

Chapter 4. 제어 모터의 기초

학습 목적

모터 사업부에서 생산하고 있는 제어모터인 BLDC 모터의 기본 원리 및 특성을 이해하자.



학습 안내

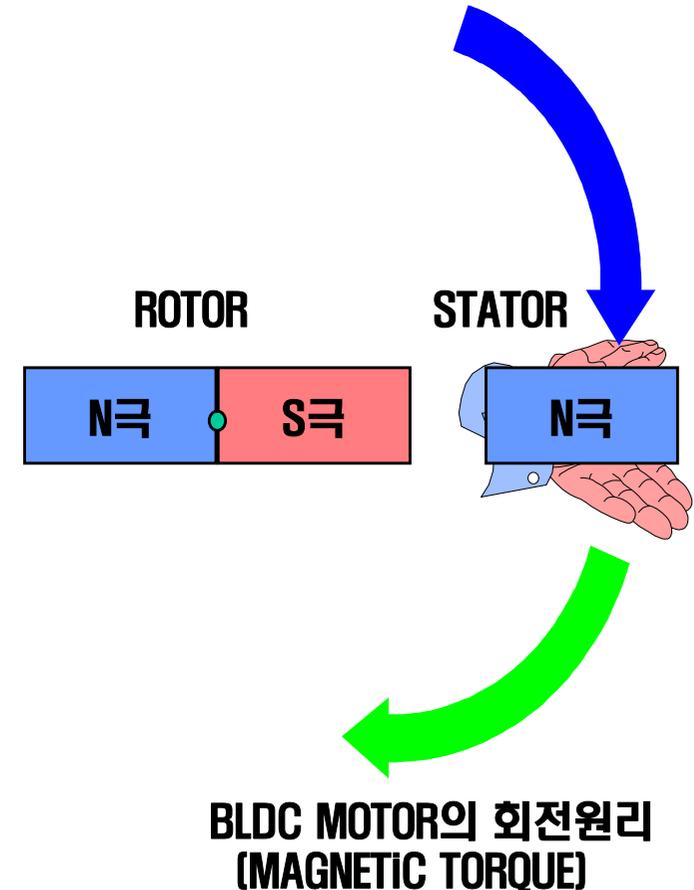
1. BLDC 모터란?
2. BLDC 모터 구동 원리
3. 제어모터 비교 및 Inverter 추이
4. 영구자석이란?



1.1 BLDC 모터란?

- 정의 : BRUSHLESS DC MOTOR (DC MOTOR와 특성이 유사)
- 일반적으로 ROTOR의 내부에 MAGNET를 가지고 있음.
- STATOR가 회전하는 자계를 발생하고, 이결과로 ROTOR가 회전함.
- 회전자계는 INVERTER의 SWITCHING 상태를 변화시켜 만들어 줌.
(모터를 구동하기 위한 별도의 DRIVE가 필요)
- NEMA Standard

A Brushless DC Motor is a Rotating Self-Synchronous Machine with a Permanent Magnet and with Known Rotor Shaft Positions for Electronic Commutation.



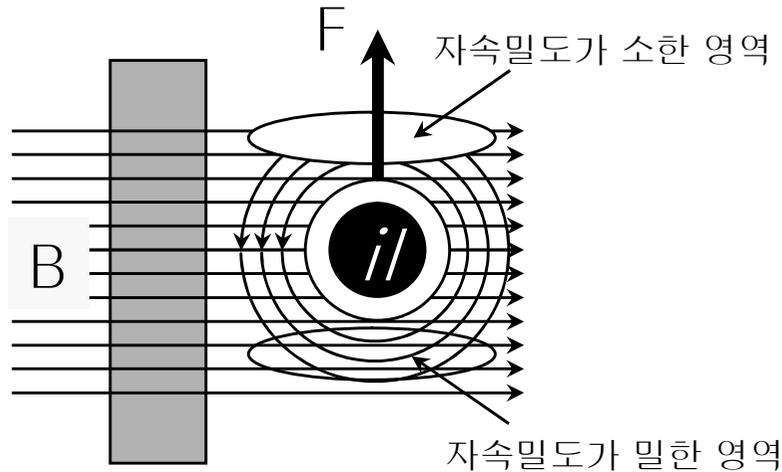
☞ Why is BLDC Motor needed?

1.2 TORQUE의 발생 원리

MAGNETIC TORQUE

$$\mathbf{F} = \mathbf{i} \times \mathbf{B} \quad (\text{플레밍의 왼손 법칙})$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}$$

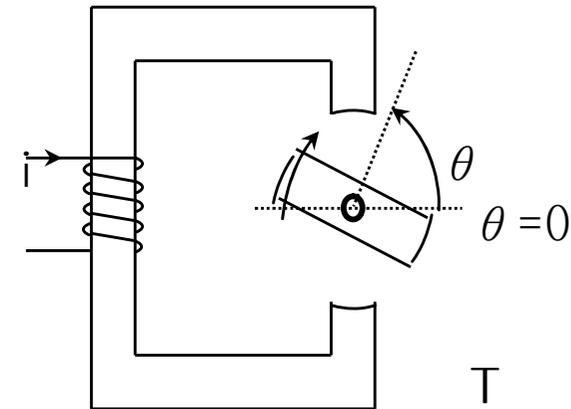


B : 공극자속밀도
i : 도체에 흐르는 전류
l : 도체의 축방향 길이(적층길이)
F : 도체 또는 자석이 받는 힘
r : 회전자 중심에서 공극 중간부까지 거리
T : Motor에서 발생시키는 축 Torque

