

## BLDC 모터 제어 시 PWM의 효과 이해



브러시리스 모터는 귀하의 응용 프로그램에 적합한 패키지로 내구성, 효율성, 토크 및 속도의 가장 효과적인 조합을 제공합니다.

**모** 선 시스템 설계자는 BLDC 모터를 구동하기 위해 PWM(펄스 너비 모듈레이션)을 사용하는 전자 장치를 선택하거나 개발할 때 종종 문제에 직면합니다. 예상치 못한 성능 문제를 피하기 위해 몇 가지 기본적인 물리적 현상을 염두에 두는 것이 좋습니다. 이 문서는 Portescap BLDC 모터와 함께 PWM 드라이버를 사용할 때 일반적인 지침을 제공합니다.

### BLDC 모터의 정류

브러시 DC 모터(브러시에 의해 기계적으로 정류가 이루어짐)와 달리 BLDC 모터에서는 정류가 전자적으로 이루어집니다. 다시 말해, 모터의 위상이 회전자 대 고정자의 상대적 위치에 따라 전원 공급 및 차단이 순차적으로 이루어진다는 의미입니다. 3상 BLDC 모터의 경우 드라이버는 일반적으로 3상 H-브리지라고 하는 6개의 전자 스위치(일반적으로 트랜지스터)로 구성됩니다 (그림1 참조). 이 구성을 사용하면 3개의 양방향 출력으로 모터의 3상에 전원을 공급할 수 있습니다.

트랜지스터를 특정 순서로 열고 닫으면 모터의 위상에 전원이 공급되어 고정자 대 회전자 자석에 의해 유도되는 자기장의 최적 방향이 유지됩니다(그림 2, 그림3 및 그림4 참조).

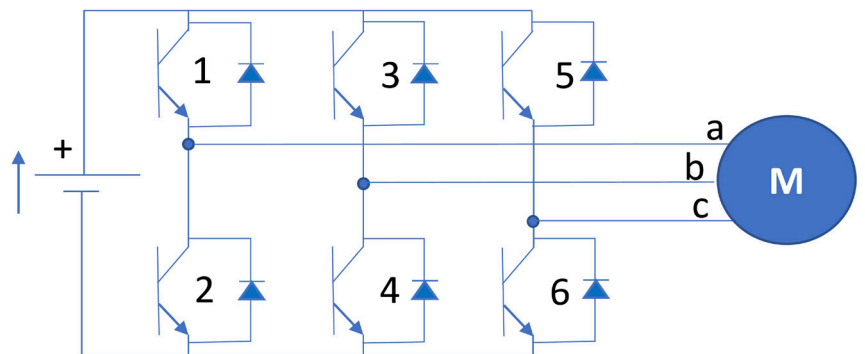


그림1 - 3개의 모터 위상에 연결된 6개의 트랜지스터로 구성된 3상 모터 H- 브리지의 예

모터는 광범위하게 사용되는 6단계 사다리꼴 전류 (그림 3 참조)로 구동되거나 또는 전자 장치의 정교함에 따라 FOC (필드 지향 제어)라고도 하는 고급 벡터 제어를 달성하도록 작동할 수 있습니다(그림4 참조).

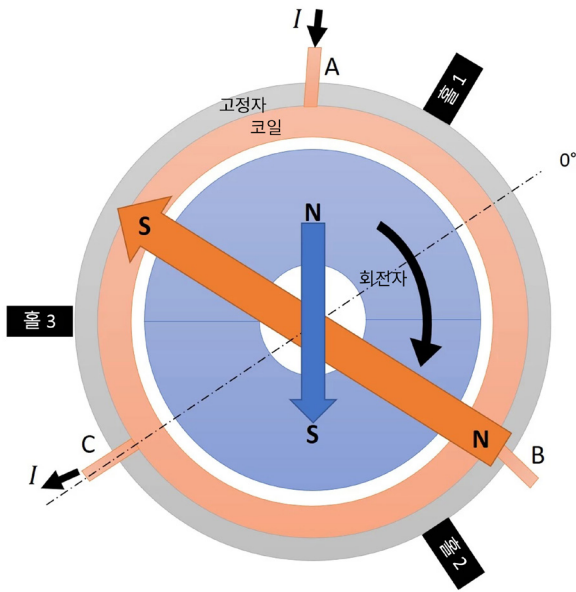


그림2 - 3단계를 시작하는 무슬롯 BLDC 모터의 단면 구성도. 파란색 부분은 2극 영구 자석 모터가 있는 회전자입니다. 자석에 의해 생성된 자기장은 파란색 화살표로 표시되어 있습니다. 주황색 부분은 3상 권선입니다. 전류가 A상에서 C상으로 흐르면 자기장을 유도하며, 이는 단순화를 위해 주황색 화살표로 표시되어 있습니다. 두 화살표가 정렬되면 회전자가 회전합니다. 드라이브는 고정자와 회전자 자기장 사이에 가능한 한 90°에 가까운 각도를 유지(최대 토크 생성)하기 위해 위상의 방향을 변경(고정자 자기장 회전, 주황색 화살표)합니다.

