AC Drive의 이해

2023. 3.

참조자료 : [Danfoss] Facts Worth Knowing about AC Drives

posco
포스코DX

Contents

1. 개요

AC Drive 의미

고정 주파수의 교류(AC)를 임의의 주파수로 변환하는 전자 장치 (Main 전원의 고정된 전압과 주파수를 임의의 전압과 주파수로 변환)

AC Drive의 다른 용어

모터의 속도를 제어/변경하는 시스템의 다른 용어

VVVF	Variable Voltage Variable Frequency
FC	Frequency Converter
VSD	Variable Speed Drive
ASD	Adjustable Speed Drive
AFD	Adjustable Frequency Drive
VFD	Variable Frequency Drive

Speed Control 사용 목적

- 에너지 절감 및 시스템 효율성 향상
- 프로세스 요구에 일치된 드라이브의 속도 및 토크 출력
- 작업 환경 개선
- 기계에 대한 기계적 스트레스 감소 (설비 수명 연장)
- 낮은 소음 수준 (예: 팬 및 펌프)

AC Drive 관련 분야별 특징

※ AC Drive 적용으로 부하와 무관하게 구동 기계의 속도 및 토크를 ±0.5%의 정확도로 조정 가능

- Motor Maker : 모터의 고효율 달성을 위해 다양한 개념 사용
- AC Drive Maker : 시운전 중 선택 가능한 다양한 알고리즘 내장
- Commissioner : 모터 유형별 사용 데이터 및 측정 데이터 기반으로 Drive 시운전

절감 효과 (비용)

※ ZVEI (독일 전기전자제조 협회)에 의하면

- 고효율 모터 사용시 : 약 10% 절감효과
- 가변 속도 사용시 : 약 30% 절감효과
- **시스템 최적화시 : 최대 60%의 잠재적 절감효과**

AC Drive & AC Motor 적용시 장점

1. DC 모터나 권선형 모터의 속도 제어에 비하여 AC 모터 사용 시

- 모터의 구조가 간단하며 Compact
- 보수 및 점검이 용이
- 모터가 개방형, 전폐형, 방수형, 방식형 등 설치 환경에 따른 보호 구조가 가능
- 높은 부하 역률 및 효율

2. 일반적인 Fan, Blower용 Damper 및 권선형 모터 또는 기계적 무단 속도 제어방식 대비 AC Drive 사용 시

- 순간정전, 부하단 단락 등에 대한 뛰어난 내구성
- Trip 원인 제거 후 자동적으로 재 기동 할 수 있는 기능 제공
- 간단한 주변회로 및 뛰어난 조작성
- 다수의 보호 기능 및 자기진단 기능 제공으로 고장 원인 식별 용이
- 광범위한 속도제어 범위
- 다단속도 조정 등의 기능으로 조작이 간단, 생산성 향상 및 품질의 극대화 기대
- 작은 기동 전류 (직입 기동 시 전류: 정격 전류의 5~6배)
  기동 전류에 따른 전압 강하가 없어, 변압기 및 부속 설비 용량 증가 최소화
- PLC 등의 연동 운전에 의한 공장 자동화 가능
- Fan, Pump, Blower와 같은 부하에 적용 시 높은 에너지 절감 효과
- Crane, Hoist 및 Conveyer 등에 적용 시 부드러운 기동/정지 가능, 기계 및 제품 등 파손 방지
- 높은 운전 효율

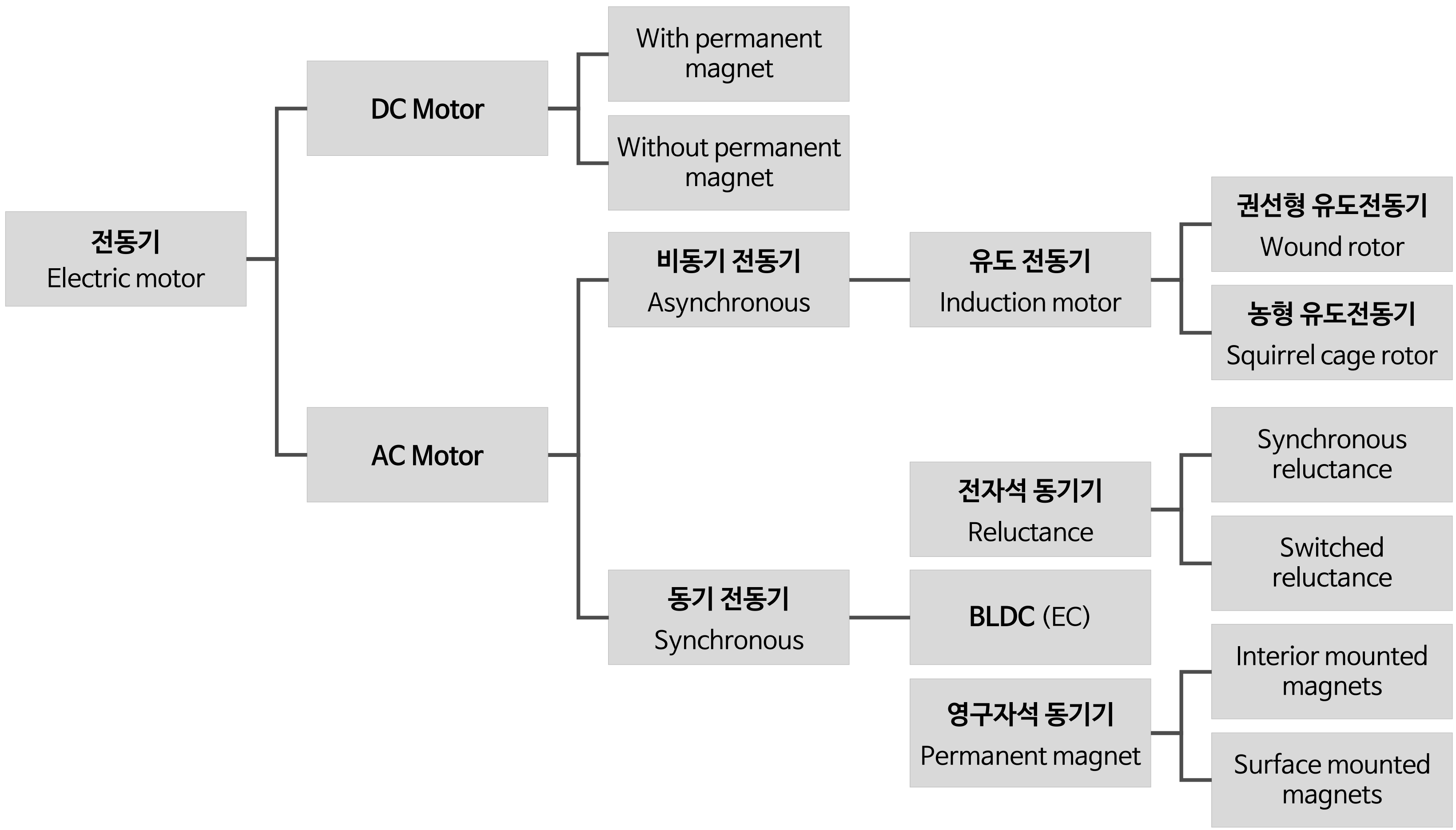
2. Electric Motors

☞ **전동기 : 전기에너지를 기계에너지로 변환**하는 전기기계 장치

발전기 : 기계에너지에서 전기에너지를 생산

Motor 종류

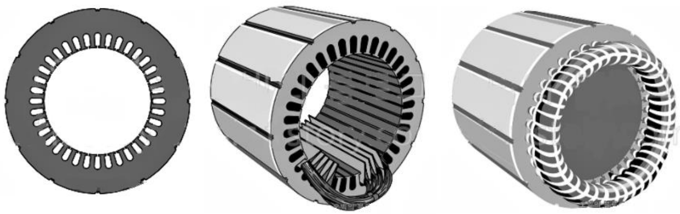
※ 견고성, 신뢰성, 크기, 에너지 효율 및 가격 등 다양한 요구에 의해 다양한 유형의 전기 모터가 개발됨



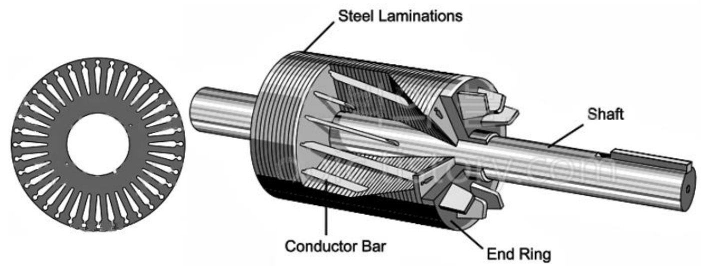
2.1 Motor 이해

Motor 구조

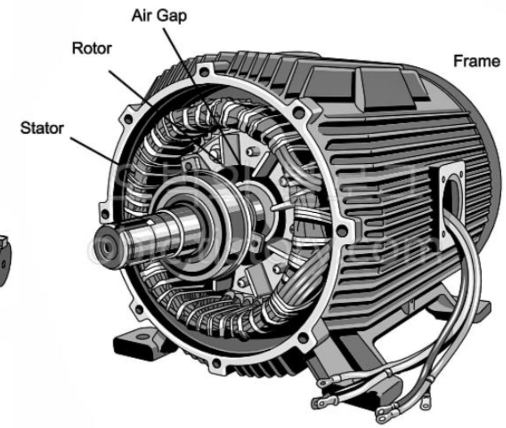
※ 농형 유도전동기



〈 Stator 〉



〈 Rotor 〉



Stator

- Core(적층된 Lamination)에 Coil을 Winding한 고정 부분
- 전원이 직접 공급되며, 전원 인가 시 전자석이 됨.