RELUCTANCE TORQUE

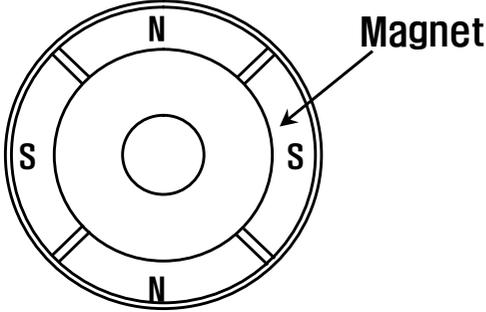
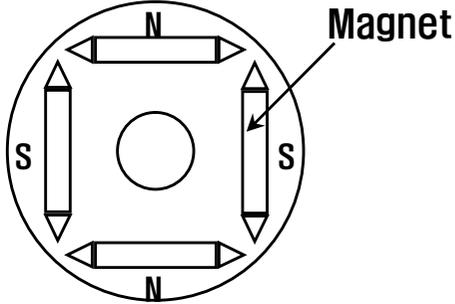
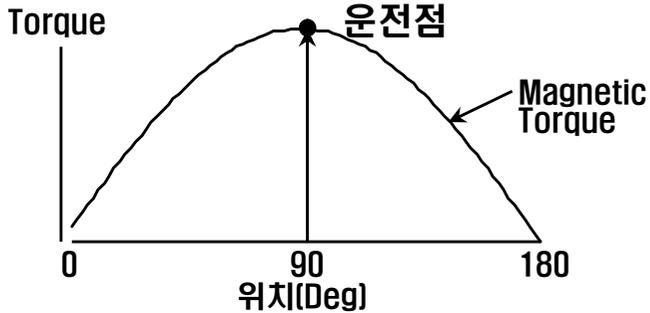
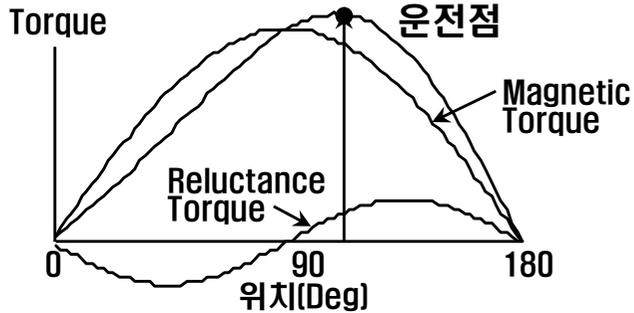
$$W_m = \frac{1}{2} Li^2$$

$$T = \frac{dW_m}{d\theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta}$$



W_m : 공극에 저장된 자기 에너지
L : 코일의 인덕턴스
i : 코일에 흐르는 전류
T : 발생 토크

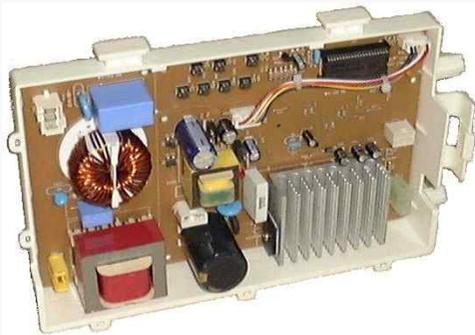
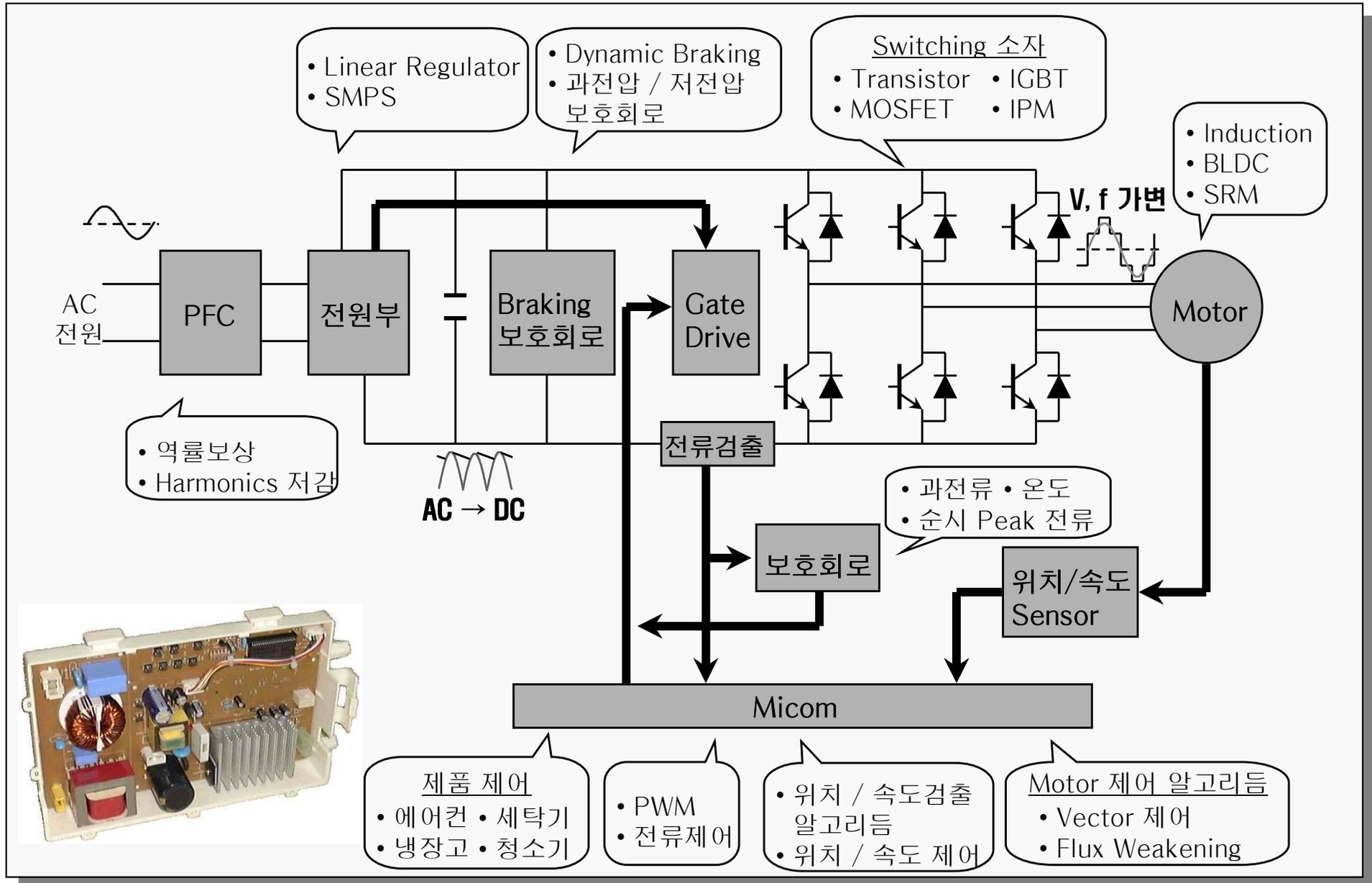
1.3 영구자석 모터 형상

구분	SPM* (표면부착형)	IPM** (매립형)
회전자 구조		
회전자 위치에 따른 Torque		
장단점	<ul style="list-style-type: none"> • Motor 제어 알고리즘이 간단 • 고속운전시 Magnet 이탈 방지용 Can 필요 → 와전류에 의한 Loss 발생 	<ul style="list-style-type: none"> • 동일전류시 Motor Torque가 큼(5~10%) • Motor 효율이 높음 (1~3%) <ul style="list-style-type: none"> -Reluctance Torque / Can 손실이 없음 • 고속운전시 유리(기구, 제어) • Motor 제어 알고리즘이 복잡

* SPM : Surface Permanent Magnet

** IPM : Interior Permanent Magnet

1.4 BLDC 모터 & 구동부 구성도



2.1 BLDC 모터의 등가회로

영구 자석을 ROTOR에 장착한 BLDC MOTOR의 등가 회로를 나타내면 다음과 같다.