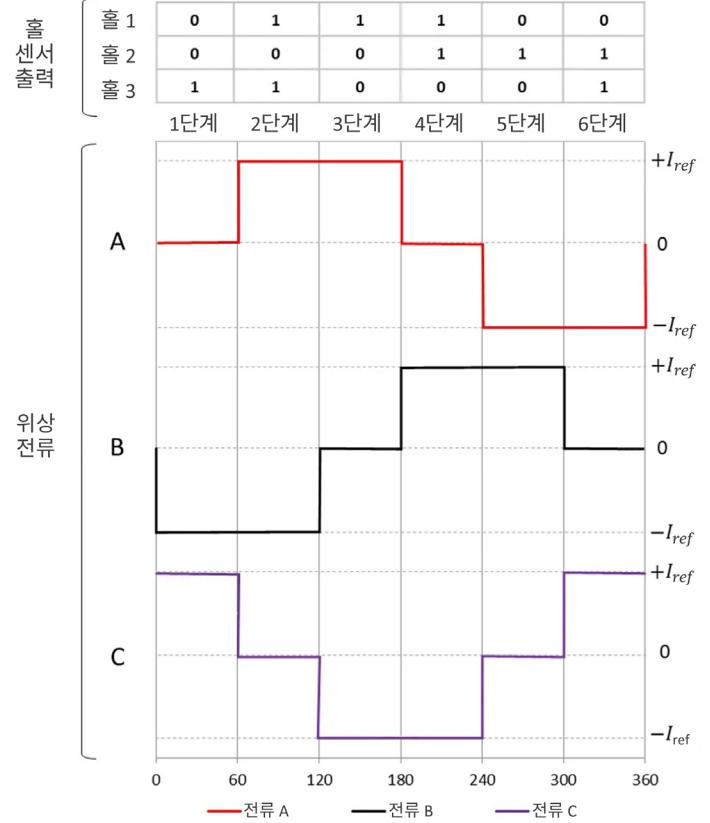


그림3 - 6단계 정류가 있는 위상 전류 및 홀 센서 상태

### PWM 규정

브러시(그림 5 참조)와 BLDC 모터(그림 6 참조) 모두 응용 프로그램의 작동 지점(속도 및 토크)은 다를 수 있습니다. 증폭기의 역할은 원하는 동작을 출력하기 위해 공급 전압이나 전류를 변경하는 것입니다.

일반적으로 전압 또는 전류를 변경하는 두 가지 방법이 있습니다.

- 선형 드라이버 (혹은 선형 증폭기)
- 초퍼 드라이버 (혹은 초퍼 증폭기)

선형 증폭기는 전압 또는 전류를 선형으로 변경하여 모터에 전달되는 전력을 조정합니다. 또한 모터에 전달되지 않은 전력을 소멸시킵니다 (전력 손실 - 그림 6 참조) 결과적으로 전력을 소멸하기 위해 대형 방열판이 필요하므로 증폭기 크기가 증가하고 응용 프로그램에 통합하기가 더 어려워집니다.