Rotor

- Core(적층된 Lamination)에 Coil 대신 Conductor Bar가 삽입된 회전 부분

Power and Torque

Power [kW] : 모터의 정격 출력 **(1 hp = 0.746 kW, 1 kW = 1.341 hp)**

Torque [Nm] : 모터 Shaft의 회전 강도**(1N·m=0.102kgf·m, 1kgf·m=9.807N·m)**

$$P = T \times \frac{(2 \times \pi \times n)}{60 \times 1000} \approx \frac{(T \times n)}{9550}$$

$$T = \frac{P \times 9550}{n} = \frac{\left(\sqrt{3} \times V_{LL} \times I \times \cos\theta \times \eta\right) \times 9550}{120 \times f/p \times (1 - s)}$$

P=Power [kW], T=Torque [Nm], n=Speed [RPM]
p=모터 극수, V_{LL}=출력 선간전압 [V], I=출력 전류 [A]
η=모터 효율, cosθ=모터 역률

〈 The typical industrial standard rated output power in [kW] and [hp] 〉

kW	0.18	0.25	0.37	0.55	0.75	1.10	1.50	2.20	3.00	4.00	5.50	7.50	11.0
hp					1.00		2.00	3.00		5.00	7.00	10.00	15.0
kW	15.0	18.5	22.0	30.0	37.0	45.0	55.0	75.0	90.0	110.0	132.0	160.0	200.0
hp	20.0		30.0	40.0	50.0	60.0	75.0	100					

AC and DC Motor 비교

DC Motor

- 회전자 : 전기자(armature), 정류자(commutator), 브러쉬(brush)로 구성
  고정자 : 계자극(field poles), 프레임(frame)으로 구성
- 고정자 권선과 회전자 권선에 전압 인가로 발생되는 자기장에 의해 회전자 회전
- 장점 : 속도제어가 간단 (회전자의 속도에 영향을 미치는 DC 전압을 공급/제어)
  단점 : 브러쉬가 기계적으로 마모되므로 주기적인 유지 보수 및 교체 필요

AC Motor

- 고정자(Stator)와 회전자(Stator)로 구성
- 고정자 권선에 AC 전원 공급으로 발생되는 회전 자기장 변화로 회전자 회전
- DC 모터에 비해 훨씬 간단하고 견고
- 일반적으로 고정된 속도 및 토크 특성을 갖는다.

발전기와 Motor 원리

※ 모터는 자기장과 전류 전달 도체의 상호작용에 의해 힘을 생성한다.

발전기

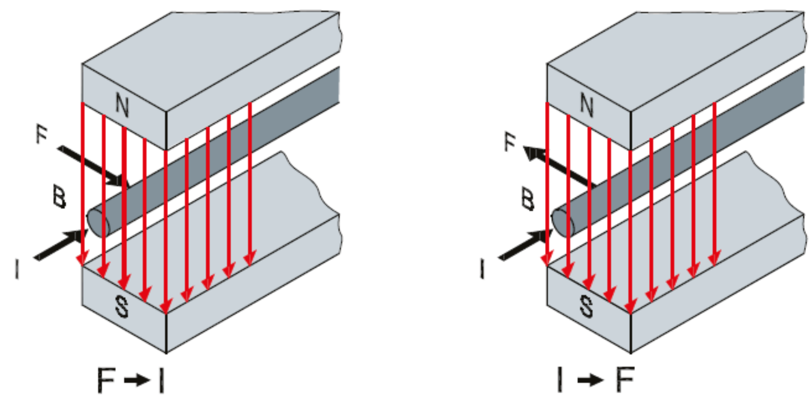
- 힘(F)이 자기장(B)을 가로질러 움직이는 도체에 가해질 때 전압이 유도된다.
  도체가 폐회로의 일부인 경우 전류(I)가 발생

모터

- 도체에 흐르는 전류에 의해 움직임이 발생됨에 따라 힘(F)이 발생

자기장

- 전자기 유도 원리에서 자기장은 영구 자석에 의해 발생
  모터에서는 고정자 권선에 전압 인가로 자기장 생성되며, 자기장의 영향을 받는 도체는 회전자



a) Generator principle **b)** Motor principle

〈전자기 유도 원리〉

Pole, Synchronous/Asynchronous Speed

$$n_0 = \frac{f \times 120}{p}$$

f = frequency [Hz], n_0 = Synchronous Speed [RPM], P = Pole number

Pole number	2	4	6	8	12
n_0 [min^{-1}] (50Hz supply)	3000	1500	1000	750	500
n_0 [min^{-1}] (60Hz supply)	3600	1800	1200	900	600

- Synchronous : rotor speed = rotating field speed
- Asynchronous : slip 영향으로 rotor speed < rotating field speed 현상 발생

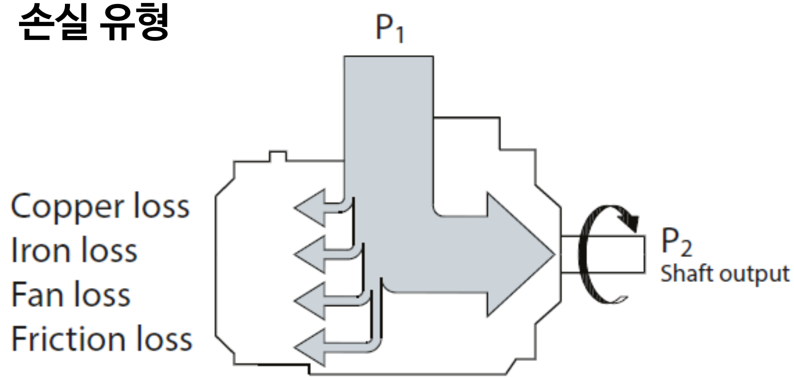
효율 및 손실

효율

- 일정한 부하조건에서 **모터의 입력 전력**은 **모터의 다양한 손실**로 인해 **모터가 출력할 수 있는 동력**(Shaft Power)**보다 크다.**
- 모터 효율은 모터 원리, components, material, size(rated power), 극수에 따라 달라진다.

$$\text{모터효율 } \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\text{output power}}{\text{input power}}$$

손실 유형

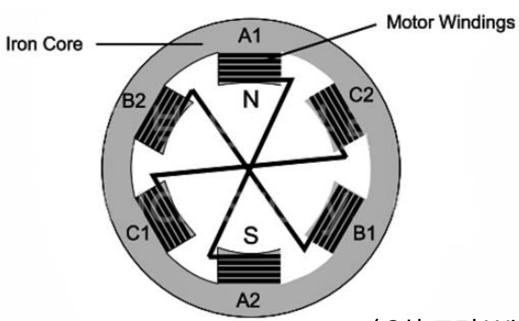


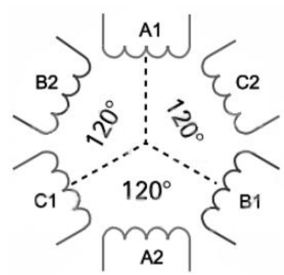
〈 Typical losses in the motor 〉

2.2 유도전동기

Motor 구동 원리 – 회전자기장

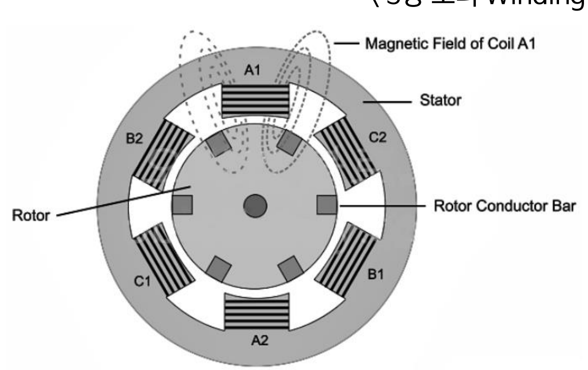
① 고정자 권선에 전원이 인가되면, 각각의 권선은 전자석이 되며 공극에 회전자기장(rotating magnetic field)이 형성된다.
② 권선에서 유도된 자기장에 의해 인접한 Rotor에 전류가 유도되어, Rotor는 전자석이 된다.
③ 권선 쪽으로 Rotor의 Conductor Bar가 끌려간다.
④ 이런 방식으로 모터는 계속해서 회전하게 된다.