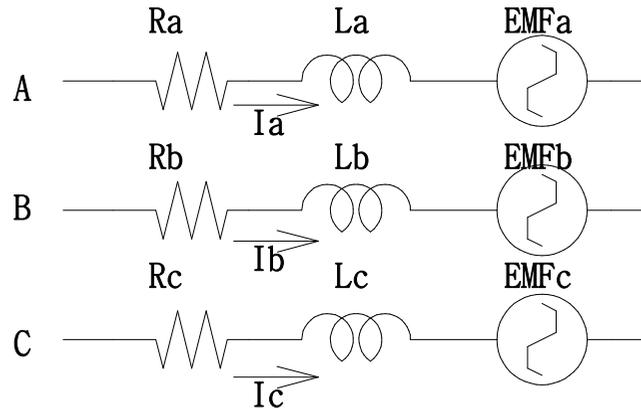


그림1. BLDC Motor의 등가회로

- R_a, R_b, R_c : 각상의 STATOR 권선 저항
- L_a, L_b, L_c : 각상의 권선 INDUCTANCE
- EMF_a, EMF_b, EMF_c : 각상의 유기 기전력
- I_a, I_b, I_c : 각상의 전류

역기전력 이란

역기전력 (Back EMF)이란 영구자석이 있는 rotor의 회전에 의하여 stator coil에 link하는 자속이 변화함으로써 발생하는 전압이다 (렌쯔의 법칙). 즉 영구자석과 도체간의 상대적인 운동이 있으면 발생하는 양이다.

각상에 인가되는 전압과 전류의 관계를 나타내는 전압식은 아래식과 같다.

$$V_a = R_a \times I_a + L_a(dI_a / dt) + EMF_a$$

$$V_b = R_b \times I_b + L_b(dI_b / dt) + EMF_b$$

$$V_c = R_c \times I_c + L_c(dI_c / dt) + EMF_c$$

식 (1)

What is BEMF? Explain it.

2.2 BLDC 모터의 Speed-Torque 특성 (1)

MOTOR가 정상상태 운전중이고, INDUCTANCE가 작다고 가정하면

$$\begin{aligned} V_{ab} &= I_a \times (R_a + R_b) + EMF_{ab} \\ &= I_a \times R_{ab} + EMF_{ab} \end{aligned} \quad \text{식 (2)}$$

식(2)와 같고, 또한 EMF가 일정한 영역에서 MOTOR 을 구동하면 통전각 내에서의 EMF는 일정하므로 EMF는 식 (3)로 표현된다.

$$EMF_{ab} = K_e \times \omega \quad [K_e: \text{EMF 상수}] \quad \text{식 (3)}$$

상기 (3)식을 (2)식에 대입하면

$$\omega = (V_{ab} - I_{ab} \times R_{ab}) / K_e \quad \text{식 (4)}$$

이다. 한편 BLDC MOTOR의 MOTOR TORQUE는 전기자 권선의 권선 전류에 비례 한다. AB상에 의해서 발생하는 MOTOR TORQUE는

$$T_e = K_t \times I_{ab} \quad \text{식 (5)}$$

이고, 식(4), (5)로 부터 MOTOR의 특성식은 식(6)과 같다.

$$\omega = (V_{ab} - T_e \times R_{ab} / K_t) / K_e \quad \text{식 (6)}$$

2.2 BLDC 모터의 Speed-Torque 특성 (2)

식(6)에서 구한 BLDC 모터의 Speed-Torque 특성을 Graph로 나타내면 다음과 같다.

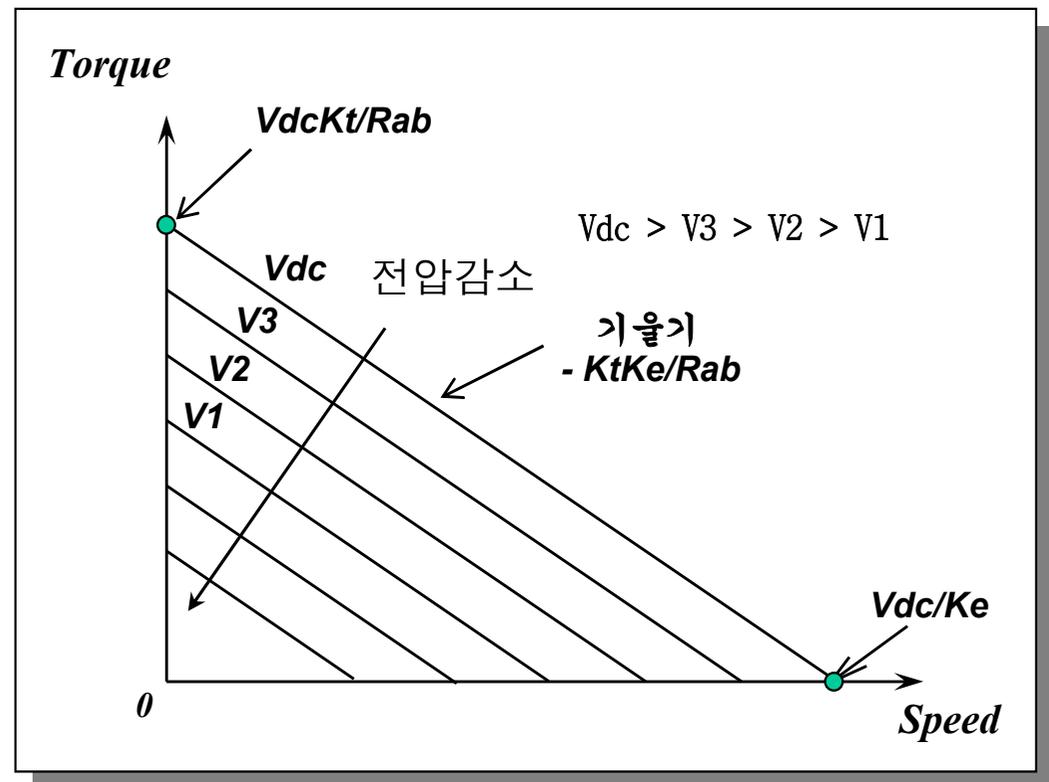
$$V = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + E$$

$$E = k_E \cdot \omega_r$$

$$T = k_T \cdot i$$

$$T = k_T \cdot \left(\frac{V - E}{R} \right) = \frac{k_T}{R} \cdot V - \frac{k_T \cdot k_E}{R} \cdot \omega_r$$

☞ BLDC Motor는 전압을 조정함으로써 속도제어를 한다.