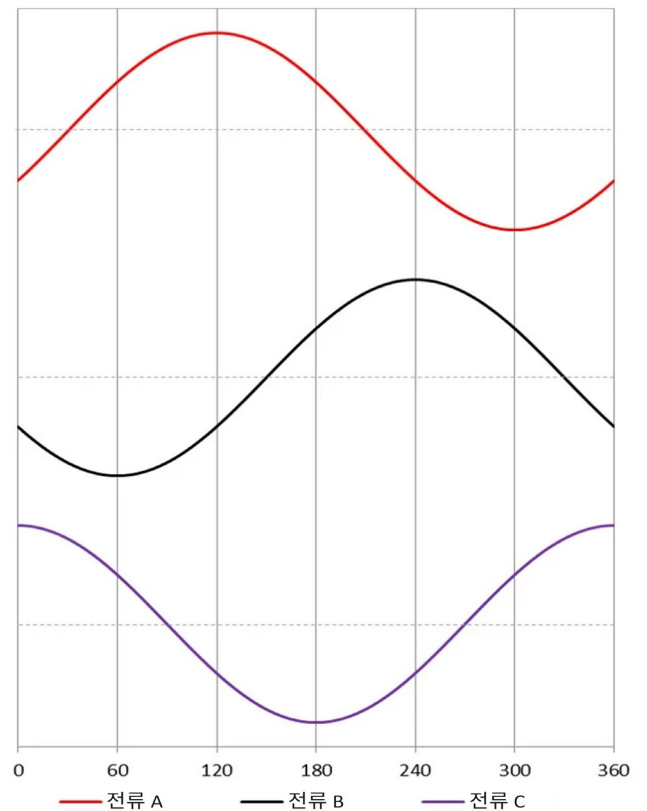


그림4 - FOC 증폭기를 사용한 위상 전류

초퍼 증폭기는 전력 트랜지스터를 켜고 끄는 방식으로 전압(및 전류)을 조절합니다. 주요 이점은 트랜지스터가 꺼져있을 때 전력을 절약한다는 것입니다. 이는 응용 프로그램의 배터리 수명을 절약하는 데 도움이 되고 전자 장치의 발열을 줄이고 전자 장치의 크기를 줄일 수 있습니다. 대부분의 경우 초퍼 증폭기는 PWM 방식을 사용합니다.

PWM 방법은 원하는 목표값 내에서 전압 또는 전류를 조절하기 위해 고정 주파수(그림 7 참조)에서 듀티 사이클을 변경하는 것으로 구성됩니다.

다른 전류와 비교하였을 때 PWM 기술의 한 가지 이점은 스위칭 주파수가 고정 매개변수라는 점입니다. 전자 설계자가 생성된 음향 및 전자기 소음을 쉽게 필터링할 수 있습니다.

PWM의 트랜지스터가 100 % 열려있을 때 모터에 적용되는 전압은 전체 버스 전압입니다. 트랜지스터가 50 % 개방될 때 모터에 적용되는 평균 전압은 버스 전압의 절반입니다. 트랜지스터가 100 % 닫히면 모터에 전압이 적용되지 않습니다.

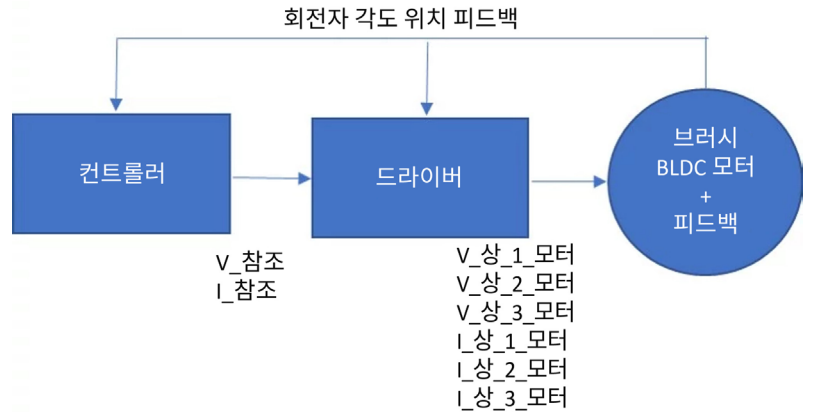
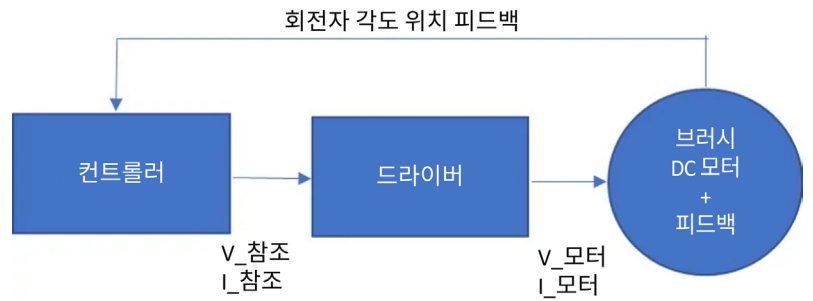