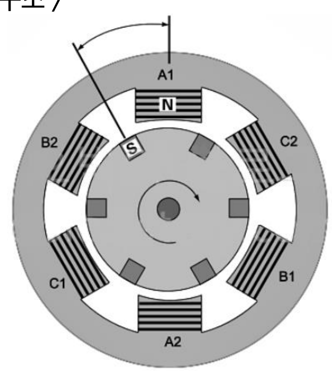


2-Pole Stator Winding

〈 3상 모터 Winding 구조 〉

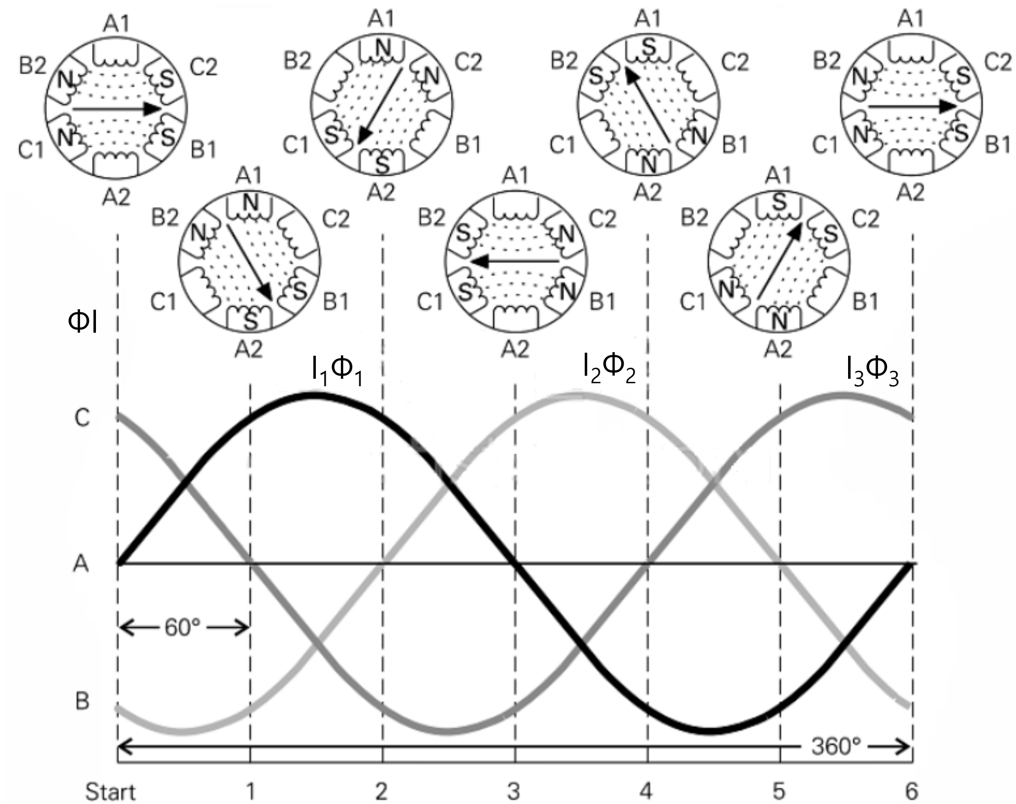


〈 Stator Winding에서 Rotor Bar로의 전자기 유도 〉



〈 Winding과 Rotor Bar의 극성 관계 〉

모터의 회전 원리

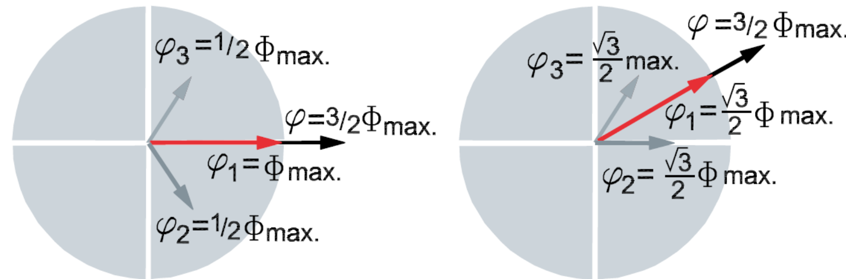


① 기동시 A상에는 전류가 흐르지 않는다. 따라서 자기장이 형성되지 않는다.
② B와 C상에 전류가 흐르고, 화살표 방향으로 자기장이 형성된다.
③ 60 ˚ 후 A상에 전류가 흐르고, C상에 전류가 흐르지 않는다.
자기장 형성 방향이 60 ˚ 이동한다.
④ 3상의 위상변화 진행에 따라 자기장이 회전한다.

회전자기장의 벡터 표현

회전자기장(rotating field)을 각속도를 가진 벡터로 표현

- 자기장 성분(ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3)의 결과인 회전자기장의 크기(ϕ)는 일정하며, 교번자장(alternating fields) 최대값(ϕmax)의 1.5배
- 극수와 공급 주파수에 따른 동기속도로 회전
- 회전하는 동안 진폭이 변경되면 회전자기장은 타원 형태



Slip, Torque, Speed

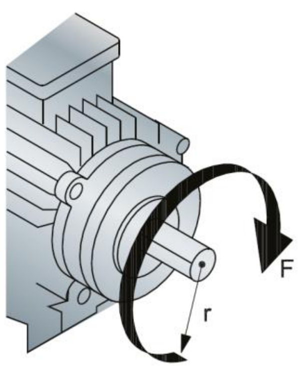
Induction Motor에서 회전자 속도는 회전자기장 속도 보다 낮다.

회전자기장의 속도(n_0)와 Rotor 속도(n_n) 차이를 Slip(s)이라 한다.

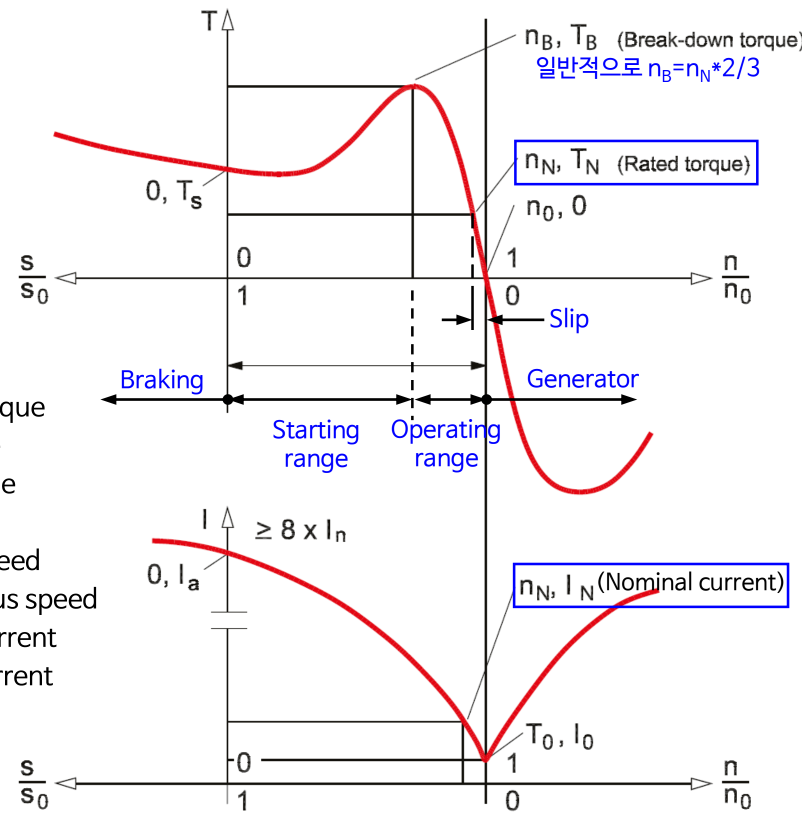
(p=모터극수, f=주파수, n_0=동기속도(Synchronous speed), n_n=회전속도)

$$s = \frac{n_0 - n_n}{n_0} \qquad n_0 = \frac{120 \times f}{p} \qquad n_n = \frac{120 \times f}{p} \times (1 - s)\ \text{[rpm]}$$

$$T = F \times r$$ (T=torque, F=force, r=radius)

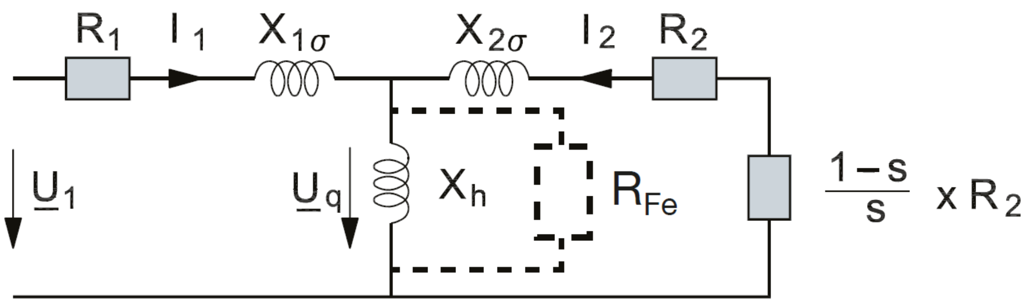


[Motor Current와 Torque 특성]



T_S : starting torque
T_B : stall torque
T_N : rated torque
n_B : stall speed
n_N : nominal speed
n_0 : synchronous speed
I_N : nominal current
I_a : starting current

모터의 등가회로



- 전압 (U1)을 인가하면, I_1(stator)와 I_2(rotor)에 전류가 흐르며, R_1(stator)와 R_2(rotor)저항과 $X_{1\sigma}$(stator)과 $X_{2\sigma}$(rotor) 리액터스에 의해 제한
- 인덕터는 자기유도를 통해 상호 영향을 미치며, transverse resistance 및 reactance R_{Fe}와 X_h를 통해 상호 연결 자화 전류는 이를 통해 흐른다. R_{Fe}는 매우 작기 때문에 무시된다.