< BLDC MOTOR의 S-T 특성 GRAPH >

2.3 BLDC 모터의 회전원리

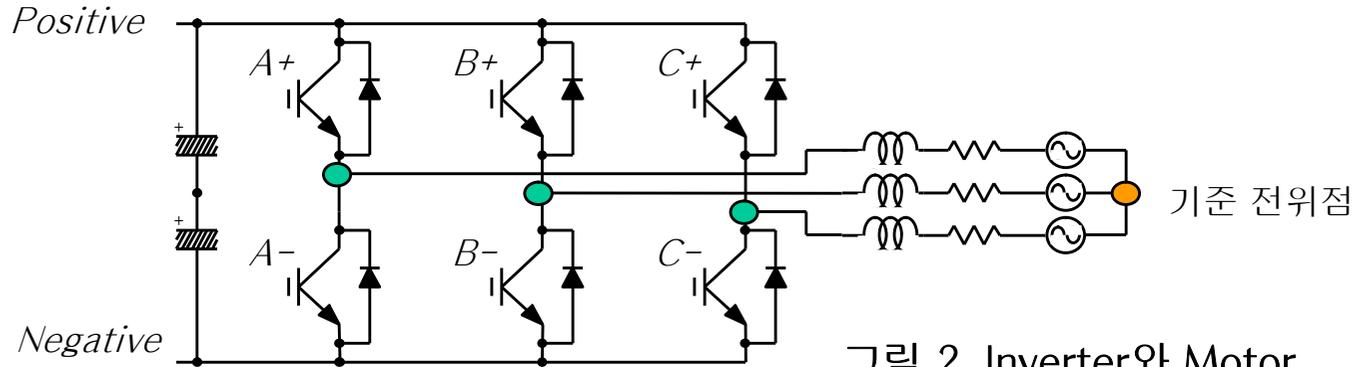


그림2는 BLDC Motor를 구동하기 위한 Inverter와 BLDC Motor의 등가 회로를 나타낸것이다. BLDC Motor는 효율적 구동과 Torque ripple을 작게하기 위해 6개의 Switching 소자중 항상 2개의 Switching 소자만 On하여 Motor를 구동한다.(이하 2상 통전 방식).

Motor에 전압을 인가하기 위해서, On되는 2개의 Switching 소자중 하나는 DC Link의 Positive, 또다른 하나는 DC Link의 Negative 에 접속된 소자가 On되며, 이러한 경우의 수는 총9가지이다.

그러나, 이중 3가지는 같은상이 On되는 경우 이므로, 이경우를 제외하면 모두 6가지의 Switching 상태가 존재한다.

6개의 Switching 상태는 표1과 같다.

Switching 상태	A+	A-	B+	B-	C+	C-
①	On	Off	Off	On	Off	Off
②	On	Off	Off	Off	Off	On
③	Off	Off	On	Off	Off	On
④	Off	On	On	Off	Off	Off
⑤	Off	On	Off	Off	On	Off
⑥	Off	Off	Off	On	On	Off

2.3 BLDC 모터의 회전원리

각 Switching 상태에 따른 Inverter의 연결 상태 및 Motor의 전류를 그림3에 나타내었다. Switching 상태를 ① ~ ⑥으로 순차적으로 바꾸어 감에 따라 회전하는 회전자계를 만들어 줄 수 있다. 이렇게 만들어진 Stator의 회전 자계와 Rotor의 영구자석에 의한 자계의 상호 작용에 의해 BLDC Motor는 회전하게 된다.

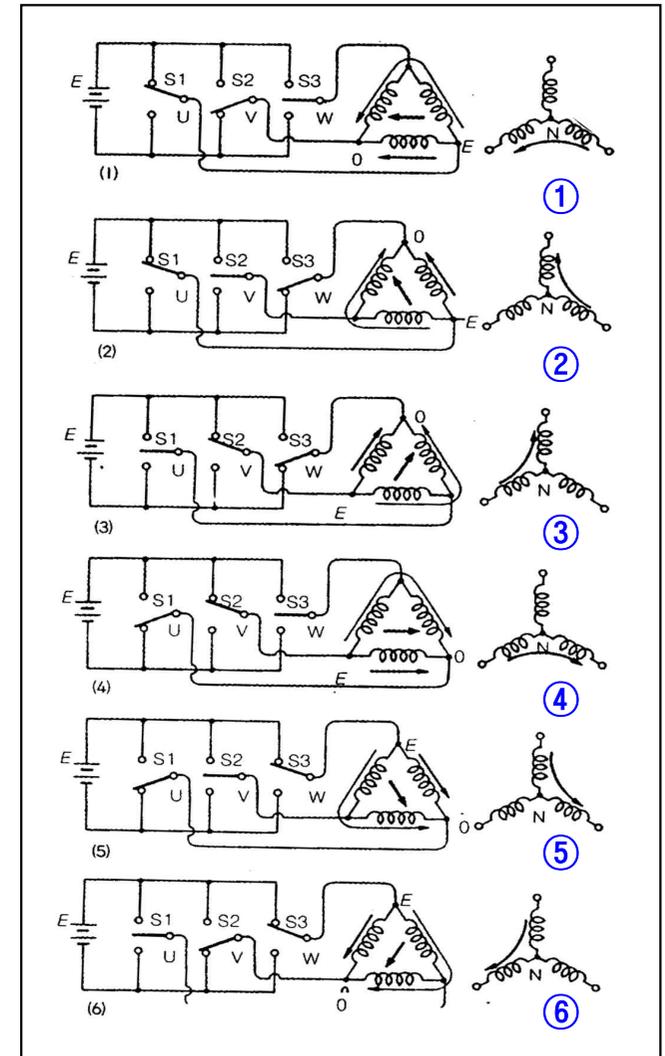


그림 3. 회전 자계 발생 원리도

2.4 위치센서의 필요성

BLDC Motor의 Magnetic Torque식은 다음과 같다.

$$T = (I_a \times EMF_a + I_b \times EMF_b + I_c \times EMF_c) / \omega \quad \text{식 (7)}$$

윗식 (7)에서 알 수 있는 바와 같이 Motor가 최대의 Magnetic Torque를 발생하기 위해서는 각상의 전류 및 각상의 EMF가 서로 위상차가 없을때 최소 전류로 최대 Torque가 발생하게된다.

EMF와 전류의 위상차가 없도록 운전 하기 위해서는 Motor의 EMF의 위상을 알아야 한다. EMF는 Rotor의 영구 자석에 의한 Stator 권선에의 Flux linkage의 미분식으로 표현 되므로, Stator에 Sensor를 취부하여 EMF의 위상을 알아내는 방법을 사용한다. 앞에서 언급한 EMF와 전류의 관계를 나타내면 그림4와 같다.