그림5 - 브러시 DC와 BLDC 모터 간의 모션 제어 아키텍처 비교

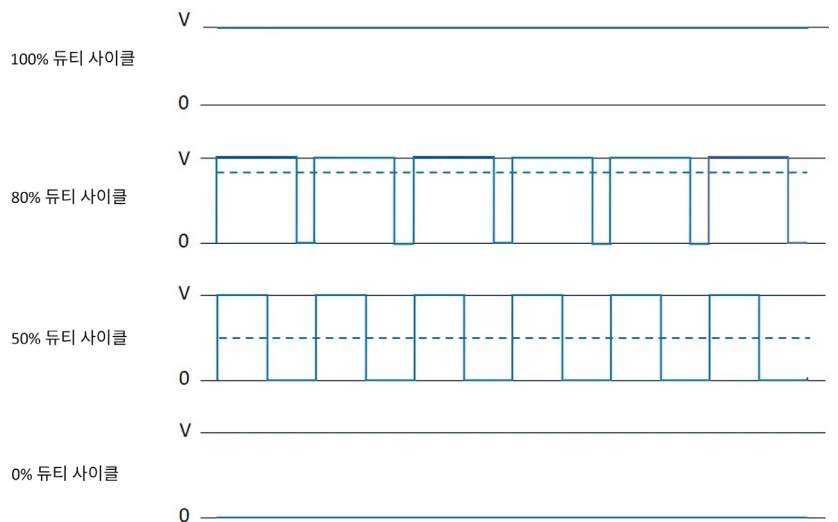
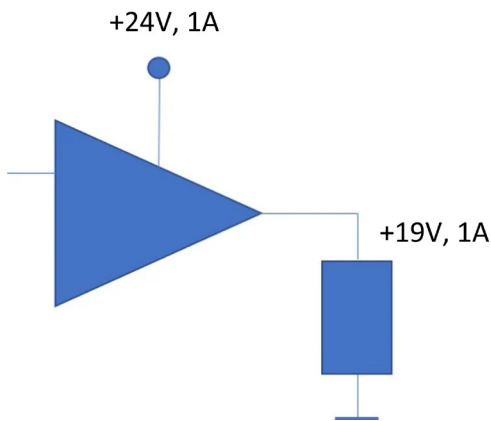


그림6 - 모터에 전원을 공급하는 선형 증폭기의 예. 이 모터 코일의 드라이버에서 지속적으로 소멸되는 전력은 다음과 같습니다. P 소멸 (증폭기) = (24 - 19) \* 1 = 5W

그림7 - 다양한 PWM 듀티 사이클. 모든 경우에서 주파수는 동일하지만 평균 전압(점선)은 듀티 사이클에 비례합니다.

## 인덕턴스 효과

DC 모터는 직렬로 연결된 인덕턴스 L, 저항 R 및 역기전력(역EMF) E를 특징으로 합니다. 역기전력은 적용된 전압에 반대되는 자기 유도(Faraday-Lenz 유도 법칙)에 따라 발생하는 전압이며 모터 속도에 비례합니다. PWM이 켜져있을 때와 PWM이 꺼져있을 때의 모터를 보여주는 그림 8을 참조하십시오.

너무 복잡하게 들어가지 않기 위해 지금은 역EMF를 고려하지 않겠습니다.

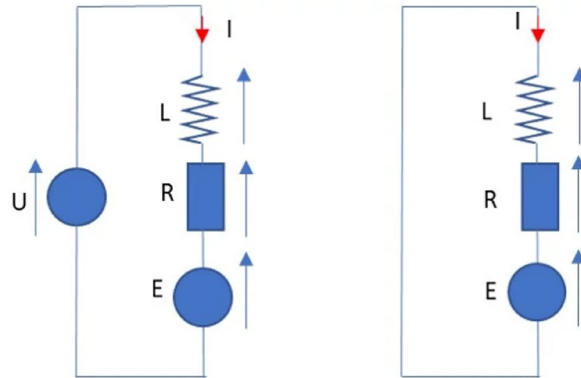


그림8 - PWM이 켜져있거나(왼쪽) 및 꺼져있을 때(오른쪽) DC 모터를 나타내는 단순화된 등가 회로 다이어그램. 간단하게 보면, 오른쪽 회로는 느린 감쇠 모드(모터에서 전류 재순환)에 해당합니다.

전압을 인가하거나 RL 회로에 전압을 차단할 경우, 유도 회로는 전류의 전환을 방해합니다. 전압 U를 RL 회로에 인가하면 전류는 1차적으로 급격히 상승하며, 그 역학은  $L/R$  비율과 동일한 전기 시간 상수  $\tau$ 에 따라 달라집니다(그림 9 참조). 시간 상수의 5배 이후, 특별한 반응 없이 안정 상태 값, 즉  $U/R$ 의 99.3%에 도달합니다.

RL 회로가 방전될 때 동일한 지수 동작이 관찰됩니다. 그림10을 참조하십시오.

실제로 BLDC 증폭기는 PWM 주파수가 다소 높으며, 전류가 안정 상태에 도달하지 못하도록 합니다. 이 주파수는 일반적으로 50kHz 이상이므로 각 정류 단계에서 발생하는 충분한 사이클로 전류를 적절하게 조절할 수 있습니다. PWM 주파수가 50kHz 인 경우 트랜지스터를 닫고 여는 주기는  $20\mu\text{s}$ 입니다. 6단계 정류를 고려할 때 40'000rpm (667Hz)에서 작동하는 1극 쌍 모터의 한 정류에 소요되는 시간은  $250\mu\text{s}$ 입니다. 이것은 정류의 한 단계 동안 PWM의 최소  $250/20 = 12.5$  사이클을 허용합니다.

