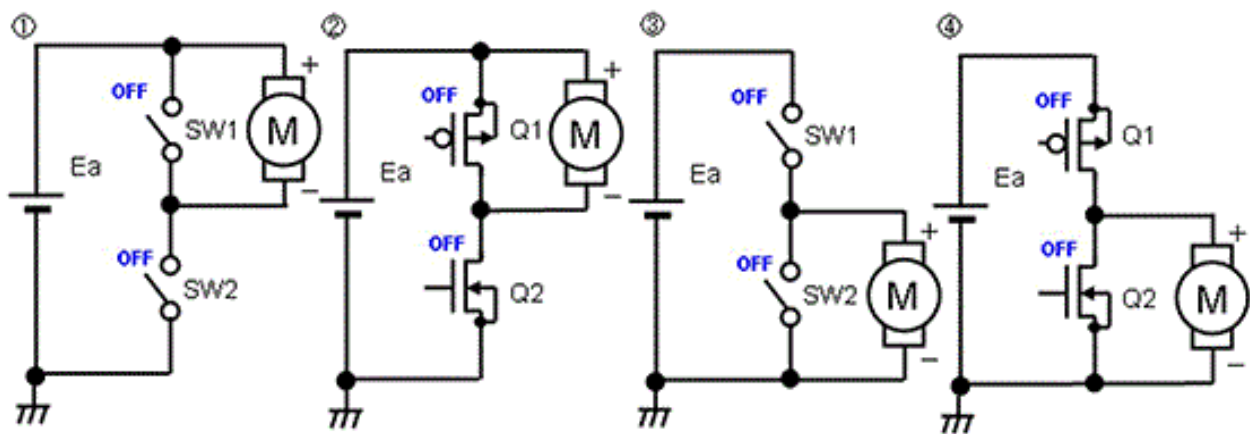


그림 32. Half-bridge 회로에 의한 구동

7. 정리

지금까지 Brush DC 모터의 구조 및 동작 원리, 그리고 다양한 구동 방법에 대해 설명했습니다. 마지막으로, Brush DC 모터의 구동 회로와 특징, Brush DC 모터의 특징 및 용도 예에 대해 표로 정리해 보겠습니다.

●Brush DC 모터의 구동 회로와 특징

회로명		가능한 회전 동작	회전수 제어	장점	단점
H-bridge		정회전, 역회전 정지 (Hi-Z) 브레이크	불가능		
H-bridge + High-side 전압 리니어 제어		정회전, 역회전 정지 (Hi-Z) 브레이크	가능		<ul style="list-style-type: none"> • 소비전력 大 • 파워 트랜지스터에 MOS 사용 시, 회로 규모 大
BTL 앰프 리니어 전압 구동		정회전, 역회전 브레이크	가능	<ul style="list-style-type: none"> • 2 입력 리니어로 모든 동작 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 소비전력 大 • 회로 규모 大 • 출력 하이 임피던스용으로 별도 회로 필요
H-bridge 회로 PWM 구동		정회전, 역회전 정지 (Hi-Z) 브레이크	가능	<ul style="list-style-type: none"> • 저소비전력 • DC 전압 입력 대응 	<ul style="list-style-type: none"> • PWM 용 회로 구성 필요 • 노이즈원
BTL 앰프 입력 형식 PWM 구동		정회전, 역회전 브레이크	가능	<ul style="list-style-type: none"> • 저소비전력 • 2 입력 리니어로 모든 동작 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 리니어리티 (linearity)가 좋지 않음 • 출력 하이 임피던스용으로 별도 회로 필요 • PWM 용 회로 구성 필요 • 노이즈원
1 스위치	ON / OFF	단방향 회전 정지 (Hi-Z)	불가능	<ul style="list-style-type: none"> • 심플한 회로 	<ul style="list-style-type: none"> • Di 필요 • 급정지 불가능
	PWM 구동	단방향 회전 정지 (Hi-Z)	가능	<ul style="list-style-type: none"> • 저소비전력 	<ul style="list-style-type: none"> • Di 필요, Di 발열 고려 필요 • 급정지 불가능 • PWM 용 회로 구성 필요 • 노이즈원
Half-bridge	ON / OFF	단방향 회전 정지 (Hi-Z) 브레이크	불가능	<ul style="list-style-type: none"> • 다이오드 불필요 • 급정지 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 제어 입력 구성 고려 필요 (1 입력 or 2 입력) • 동시 ON 방지 필요
	PWM 구동	단방향 회전 정지 (Hi-Z) 브레이크	가능	<ul style="list-style-type: none"> • 저소비전력 • 다이오드 불필요 • 급정지 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 제어 입력 구성 고려 필요 (1 입력 or 2 입력) • PWM 용 회로 구성 필요 • 노이즈원