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times L$$

(X_L = reactance [Ω], f = frequency [Hz], L = inductance [H])

Standard operation

Slip에 의해 rotor 저항 R_2가 변한다.

R_2 x (1-s)/s는 기계적 모터 부하를 나타낸다.

Rotor측 저항 = R_2(자체 저항) + R_2x(1-s)/s

No-load situation

무부하 작동시 slip은 매우 작다.

즉, R_2 x (1-s)/s 가 매우 높다는 것을 의미

결과적으로 전류가 rotor를 통해 거의 흐를 수 없다.

이것은 등가회로에서 기계적 부하를 나타내는 저항을 제거하는 것과 같다.

Locked rotor situation

모터가 부하 상태에서 작동할 때 slip은 증가. 즉 R_2 x (1-s)/s 는 감소

Rotor가 Locking 상태 일 때 slip은 1 이므로

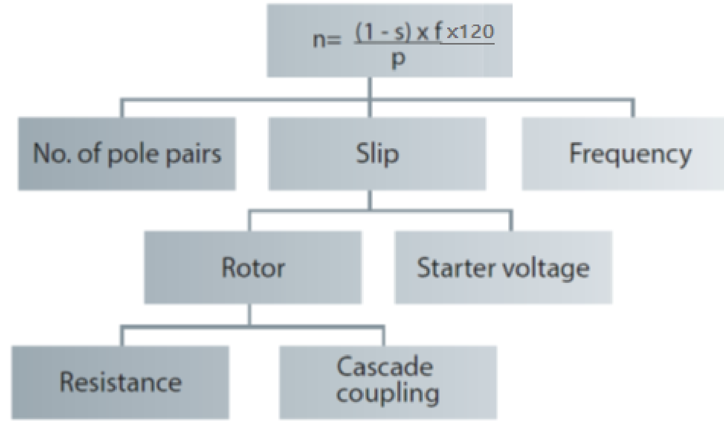
부하에 따라 증가하는 전류가 최대에 도달

유도전동기 속도변경

모터 속도는 다음의 방법으로 변경 가능

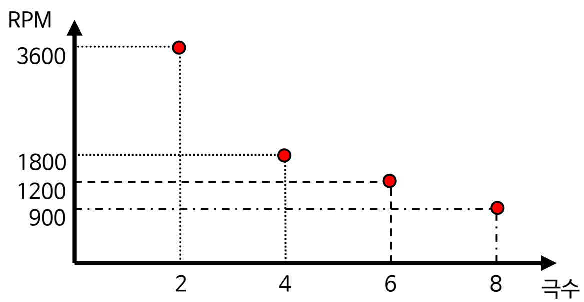
- 극수 변경 (예: pole-changing motor)
- Slip 제어 (예: slip-ring motor)
- 공급 주파수 제어

$$n_n = n_0 - n_s = \frac{(1-s)\times f \times 120}{p}$$



Pole number control

연속제어가 불가능하며, 극수에 따른 한 점에서의 속도로 제어



Slip control

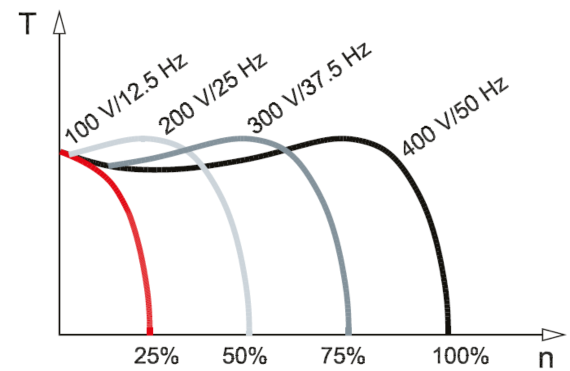
Slip에 의한 모터 속도 제어 방법

- Stator 전압 변경
- Rotor control
  - 저항기가 로터 회로에 삽입(slip-ring)
  - slip-ring을 통해 로터 회로에 가변 전압 공급으로 로터 속도와 자성 변경

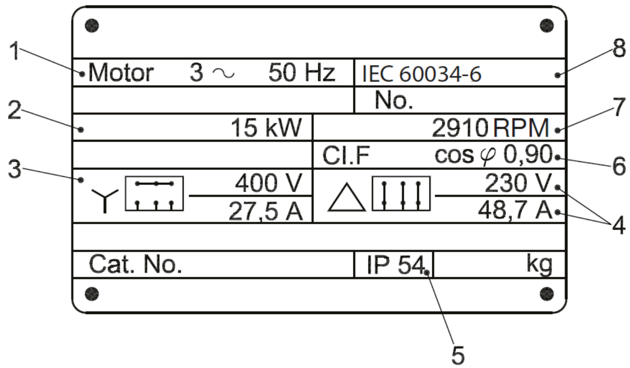
Frequency regulation

가변 주파수 공급으로 속도 제어

- 전압/주파수 제어를 토크 특성에 따라 변경

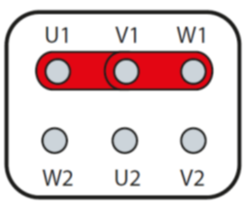


모터 명판과 Y/Δ 결선

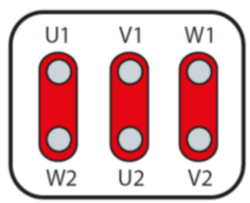


1) 정격 주파수가 50Hz인 3상 AC모터
2) 정격 출력 15kW
3) 스테이터 권선 정격 전압 400V, 정격 전류 27.5A, Y결선
4) 정격 전압 230V, 정격 전류 48.7A, Δ결선
5) IP54 보호 등급
6) 절연 등급 F(155℃), 역률 0.9(cosφ)
7) 정격 속도 2910RPM(2 Pole)은 정격 전압, 정격 주파수, 정격 부하에서의 모터 속도
8) IEC 60034-6 표준 충족

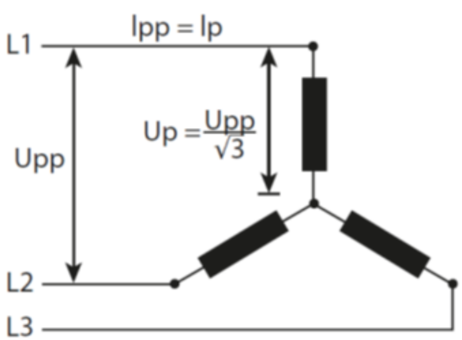
[Motor 단자대 Y결선 / Δ결선]



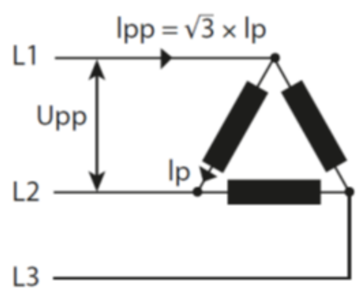
Y결선



Δ결선



Y결선



Δ결선

유도전동기 종류

농형 유도전동기

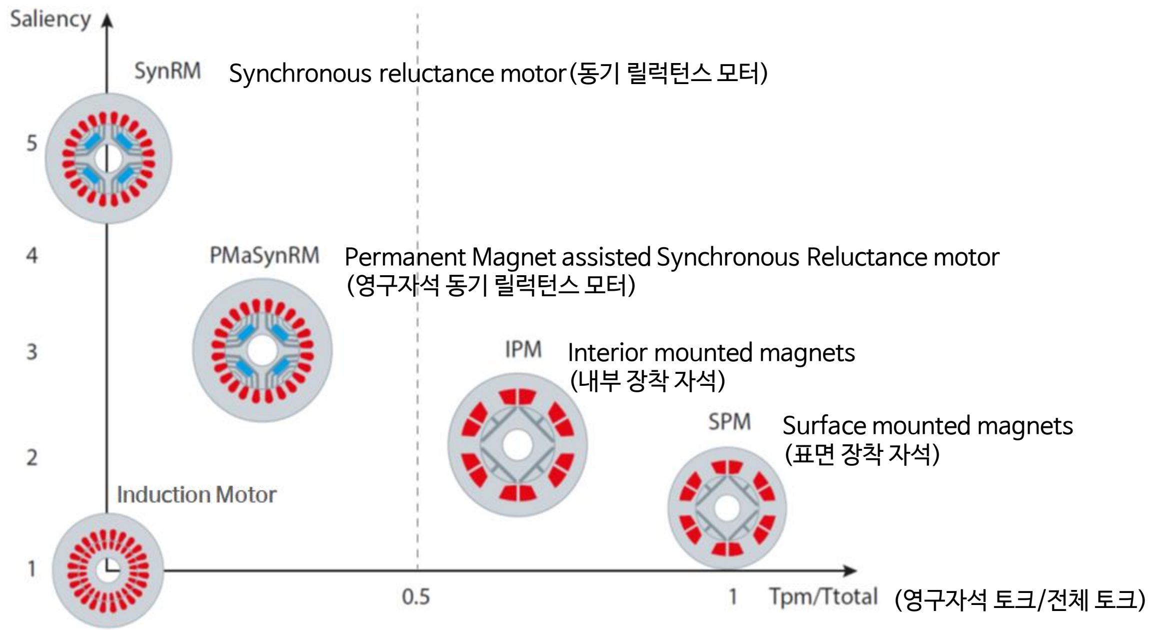
- 구조가 간단하고 취급방법이 간단
- 가격이 저렴
- 속도 제어가 곤란
- 기동 토크가 작다
- 슬립링이 없기 때문에 불꽃이 없다