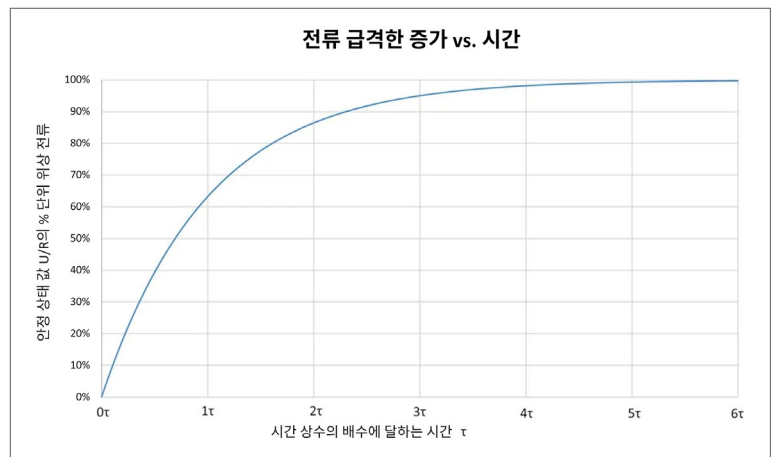


그림 9 - RL 회로의 지수 전류 상승

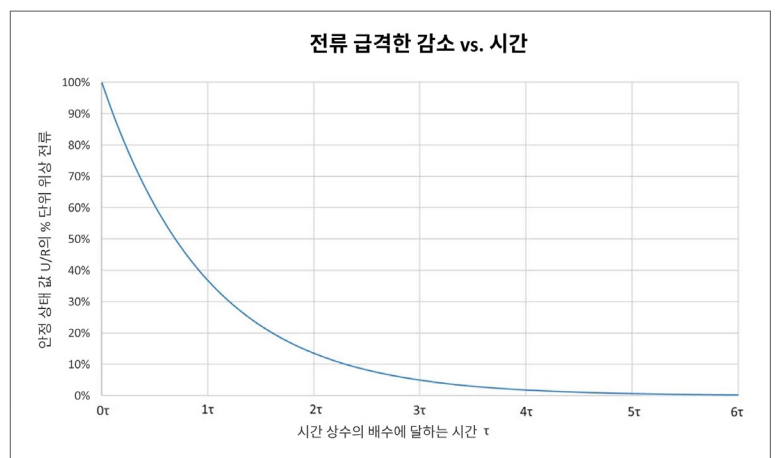


그림 10 - RL 회로의 지수 전류 감소

Portescap BLDC 모터는 수백 마이크로 초의 전기 시간 상수  $\tau$ 를 가지므로 전류는 각 PWM 사이클 동안 반응할 시간을 갖게 됩니다(아래 그림11 참조).

그러나 기계 시간 상수는 몇 밀리초 범위에 있으므로 기계 시간 상수와 전기 시간 상수 사이에는 대략 10의 계수가 있습니다. 따라서 모터 자체의 회전자의 경우, 전압이 일반적인 PWM 주파수로 전환될 때 반응할 시간이 충분하지 않습니다. 수천 헤르츠 정도의 낮은 PWM 주파수로 인해 회전자의 진동이 일어나거나 들을 수 있는 정도의 소음이 발생할 수 있습니다. 최소 20kHz를 초과하는 가청 스펙트럼 이상으로 이동하는 것이 좋습니다.

### PWM의 한계

PWM은 각 사이클에서 전류 상승 및 하강으로 이어지며, 전류의 최소값과 최대값 사이의 변화를 전류 리플  $\Delta I$ 라고 합니다(그림11 참조). 전류 리플이 높으면 문제가 될 수 있으므로 가능한 한 낮게 유지하는 것이 좋습니다.