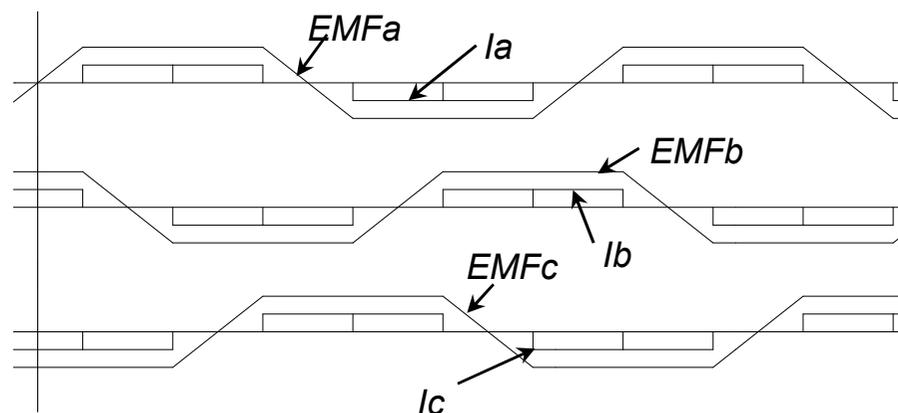


그림4. EMF 및 전류의 관계

👉 What is advanced angle?

2.5 위치센서와 스위칭 소자의 LOGIC

Switching 상태는 총 6가지 경우의 수가 있으므로, 적어도 3개의 개별 Sensor가 필요하게 된다. 표3은 개별 Sensor와 스위칭 소자간의 Logic 관계를 나타낸 것이다.

Switching state	Sensor Ha	Sensor Hb	Sensor Hc	Switch A+	Switch A-	Switch B+	Switch B-	Switch C+	Switch C-
①	H	H	L	On	Off	Off	On	Off	Off
②	H	L	H	On	Off	Off	Off	Off	On
③	H	L	L	Off	Off	On	Off	Off	On
④	L	H	H	Off	On	On	Off	Off	Off
⑤	L	H	L	Off	On	Off	Off	On	Off
⑥	L	L	H	Off	Off	Off	On	On	Off

2.6 전압제어의 필요성

Motor의 동작점은 부하의 Speed Torque 특성과 Motor의 Speed Torque 특성의 평형점에서 결정된다. 만약 부하조건이 변화하여 새로운 평형점으로 동작점이 이동하면 Motor의 속도는 변화하게 된다. 이때 Motor의 속도를 일정하게 유지 시키기 위해서는 변경된 부하조건에서 평형점이 원하는 속도에서 이루어 지도록 Motor에 인가되는 전압을 제어 하여야 한다.

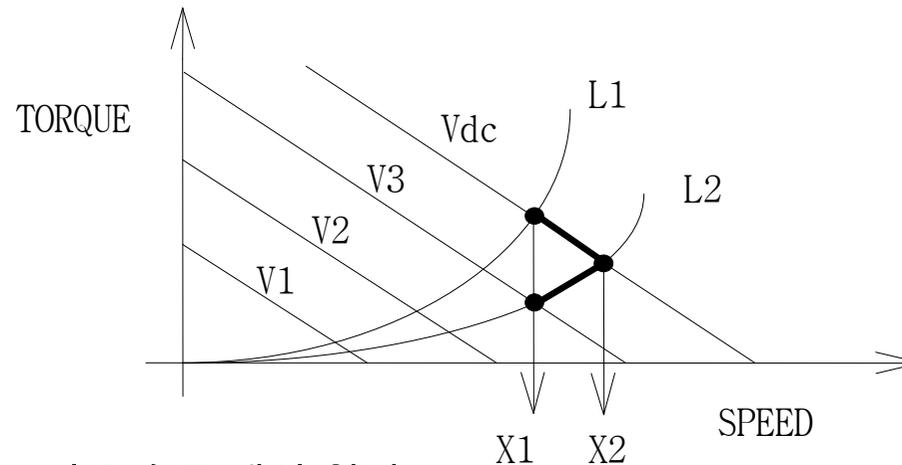


그림 5 속도 제어 원리

그림5에서 유로부하의 부하 조건이 L1 에서 동작 중이고 Motor에 최대 전압 Vdc을 인가 하고 있다면 Motor의 속도는 X1으로 결정되어 동작 한다. 부하 조건이 L2로 변경 되면 평형점은 이동하여 Motor의 속도는 X2로 동작한다. 이 부하 L2에서 원하는 속도 X1으로 동작 시키기 위해서는 Motor에 인가되는 전압을 Vdc에서 V3로 변화시키면 평형점이 이동하여 Motor의 속도는 X1에서 동작되게 된다. 이와 같이 Motor에 인가되는 전압을 제어하면 Motor의 회전 속도를 제어할 수 있다.

2.7 Inverter를 이용한 전압제어 (1)

Inverter는 일정 크기의 직류 전압을 교류로 변환한다. 이때 Inverter는 구형파 형태의 출력 전압을 가지며, Motor는 전기적 또는 기계적으로 Low-Pass Filter의 특성을 가짐으로 전압이 단속적으로 인가 되더라도 Motor에 흐르는 전류는 연속 전류의 형태를 갖는다.

Inverter는 그림6과 같이 Motor에 전압이 인가 되는 전압 인가 Mode와 전압이 인가되지 않는 Free Wheeling Mode로 구분된다.