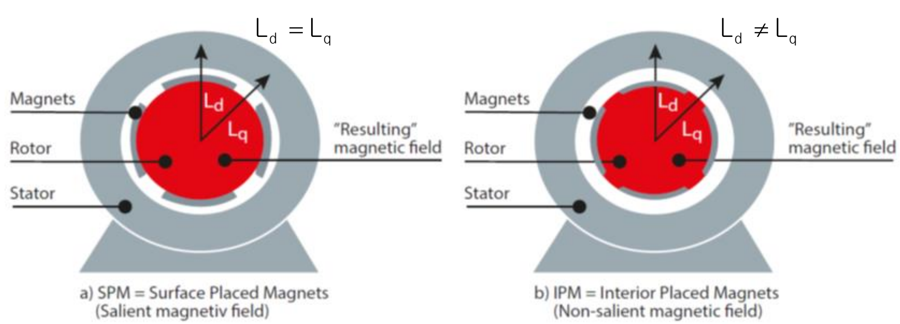
권선형 유도전동기

- 속도제어가 용이
- 취급이 번거롭다
- 가격이 높다
- 슬립링에서 불꽃이 나올 염려가 있다.

2.3 동기 전동기 (Synchronous motor)

※ 동기 모터는 Rotor가 Stator 권선에 의해 생성된 자기장과 동일한 속도로 회전한다.





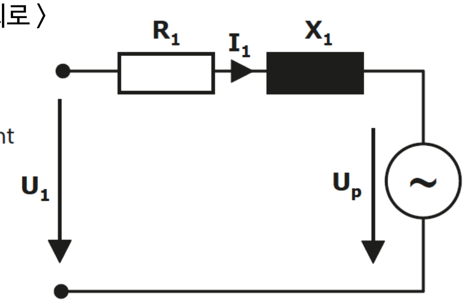
SPM IPM

영구자석 모터 (Permanent Magnet (PM) Motor)

- 영구자석이 장착된 Rotor를 사용
- Stator에서 생성된 회전자기장과 동기속도로 Rotor가 회전
- 모터를 자화시키기 위해 Rotor 각도를 알아야 한다.
- **Rotor를 돌리면 Stator에 전압이 유도되어 역기전력 (Back EMF)이 발생**
- **토크는 전류에 비례, 속도는 공급 주파수에 비례**
- 모터 Slip, Rotor 저항 및 인덕턴스가 없으므로 Rotor 손실이 발생하지 않아 효율성이 매우 우수

〈 PM 모터 등가회로 〉

U_1	Supply voltage
I_1	Stator current
UP	Voltage generated by permanent magnets
R_1, X_1	Describes the coils in the stator using $X_1 = X_1h + X_1\sigma$.



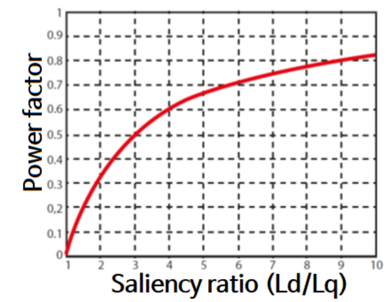
기타 Synchronous Motor

Brushless DC (BLDC) Motor

- Rotor 위치 결정 위해 홀 센서 사용
- 토크 리플 및 철 손실 발생, 높은 효율성
- 최대 약 10kW 모터
- PM모터와 동일한 제어원리 사용

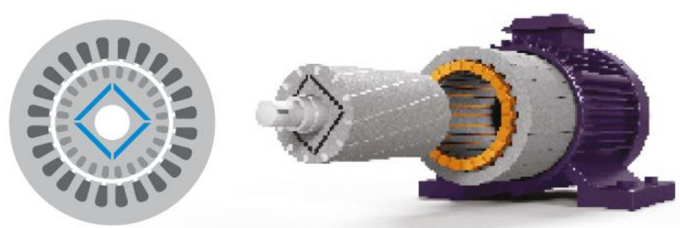
Reluctance Motor

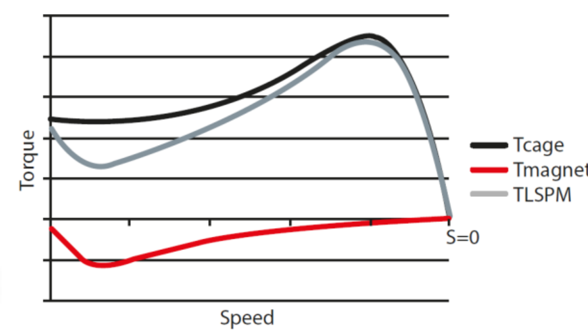
- 자기저항(Magnetic reluctance or resistance) 사용
- 유도전동기 보다 역률은 낮지만, 에너지 효율은 높다.
- 손실은 공극에서 고조파에 의해 발생
- Saliency ratio에 따라 역률 및 토크 특성이 달라진다.
- 높은 토크 밀도와 주 전원에 의한 기동에 초점



Line Start PM (LSPM) Motor

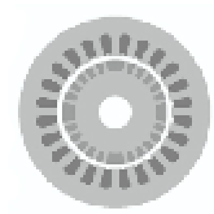
- 하이브리드(유도전동기+PM모터)로 자석이 rotor 내부에 배치
- 유도전동기 대비 토크 감소, 높은 역률 및 효율
- 최대 약 10kW 모터

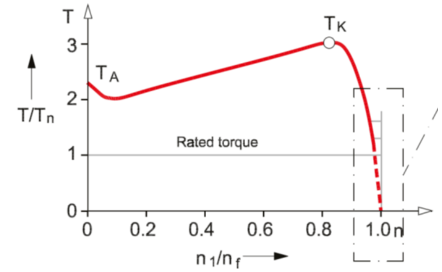




Synchronous Reluctance Motor with Squirrel Cage

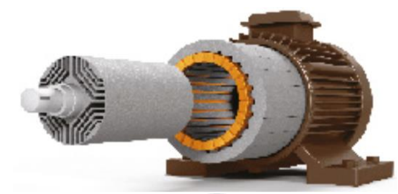
- Stator는 농형모터와 동일, Rotor는 Gap에 알루미늄 채워짐. end winding은 단락 구조
- LPSM과 유사하게 동작
- 최대 약 10kW 모터, 효율 감소





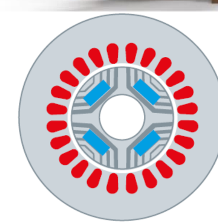
Synchronous Reluctance Motor (SynRM)

- Stator는 유도전동기와 유사, Rotor는 고조파 손실 저감 및 낮은 토크 리플 고려 설계
- 주 전원으로 직접 기동 불가, AC 드라이브 필요
- 드라이브는 rotor 각도 센싱 필수
- 에너지 효율적 제어를 위해 Ld 및 Lq 동작 관리



Permanent Magnet assisted Synchronous Reluctance Motor (PMaSynRM)

- Rotor 형상에 weak magnet을 추가(토크 생성 증가 및 역률 개선 목적)한 SynRM의 변형
- 제어 관점에서 IPM과 동일
  - IPM은 영구자석에 의해 생성되는 토크가 reluctance 토크보다 높은 반면, PMaSRM은 reluctance 토크가 지배적



Switched Reluctance Motor (SRM)

- Stator 구조는 동심권선이 사용되므로 DC 모터와 유사
- Rotor pole은 Stator pole ratio와 상이
- 주 전원으로 직접 모터 기동 불가
- Noise가 높은 경우 높은 토크 리플과 낮은 dynamics 발생