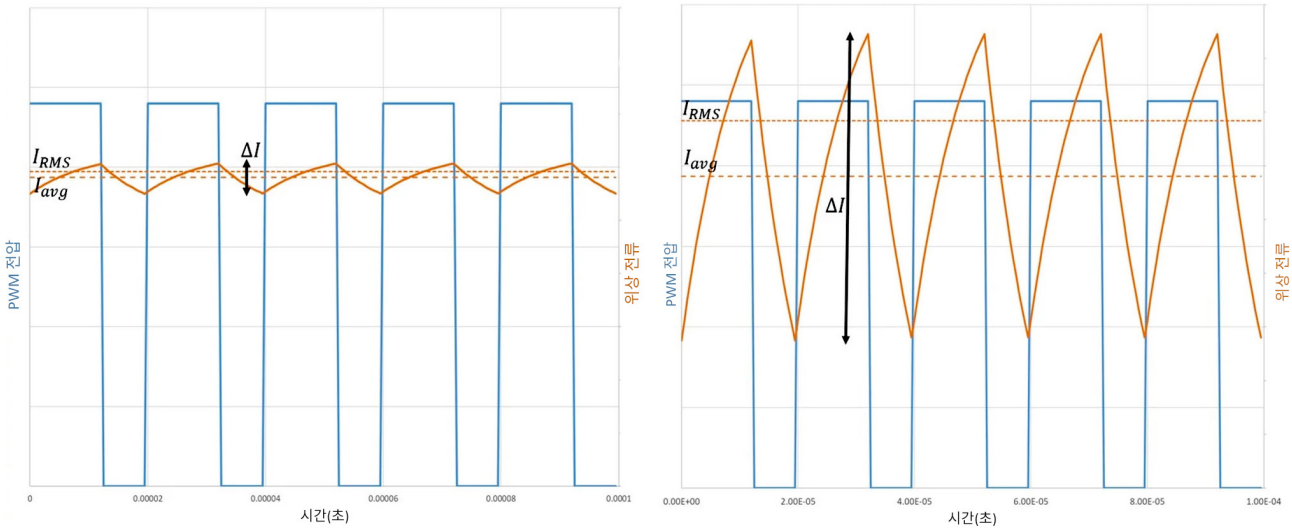


그림11 - 안정 상태에서 50kHz PWM에 의해 생성된 일반적인 전류 리플 (듀티 사이클 80%). 두 경우의 듀티 사이클이 동일하므로 평균 전류가 동일합니다. 왼쪽 그래프는 낮은 전류 리플을 나타내며 RMS 전류 값은 평균 전류 값에 가깝습니다. 오른쪽 그래프는 높은 전류 리플을 나타내며 RMS 전류 값은 평균 전류 값보다 훨씬 높습니다.

DC 모터의 토크는 다음 공식에 표시된 것처럼 평균 전류에 비례합니다.

$$T_{\text{모터}} = k_t I_{\text{avg}} \quad \text{등식 1}$$

모터 토크의 경우 평균 전류  $I_{\text{avg}}$ 를 고려해야 합니다. 평균 전류는 듀티 사이클에만 의존하며 전류 리플과 무관합니다. 그림11에서 볼 수 있듯이 평균 전류는 두 경우 모두 동일하지만 (동일한 듀티 사이클), 리플은 매우 다릅니다(전기 시간 상수가 다름).

브러시 DC 모터와 달리 BLDC 모터에는 브러시가 없으므로 고전류 리플은 수명 자체에 문제가 되지 않습니다. 전류 리플은 모터 손실에 큰 영향을 미치며 불필요한 열을 유발합니다. 전류 리플은 다음과 같이 두 가지 유형의 손실을 유발합니다.

- 줄 손실 : 전류 리플은 RMS(평균 제곱근) 전류 값을 증가시키며, 이 값은 줄 손실 계산에 고려됩니다. 리플은 평균 전류 증가와 이에 따른 토크 증가 없이 단순히 추가 가열만을 발생시킵니다. 이는 RMS 전류에 대한 함수의 제곱 변화임을 유의하십시오.

$$P_{\text{줄}} = R I_{\text{RMS}}^2 \quad \text{등식 2}$$



T가 PWM의 시간주기인 경우 ( $T = \frac{1}{f_{PWM}}$ ), RMS 전류는 다음 공식으로 계산할 수 있습니다.

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} i^2(t) dt} \quad \text{등식 3}$$

- 철 유실: 패러데이의 전자기 유도 법칙 (등식4)에 따르면, 전도 물질의 자기장 변화는 전압을 유도하고, 이후 와전류라고 불리는 순환 전류를 생성합니다.

$$u_{ind} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad \text{등식 4}$$

와전류 손실은 모터 속도의 제곱과 모터 전류의 제곱에 비례합니다. 실제 측정 결과에 따르면, 전류 리플이 높을 경우 상당한 추가 철 유실이 발생할 수 있습니다. 따라서 전류 리플을 가능한 한 낮게 유지하는 것이 중요합니다.

전류 리플을 최소화하는 지침을 정의하기 위해 전류 리플의 공식을 결정하도록 하겠습니다. 모터의 구성(그림8 참조)에서 모터 등식을 유도할 수 있습니다.

$$v(t) = U_R(t) + E(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad \text{등식 5} \quad \frac{di(t)}{dt} = \frac{v(t) - U_R(t) - E(t)}{L} \quad \text{등식 6}$$

$T_{ON}$ 와  $T_{OFF}$ 의 짧은 시간 동안 전류가 선형으로 변화한다고 가정해 보겠습니다. 따라서 다음과 같이 미분 등식을 다시 작성할 수 있습니다.