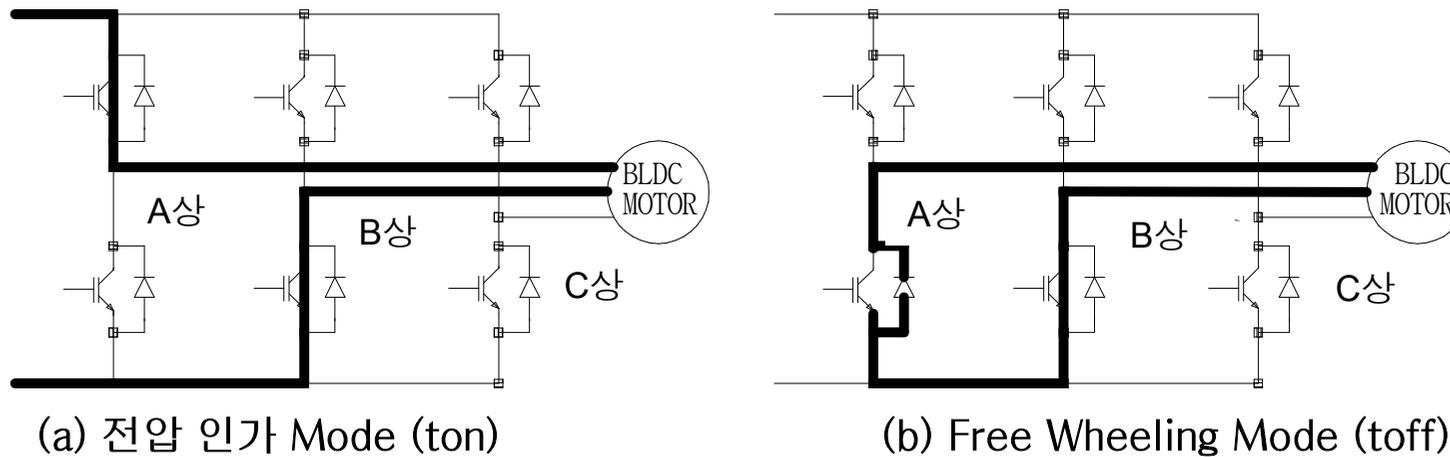


그림6 Inverter를 이용한 전압 제어

2.7 Inverter를 이용한 전압제어 (2)

전압 인가 mode시 전압식은

$$V_{dc} = R_{ab} \times i_{ab} + L_{ab} (di_{ab} / dt) + EMF_{ab}$$

가 되고 Inductance에 양의 전압이 인가되어 전류는 증가한다.

Free wheeling Mode시 전압식은

$$0 = R_{ab} \times i_{ab} + L_{ab} (di_{ab} / dt) + EMF_{ab}$$

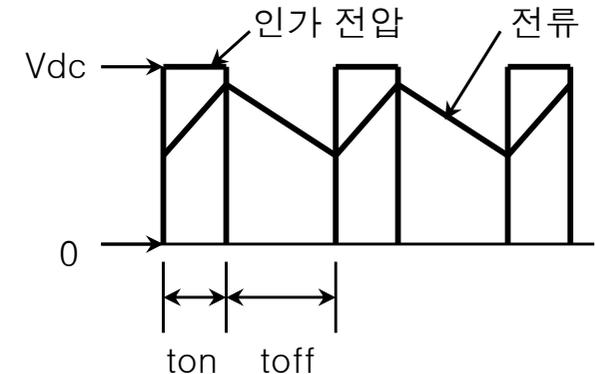
가 되고 Inductance에 음의 전압이 인가되어 전류는 감소한다.

이때 Motor로 인가되는 전압 V_{ab} 는 식(8)과 같다.

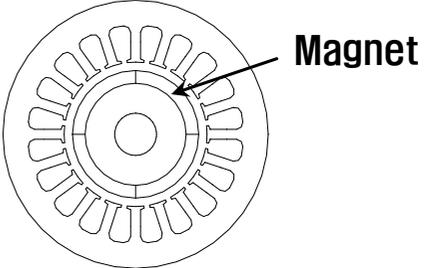
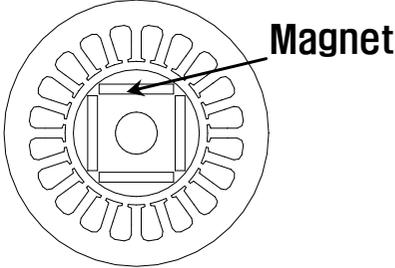
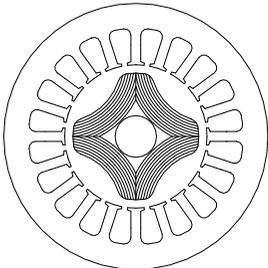
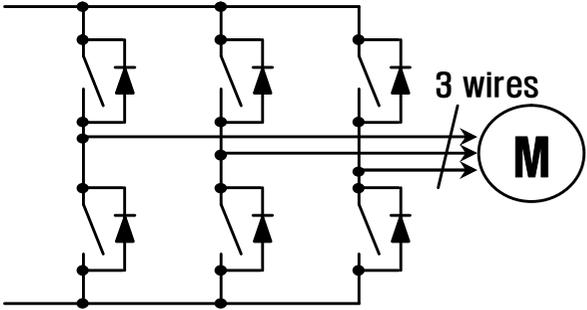
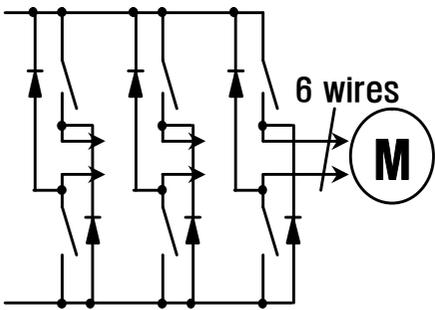
$$V_{ab} = V_{dc} \times t_{on} / (t_{on} + t_{off}) \quad \text{---식(8)}$$

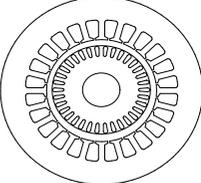
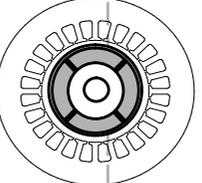
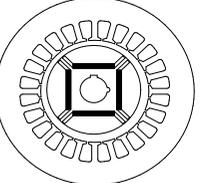
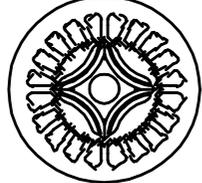
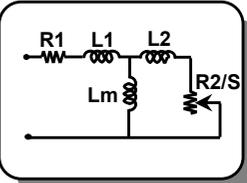
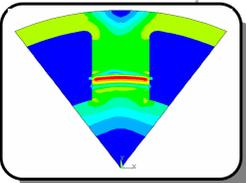
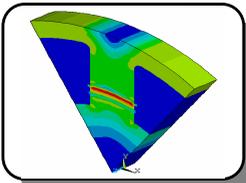
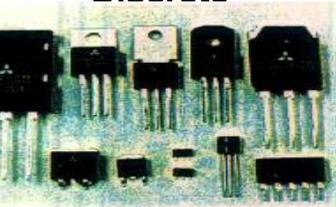
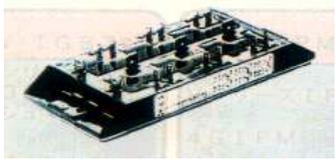
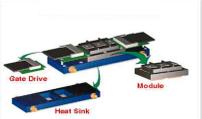
여기서 $t_{on} + t_{off}$ 와 t_{on} 의 비를 제어하여 모터에 인가되는 전압을 제어한다.

$t_{on} + t_{off}$ 는 PWM 주기를 말하며, 상기의 상대비를 제어하는 방법으로 일반적으로 사용되는 방법은 PWM 주기를 고정하고, t_{on} 을 제어하는 방법이다.