6/4 pole

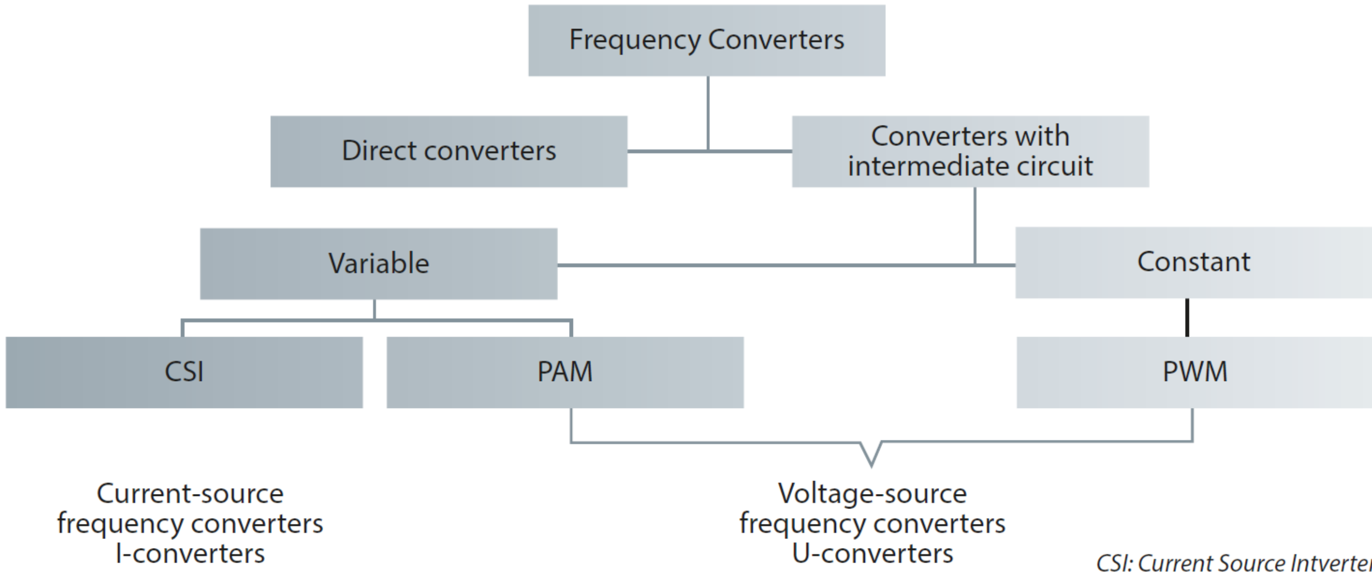
8/6 pole

Medium Voltage Motor (사용목적)

고 전력 출력이 필요한 경우, 전류를 낮추기 위해 전압을 높이는 것이 유리(비용절감, 손실 감소)

- 소형 Power Cable
- 소형 current에 적합한 크기의 스위치 기어
- 유틸리티에서 모터로의 전압 강하 감소
- 더 적은 전류로 더 높은 전력 출력
- MV 드라이브는 2.3~13.8kV, 0.2MW~40MW 범위로 분류. 일반적으로 산업용 환경에서는 3.3~6.6kV, 1~4MW 범위

- **AC Drive의 주요 기능** : 고정된 주 전원(예: 400V/50Hz)을 가변 전원공급(예:0~400V/0~50Hz)로 변환
- AC Drive 2가지 유형 : Direct Converter와 중간회로(intermediate circuit)를 갖는 AC Drive



CSI: Current Source Intverter
PAM: Pulse Amplitude Modulation
PWM: Pulse Width Modulation

Direct Converter

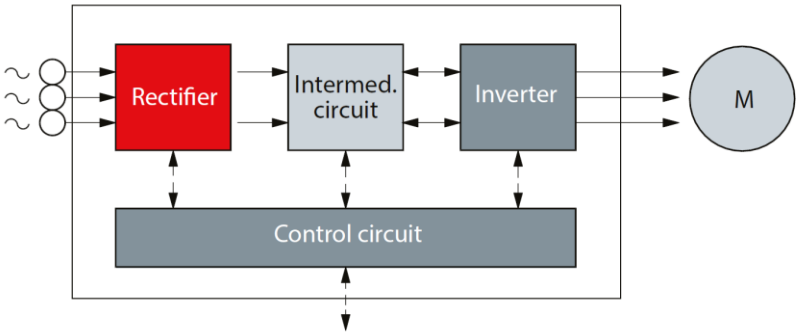
중간 회로가 없이 변환을 수행, 일반적으로 고전력 어플리케이션(MW범위)에서만 사용

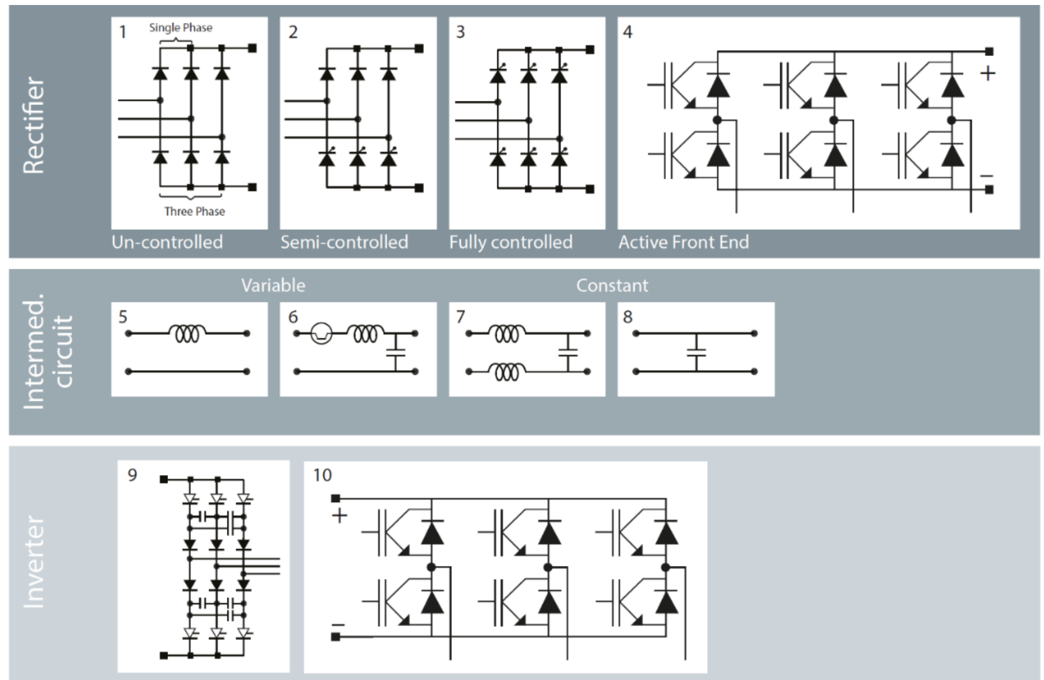
- 50Hz 주전원 주파수를 감소된 주파수 제어(약 25~30Hz)
- 동기식 모터와 함께 일반적으로 사용
- 엄격한 동적 성능 요구사항이 있는 어플리케이션에 적합

중간회로(Intermediate Circuit)을 갖는 AC Drive

중간회로의 또 다른 용어는 “DC-bus” 또는 “DC-link”

- 중간회로 2가지 유형 : Constant intermediate circuit, Variable intermediate circuit





〈 Fig 3.3 Main component topologies 〉

중간회로 주요 구성요소

1) 정류기 (Rectifier)

정류기는 단상 또는 3상 AC 주전원에 연결되어 맥동 DC 전압을 생성

① uncontrolled 정류기 ② semi-controlled 정류기

③ fully controlled 정류기 ④ active front-end

2) 중간회로 (Intermediate circuit)

① 정류기 전압을 DC 전압으로 변환

② 인버터에서 사용하기 위해 맥동 DC 전압의 안정화 또는 평활화

3) 인버터 (Inverter)

일정한 DC 전압을 가변 AC 전압 및 주파수 생성

4) 제어회로 (Control circuit)

Configuration example	Abbreviation	Configuration: Reference to components in Fig. 3.3
Pulse amplitude modulated converter	PAM	1 or 2 or 3 and 6 and 9 or 10
Pulse width modulated converter	PWM	1 or 2 or 3 or 4 and 7 or 8 and 9 or 10
Current-source converter	CSI	3, 5, and 9

〈 AC drive configuration examples〉

3.1 정류기 (Rectifier)

AC Drive의 정류기는 Diode, Thyristor, Diode+Thy’, IGBT로 구성

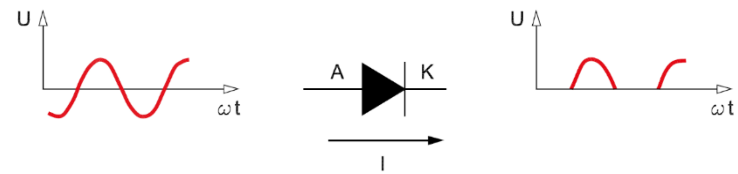
- 일반적으로 최대 30kW까지는 uncontrolled 6 브리지 정류기가 사용, 30kW 이상은 semi-controlled 정류기 사용

Uncontrolled Rectifier

Uncontrolled 정류기는 Diode로 구성

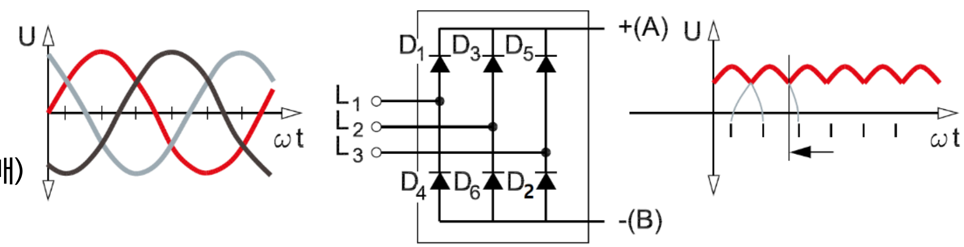
Diode 동작 원리

- 다이오드는 전류를 A→K로 한 방향으로만 흐르게 한다.
- 전류의 크기를 제어할 수 없다.
- 입력 AC 전압이 맥동 DC 전압으로 변환된다.