$$dt \text{ 동안} = T_{켜짐}, \quad di = \Delta I_{켜짐}, \quad v = V_{켜짐}, \quad \frac{\Delta I_{켜짐}}{T_{켜짐}} = \frac{V_{켜짐} - (U_R + E)}{L} \quad \text{등식 7}$$

$$dt \text{ 동안} = T_{꺼짐}, \quad di = \Delta I_{꺼짐}, \quad v = V_{꺼짐}, \quad \frac{\Delta I_{꺼짐}}{T_{꺼짐}} = \frac{V_{꺼짐} - (U_R + E)}{L} \quad \text{등식 8}$$

안정 상태라고 가정하면 전류 리플은 일정합니다.

$$\Delta I_{켜짐} = -\Delta I_{꺼짐} = \Delta I \quad \text{등식 9}$$

따라서 두 등식을 다음과 같이 하나로 결합할 수 있습니다.

$$U_R + E = V_{켜짐} - \frac{L \Delta I}{T_{켜짐}} = V_{꺼짐} + \frac{L \Delta I}{T_{꺼짐}} \quad \text{등식 10} \quad V_{켜짐} - V_{꺼짐} = L \Delta I \left( \frac{1}{T_{켜짐}} + \frac{1}{T_{꺼짐}} \right) = L \Delta I \left( \frac{T_{꺼짐} + T_{켜짐}}{T_{켜짐} T_{꺼짐}} \right) \quad \text{등식 11}$$

듀티 사이클 D와 PWM 주파수  $f_{PWM}$ 을 도입하여 등식을 단순화할 수 있습니다.

$$T_{켜짐} = D (T_{켜짐} + T_{꺼짐}) = \frac{D}{f_{PWM}} \quad \text{등식 12} \quad T_{꺼짐} = (1 - D) (T_{켜짐} + T_{꺼짐}) = \frac{1 - D}{f_{PWM}} \quad \text{등식 13}$$

$$\text{이에 따라: } V_{켜짐} - V_{꺼짐} = L \Delta I \left( \frac{1}{\frac{D(1-D)}{f_{PWM}^2}} \right) \quad \text{등식 14}$$

이를 통해 전류 리플  $\Delta I$ 의 공식을 도출할 수 있습니다.

$$\Delta I = \frac{D(1-D)(V_{켜짐} - V_{꺼짐})}{L f_{PWM}} = \frac{U_{PWM} D(1-D)}{L f_{PWM}} \quad \text{등식 15}$$

PWM 듀티 사이클의 함수에서 전류 리플의 변화는 그림 12에 보이는 것처럼 포물선의 형태를 가집니다.

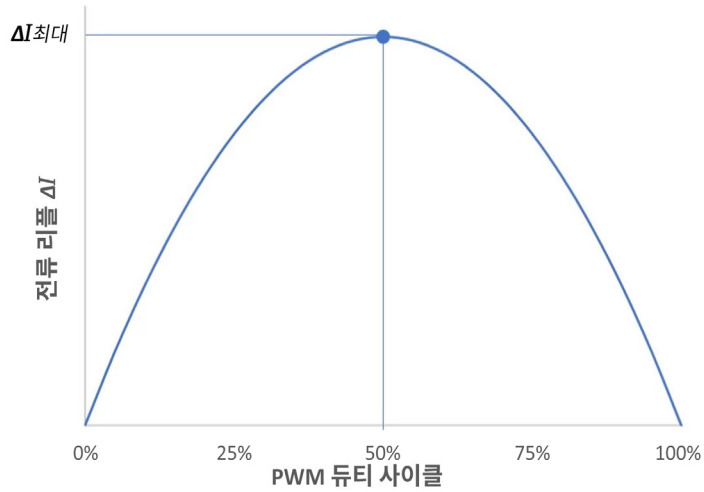


그림 12 - 전류 리플 vs. PWM 듀티 사이클

리플의 최대값은 듀티 사이클이 50%일 때 얻어지며, 이는  $D = 0.5$ 를 의미합니다.

$$\Delta I_{\text{최대}} = \frac{U_{\text{PWM}}}{4 L f_{\text{PWM}}} \quad \text{등식 16}$$

등식 15에서 영향을 미치는 몇 가지 매개 변수는 다음과 같습니다.

- 전원 공급장치  $U_{\text{PWM}}$
- 듀티 사이클  $D$
- PWM 주파수  $f_{\text{PWM}}$
- 인덕턴스  $L$

### 전류 리플을 최소화하기 위한 권장 사항

#### 전원 공급장치 전압을 줄이거나 조정하기

전류 리플은 전원 공급장치 전압에 정비례합니다. 공급 전압이 높으면 높은 속도나 더 높은 전력이 필요한 극한 작동점에 도달하는 데 유용할 수 있습니다. 그러나 응용 프로그램에 높은 속도나 전력이 필요하지 않은 경우에는 낮은 공급 전압이 전류 리플을 줄이는 데 도움이 됩니다. 더 낮은 전원 공급장치 전압으로 동일한 하중 포인트에서 작동하면 듀티 사이클이 증가하여 전류 리플이 훨씬 더 감소합니다. 일반적으로 PWM의 듀티 사이클이 50%일 때 전류 리플이 가장 높으며, 가능한 한 이에서 먼 듀티 사이클을 유지하는 것이 중요합니다(그림12).