- Pulse Width Modulation (PWM)
 - Motor에 인가되는 전압의 On,Off시간을 바꾸어 전압을 제어하는 방법
- Pulse Amplitude Modulation (PAM)
 - Motor에 인가되는 평균전압을 제어하는 방법

		BLDC (SPM)	BLDC (IPM, Hybrid)	Synchronous Reluctance	Switched Reluctance
MOTOR	구조				
	장점	저소음 고효율 저속 고평토크 특성 - 저속 특성우수		간단한 Rotor 구조 가능 온도 특성 우수 고속 운전가능	
	단점	飛散 방지캔(고속운전) 필요 제조공정상불리 (자석 취부 및 着磁) 온도특성이 나쁨 (자석의 減磁)		누설에 의한 낮은 효율 (새로운 회전자 형상 설계)	
DRIVE	구조				
	장점	상용화된 제어 IC 및 스위칭Module 존재			Short through fault 없음 한상이 파괴되어도 운전 가능 여러제어 Topology 적용 가능
	단점	Short through fault 파괴 가능성 한상이 파괴되면 운전 불가능			상용화된 제어 IC 및 스위칭 Module 없음

	'80	'90	'00	'05	Key Features	
Motor 기술	유도기 	BLDC(SPM) 	BLDC(IPM) 	Syn.RM [※] 	고효율 Low Cost	
	효율 85% / Cost (유도기 100% 기준)	89 / 130	91 / 120	88 / 110		
Motor Control 회로 Topology	等價 회로법 	2차원 자계해석 	3차원 자계해석 	차세대 자계해석 3차원 자계해석 + 최적형상 출력	고효율 (System Matching) 저소음화	
	정속 제어	V/F 제어	구형파 제어 Sine파 제어	Hybrid (PWM + PAM)		
Device Application	Discrete 	Power Module 	IPM 	SIM 	PEBB 	Compact 고신뢰성
	SIZE (Discrete 100% 기준)	80	50	30	30	

Syn.RM : Synchronous Reluctance Motor
 SIM : System in Module

PEBB : Power Electronic Building Block

4.1 영구자석의 역사

- B.C 600 Thessaly 지역의 Magnesia에서 천연자석으로 발견되어 'Magnes'라고 부르고 항해용 나침반에 사용.
- 1600년 William Gilbert 지구가 하나의 자석인 것을 발견.
鋼棒을 열간 단조한 후 적열 상태에서 지구의 자장방향으로 배치, 냉각시키면 자석이 됨을 발견함.
- 1820년 Oersted
전류와 자장과의 관계를 발견, 전자석의 발전에 기여함.
- 1901년 Hansler
ALNICO Magnet의 시초.(Cu, Mn, Al 합금강 개발)
- 1917년 Honda
高 Co 炭素鋼 발명, 당시의 Cr강, W강보다 보자력이 4배 이상이 되어 자기적 성능을 비약적으로 향상시킴.
- 1931년 Kato, Takai
철 Co 혼합물 자석을 개발.
- 1932년 Mishima
Al-Ni-철 자석(Alni) 개발, MK 강으로 명명함
- 1939년 Jonas
Alni에 Co를 첨가한 ALNICO 자석을 개발
- 1952년 Philips社
현재의 Ceramic 또는 Ferrite Magnet로 발전시킴.
- 1968년 Raytheon社
Rare-Earth , Sm-Co 자석개발
- 1980년대초 미국 GM社, 일본 住友 특수금속
Nd-Fe-B 개발

자석(磁石)이라는 말은

- ▷ 서양 : 產地 이름 (Magnesia) 에서 유래
- ▷ 동양 : 인간미를 느낄 수 있는 자석(慈石)이라는 말이 먼저 사용되다가 나중에 產地명 (磁絃) 으로 바뀜

4.2 영구자석의 종류

구 분	ALNICO Magnet	Ferrite Magnet	Rare-Earth Magnet
재료/가공	Cast ALNICO Sinterd ALNICO Fe-Cr-Co	Ba系 Sr系 Wet / Dry	Sm-Co系 Nd-Fe-B系
Br (G) bHc (Oe) BHmax (MG·Oe)	7500 ~ 11000 1350 ~ 2150 4.8 ~ 11.0	3800 ~ 4400 1800 ~ 3900 2.7 ~ 4.6	10000 ~ 11500 5700 ~ 10500 25 ~ 30
Curie Point 온도계수 밀도 Cost	850 ~ 890°C -0.016 %/°C 6.8 ~ 7.3 gr/cm ³ 150 %	450 ~ 460°C -0.2 %/°C 4.6 ~ 5.3 gr/cm ³ 100 %	710 ~ 820°C -0.035 %/°C 8.3 ~ 8.5 gr/cm ³ 200 %
특 징	<ul style="list-style-type: none"> •잔류자속밀도가 높다. •온도에 대한 안정성 高 •가공성이 나쁘다. •취성이 강하다. 	<ul style="list-style-type: none"> •ALNICO Magnet 대비 잔류자속밀도가 낮고 보자력이 높다. •온도계수가 ALNICO에 비해 크다 (약 10배 정도). •가격이 저렴하다. •경도가 높다. 	<ul style="list-style-type: none"> •Hc, Energy 積이 높다. → 소형 경량화 가능 •온도에 대한 안정성이 나쁘다. •가공성이 나쁘다. •취성이 강하다. •高價 •산화되기 쉽다.

4.3 자기이력 곡선

그림7은 충분히 큰 자계를 인가했을 경우 Hard magnet material에 대한 Hysterisis Loop이다. 그림에서 a 점은 물질 내부 거의 전부의 구성요소가 가해진 자계 방향으로 자화된 상태이다. a점을 지나서 부터는 H의 증가에 따라 B는 $B = \mu_0 H$ 에 따라서 증가한다. 즉 H가 아주 큰 값이면 H증가에 따른 B의 증가는 점점 더 작아지게 되고, 결국 B-H Curve의 기울기는 μ_0 에 근접하는 데, 이것을 포화 상태라 한다.