Uncontrolled 3상 정류기 (B6-Diode Bridge)

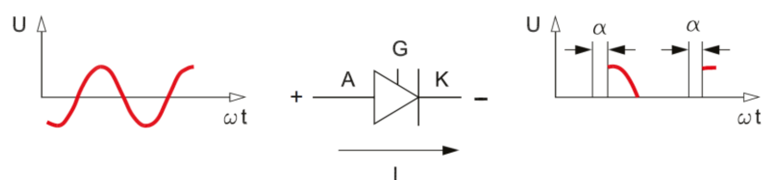
- 6펄스 정류기라고도 한다
- 각각의 다이오드는 1/3주기 (120˚) 동안 도통
- DC 출력전압은 일정 (3상: 주전원의 1.31~1.41배, 단상: 주전원의 0.9~1.2배)
- 입력부 전류는 정현파가 아니다. (주 전원 interference 생성)

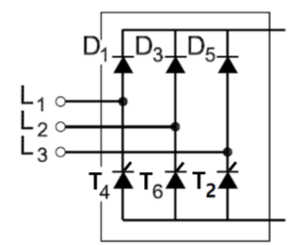


Semi-controlled Rectifier

Uncontrolled 정류기의 Diode 그룹 중 하나를 Thyristor(SCR) 이 대신

- SCR 점호각 제어로 돌입전류 제한 및 중간회로의 커패시터 충전
- 정류기의 출력전압은 uncontrolled 정류기와 동일





SCR 동작 원리

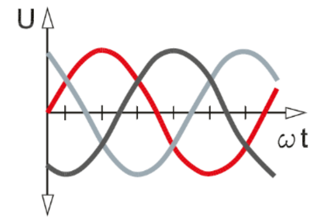
- 다이오드 처럼 전류를 A→K로 한 방향으로만 흐르게 한다.
- Gate에 의해 On되고, A→K로 전류가 흐르지 않을 때 Off된다.

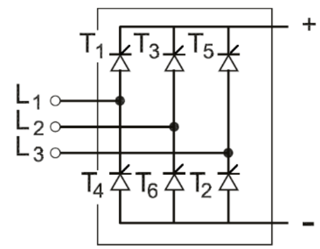
Fully-controlled Rectifier

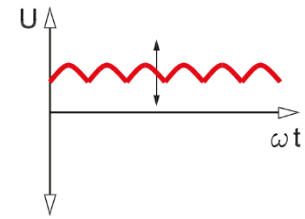
Fully-controlled 정류기는 Thyristor(SCR)를 사용한다.

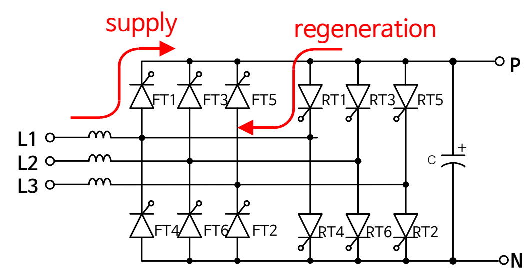
- 정류 전압의 크기는 Gare 점호각 α를 제어하여 변경
- SCR이 짧은 시간 도통될 때, 높은 무효 전류 발생
- 양방향 SCR 구성시, 중간회로의 회생제동 전력을 주 전원으로 피드백 가능

$$U_{dc} = 1.35 \times U_{mains} \times \cos\alpha$$





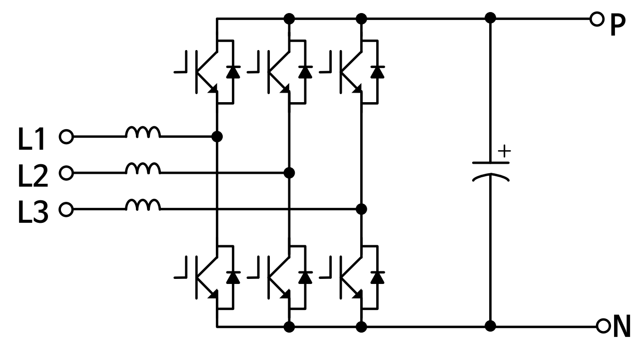




Active Front-End / Active Infeed

회생되는 에너지로 상승되는 DC 전압을 주 전원으로 회생

- AFE(Active Front-End) 또는 AIC(Active Infeed Converter)
- 중간회로의 전압 레벨이 주 전원 전압보다 높을 때 회생
- 생성되는 전압을 정현파로 만들기 위해 추가 필터 필요(LCL Filter)
- AFE 사용시 고조파 제한에 효율적



3.2 중간회로 (Intermediate Circuit)

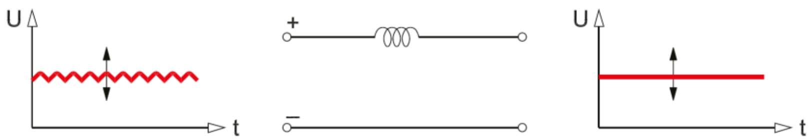
Intermediate circuit의 역할

- 모터가 인버터를 통해 주전원으로 부터 에너지 공급/반환을 위한 에너지 버퍼 및 부하서지를 수용하기 위한 에너지 저장 역할
- 인버터와 정류기 분리, 주전원 간섭(interference) 감소

Variable Intermediate Circuit

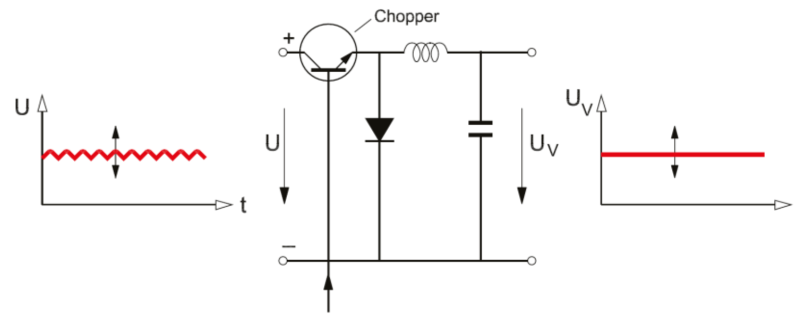
1) Variable DC intermediate circuit

- “Choke” 또는 “Reactor”라고 하는 매우 큰 인덕터로 구성
- 일반적으로 전류 소스 AC 드라이브(I-Converter)에 사용



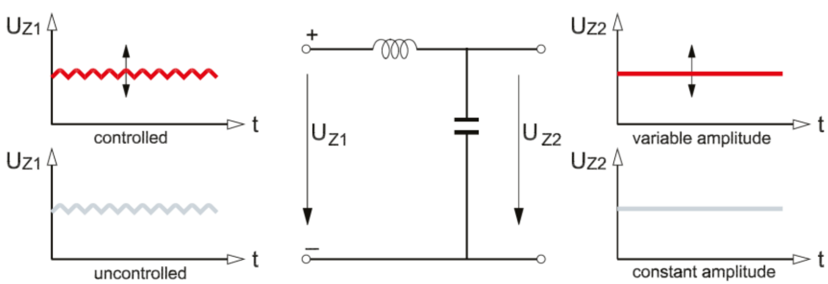
2) Variable DC Voltage intermediate circuit

- Chopper와 필터로 구성
- Chopper 스위칭에 의해 DC 전압 가변



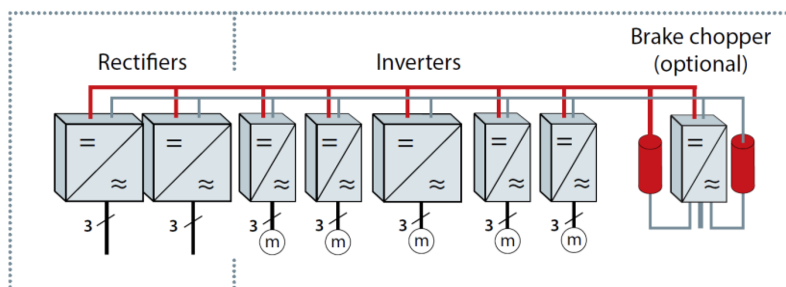
Constant Intermediate Circuit

- 커패시터와 인덕터(Choke)로 구성
- 커패시터 : 맥동 DC전압 평활화, 에너지 저장
- 인덕터 : 전류 리플 Smoothing, 주전원 간섭(harmonics) 감소