●Brush DC 모터의 특징

Brush DC 모터의 특징	
장점	단점
<ul style="list-style-type: none"> • 소형화 용이, 경량 • 효율이 우수 • 저렴한 가격 • 전압 인가만으로 회전 • 저전압 구동 가능 (전지 1 개, 1.5V 로 동작 가능) • 회전수와 인가 전압이 직선 비례 • 회전수가 부하에 비례하여 저하 • 기동 토크가 크다 • 토크와 전류가 비례 • 배선이 2 개뿐인 심플한 구조 • 전원의 극성에 따라 회전 방향이 달라진다 	<ul style="list-style-type: none"> • Brush 가 있으므로 수명이 짧다 • 소음이 발생하기 쉽다 • 전기 노이즈가 발생하기 쉽다 • 정속성 (定速性)이 낮다 • 직류 전원 필요 • 과부하 시, 대전류가 흐른다 • 스파크가 발생하는 경우가 있다 • Brush 접촉으로 인한 마찰 토크만큼의 손실이 있다

●Brush DC 모터의 용도 예

Brush DC 모터의 용도 예	
ODD (Optical Disc Drive) PC / 게임용 DVD / Blu-ray 드라이브 Blu-ray 레코더 / 플레이어	로딩 : 디스크 출납
잉크젯 프린터 다기능 프린터 (MFP)	용지 이송 캐리지 (Carriage) : 프린트 헤드 이동 스캐너
PPC (Plain Paper Copier : 보통 용지 복사기)	용지 이송
디지털 스틸 카메라	줌, 아이리스 [조리개], 렌즈캡
휴대전화, 태블릿 PC	진동기
완구	일반 동작 모형, 라디오 컨트롤러 : 구동, 방향 제어 게임 컨트롤러 : 진동
일반 가전	헤어 드라이어 : 송풍 면도기 : 면도날 회전, 왕복 전동칫솔 : 진동 냉장고 : 제빙 트레이 회전 등
공구	드라이버, 드릴, 톱 등 :회전
자동차 전장	파워 윈도우 : 개폐 미러 : 개폐, 각도 조절 도어락 : 잠금 및 해제 에어컨 댐퍼 : 풍향 변경 코너폴 (Corner pole) : 상하 동작 헤드라이트 : 방향 조정 카 내비게이션 : 디스플레이 출납 등

상기 내용은 대표적인 용도 예를 나타낸 것으로, 이 외에도 Brush DC 모터의 특징을 활용한 다양한 어플리케이션이 있습니다.

개정 이력

개정일	버전	변경 내용
2021.8.16	001	신규 작성 (한국어판은 2024 년 1 월 작성)

주의 사항

- 1) 본 자료의 기재 내용은 예고 없이 변경될 수 있습니다.
- 2) 본 자료에 기재되어 있는 응용 회로의 예시 및 정수 등의 정보에 대해서는, 제품의 표준 동작 및 사용 방법을 설명한 것입니다. 양산 설계를 하시는 경우에는 외부 여러 조건을 고려해주시길 부탁드립니다.
- 3) 본 자료에 기재되어 있는 기술 정보는 제품의 대표적인 동작 및 응용 회로 예시 등을 나타낸 것으로, 로옴 또는 타사의 지적재산권 및 기타 모든 권리에 대해 명시적으로나 묵시적으로 실시 또는 이용을 허락하지 않습니다. 상기 기술 정보를 사용하여 분쟁이 발생한 경우, 로옴은 이에 대한 책임을 지지 않습니다.
- 4) 로옴은 본 자료의 기재 내용에 따라 발생한 어떠한 사고나 손해에 책임을 지지 않습니다.
- 5) 본 자료에 기재되어 있는 정보는 정확성을 위해 신중히 작성되었으나, 만일, 해당 정보의 오류 및 오식에 따른 손해가 발생한 경우, 로옴은 이에 대한 책임을 지지 않습니다.
- 6) 본 자료의 일부 또는 전부를 로옴의 허락 없이 무단 복제 및 배포하는 것을 금합니다.