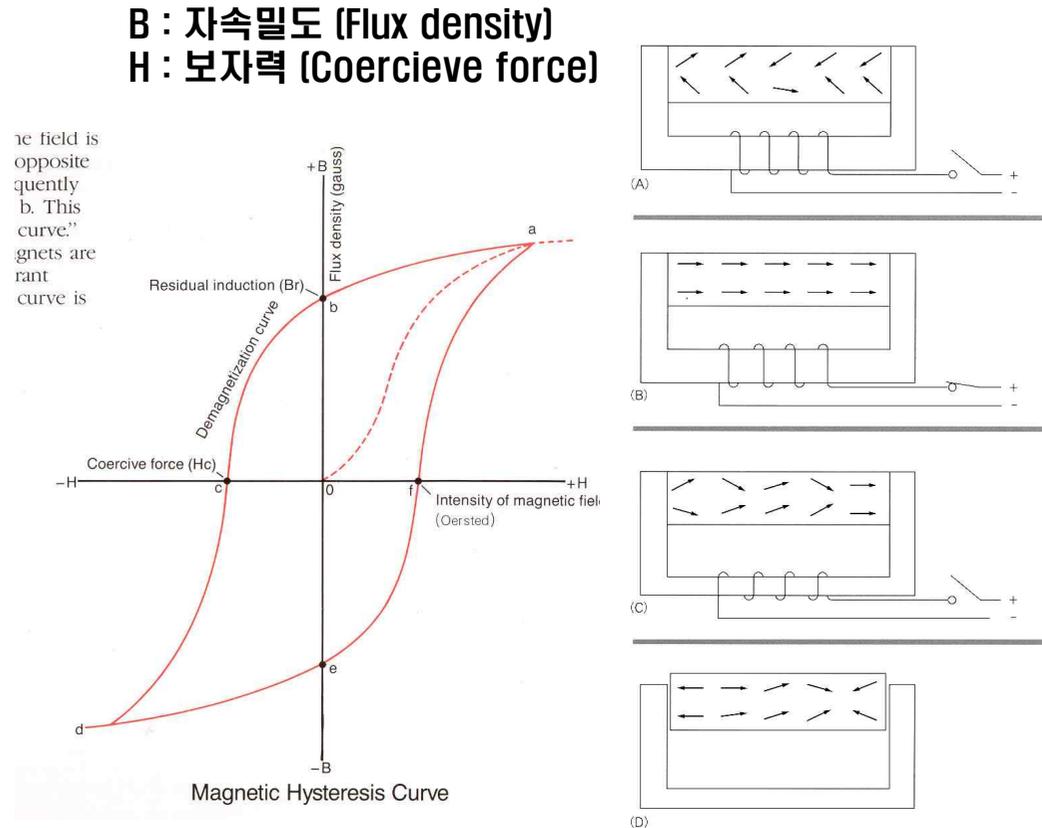
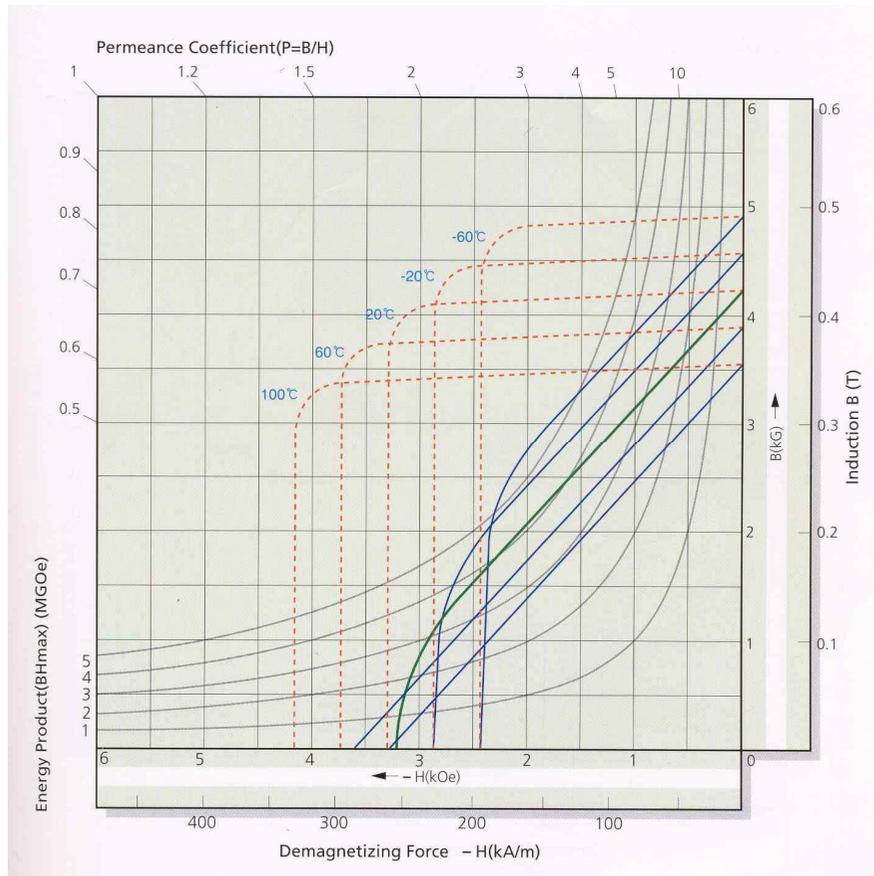


그림7 Hysterisis loop

👉 Explain about hysteresis loop.

4.4 자기이력 곡선

영구자석의 사용은 Hysterisis loop 중에서 2상한 영역, 감자곡선 상에서 이루어진다.



<용어 정의>

- ☞ Magnetization :
- ☞ Magnetizer :
- ☞ Magnetizing Yoke :
- ☞ Demagnetization :
- ☞ Demagnetizer :
- ☞ Demagnetizing Yoke :
- ☞ Gauss meter :

그림8 감자 곡선

연습 문제

1. BLDC 모터의 장/단점에 대해 간략히 설명하시오.

- 장점 :** MOTOR 내부에 에너지 소스(영구자석)가 있으므로 모터의 효율이 높다.
 인버터에 의한 전압 제어를 통해 부하변동에 따른 속도제어가 용이하다.
단점 : 인버터를 포함하므로 가격 및 제조 비용이 높다.
 유도기에 비해 제조공법이 다소 복잡하다.

2. BLDC 모터에 사용되는 기본적인 토크는 무엇이 있나요?
 (MAGNETIC TORQUE, RELUCTANCE TORQUE)

3. 영구자석이 있는 ROTOR의 회전에 의하여 STATOR COIL에 LINK하는 자속이 변화함으로써 발생하는 전압을 무엇이라 하나요? (유기기전력 OR 역기전력)

4. BLDC 모터의 등가회로상에서 속도와 토크의 관계식을 도출하세요.

$$\omega = (V_{ab} - T_e \times R_{ab} / K_t) / K_e$$

5. 영구자석의 3가지 종류중 가전제품에 가장 보편적으로 적용되는 것은?

- ① ALICO MAGNET ② FERRITE MAGNET ③ RARE-EARTH MAGNET ④ PLASTIC MAGNET

6. 영구자석의 특성을 나타내는 곡선을 무엇이라 하나요?
 (자기이력곡선 OR HYSTERISYS LOOP)