### PWM 주파수 높이기

주파수가 높을수록 PWM의 주기가 짧아지므로 전류가 상승할 시간이 줄어듭니다. Portescap은 BLDC 모터에 대해 50kHz 이상의 PWM 주파수를 사용할 것을 권장합니다. 80kHz 이상의 PWM 주파수는 전기 시간 상수가 매우 작은 모터에 더욱 적합합니다.

### 인덕턴스 높이기

Portescap BLDC 모터는 인덕턴스 값이 매우 작습니다. 따라서 외부 인덕턴스를 추가하는 것이 좋으며, 이 경우 전류의 상승과 하강이 느려져 전류 리플이 감소하게 됩니다. 또한 Portescap 카탈로그에는 1kHz의 PWM 주파수를 가정한 인덕턴스 값이 명시됩니다. 모터 인덕턴스는 PWM 주파수에 따라 다르기 때문에 일반적인 50kHz의 PWM 주파수에서 인덕턴스는 카탈로그 값의 70%까지 낮아질 수 있습니다. 일반적으로 수십  $\mu\text{H}$ 의 추가 인덕턴스가 추가됩니다. 인덕턴스의 최적 값은 일반적으로 실험을 통해 확인됩니다. 추가적인 인덕턴스는 아래 그림13과 같이 추가해야 합니다.

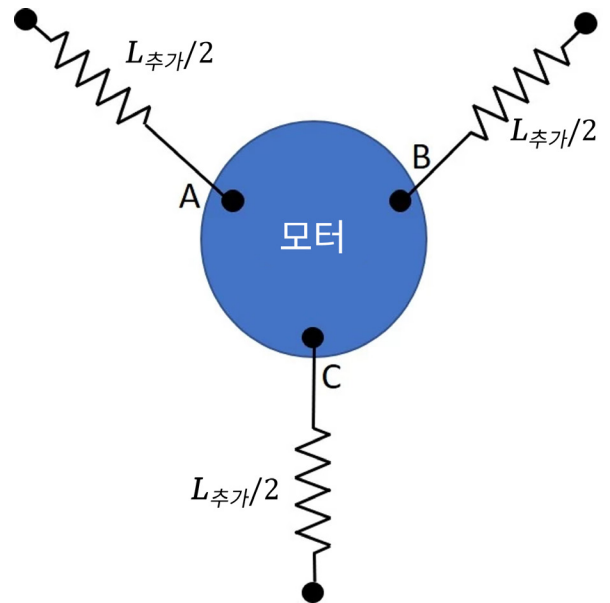


그림13 - 추가 라인 인덕턴스가 있는 브러시리스 모터

이 방법을 통해 전류 리플 문제를 해결할 수 있지만, 특히 공간이 제한된 경우 추가 인덕턴스를 통합하기가 쉽지 않을 수 있습니다. 따라서 다른 두 가지 옵션을 먼저 탐색하는 것이 더 현명합니다.

## 결론

PWM은 BLDC 드라이버에 가장 널리 사용되는 솔루션으로 많은 이점을 가지고 있습니다. 적절한 PWM 전압을 설정하고 높은 PWM 주파수를 사용하면 리플을 줄이고 추가 인덕턴스 사용을 피할 수 있습니다. 오늘날의 전자 부품 비용은 높은 PWM 주파수를 사용함으로써 간단하게 해결할 수 있습니다. 전자 설계자는 모션 시스템 개발 시, 특히 전자 장치의 크기와 무게가 문제가 되거나(예: 전자 장치가 내장된 휴대용 장치) 배터리 수명이 핵심 기준이라면(추가 인덕턴스의 내부 저항에 대한 줄 손실로 인한 추가 에너지 소멸) 이러한 매개 변수를 주의 깊게 고려해야 합니다. Portescap 엔지니어는 BLDC 모터를 통해 적합한 전자 장치를 정의하는데 도움을 드릴 수 있습니다. 지원이 필요한 경우 당사에 문의하십시오. **P**

### 연락처:

서울 강남구 영동대로 517  
아셈타워 30층 3033호  
전화: +82 2 6001 3247  
sales.asia@portescap.com  
www.portescap.kr

### 엔지니어에게 문의:

[www.portescap.com/ko-kr/문의](http://www.portescap.com/ko-kr/문의)

**Matthieu Bouat**

응용 프로그램 엔지니어

**Portescap**