Common DC Bus

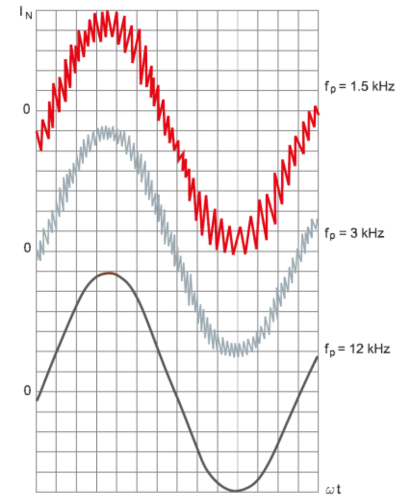
- AC 드라이브들의 중간회로를 서로 연결하여, DC 전압을 다수의 인버터가 공유



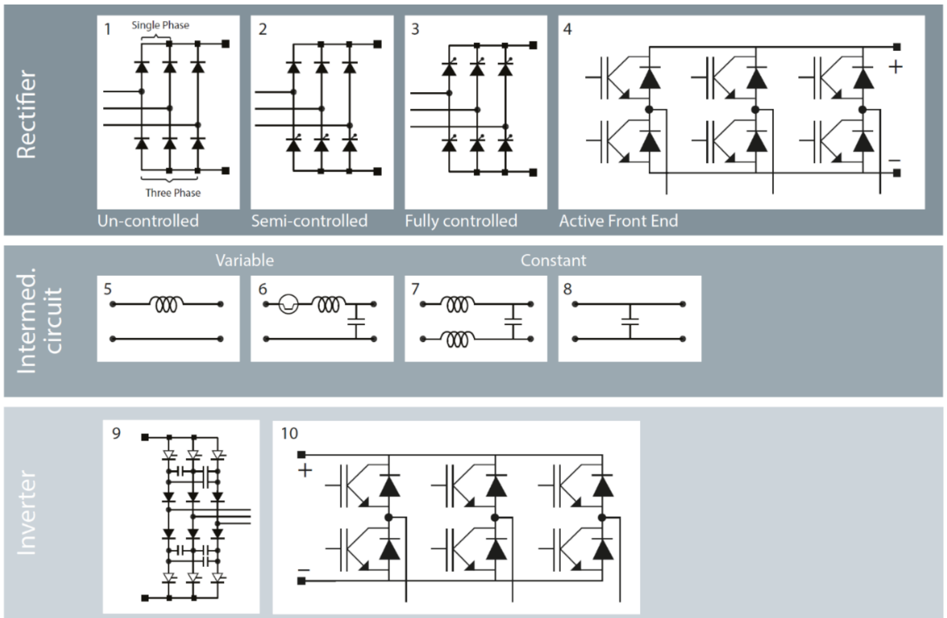
3.3 인버터 (Inverter)

AC 드라이브의 최종 단계로, AC 모터에 공급되는 출력 전압과 주파수를 발생시킨다.

- AC 드라이브의 인버터 소자는 싸이리스터 대신 트랜지스터(IGBT)가 많이 사용된다.
  (트랜지스터는 언제든지 turn on/off가 가능하며, 스위칭 주파수를 수백 kHz까지 사용 가능)
- 인버터 스위칭 주파수 선택 : 모터 손실과 인버터 손실을 적절히 고려하여야 한다. 스위칭 주파수가 증가하면 인버터 손실 증가



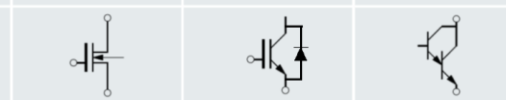
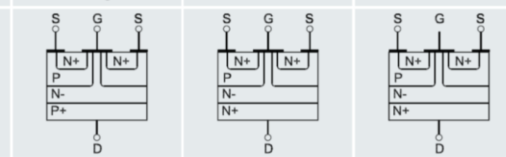
〈 스위칭 주파수에 따른 모터 전류 〉



〈 Fig 3.3 Main component topologies 〉

Configuration example	Abbreviation	Configuration: Reference to components in Fig. 3.3
Pulse amplitude modulated converter	PAM	1 or 2 or 3 and 6 and 9 or 10
Pulse width modulated converter	PWM	1 or 2 or 3 or 4 and 7 or 8 and 9 or 10
Current-source converter	CSI	3, 5, and 9

〈 AC drive configuration examples〉

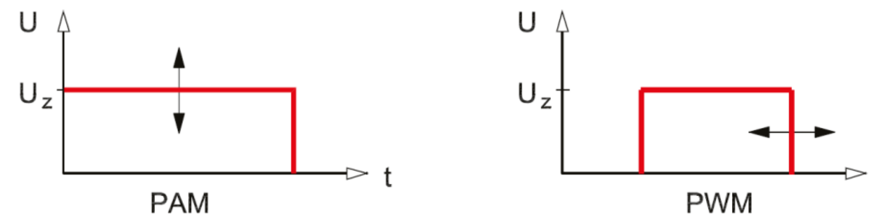
Properties	Semi-conductor		
	MOSFET	IGBT	LTR
Symbol			
Design			
Conductivity Current conductivity Losses	Low High	High Insignificant	High Insignificant
Blocking conditions Upper limit	Low	High	Medium
Switching conditions Turn-on time Turn-off time Losses	Short Short Insignificant	Medium Medium Medium	Medium Low High
Control conditions Power Driver	Medium Voltage	Medium Voltage	High Current

〈 전력소자 비교〉

3.4 Modulation

인버터 출력 전압과 주파수를 가변하기 위한 2가지 유형의 modulation

- PAM (Pulse Amplitude Modulation)
- PWM (Pulse Width Modulation)

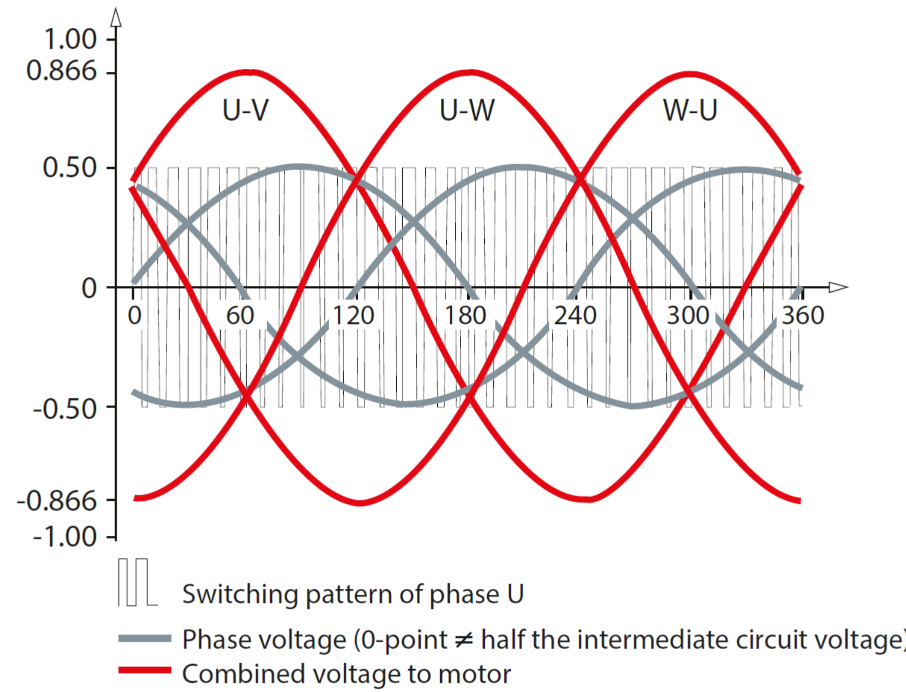


PWM

- 일정 중간 회로 전압을 갖는 AC 드라이브에 사용
- 저속에서의 제어 성능 우수, 제동 저항 작동 가능
- 가장 널리 사용되는 방법, “펄스 폭 변조”라고 한다.

PAM

- 가변 중간 회로 전압 또는 전류를 갖는 AC 드라이브에 사용
- Uncontrolled/Semi-controlled 정류기 + 초퍼 또는 Fully controlled 정류기 사용
- 스위칭 패턴은 중간회로의 가변 전압 또는 전류의 크기에 의해 제어
- 고속 모터와 같은 특수분야에 사용



〈 Output voltage PWM 〉

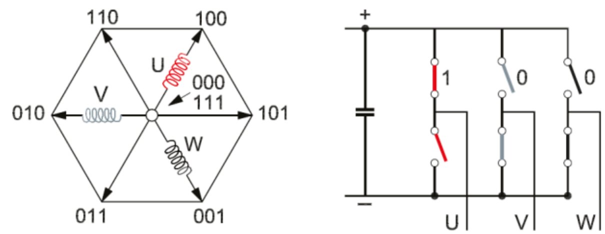
PWM의 특징

- 스위칭 주파수가 낮으면 모터 소음이 증가
- 스위칭 주파수를 높일 수록 전류는 정현파에 가까워 진다.
- 정현파 기준 변조 시, PWM AC 드라이브는 정격 전압의 최대 86.6% 제공
  - 출력 상전압 peak는 DC-link의 ½, 출력 선간전압은 상전압의 √3배 (86.6%)
  - 정현파 파형이 필요한 경우, 출력전압이 13% 낮다.
    그 이상의 전압 출력을 위해서는 펄스 수를 줄임으로써 추가 전압 발생 가능.
    이 경우 출력 고조파 성분 증가 및 모터 손실 증가

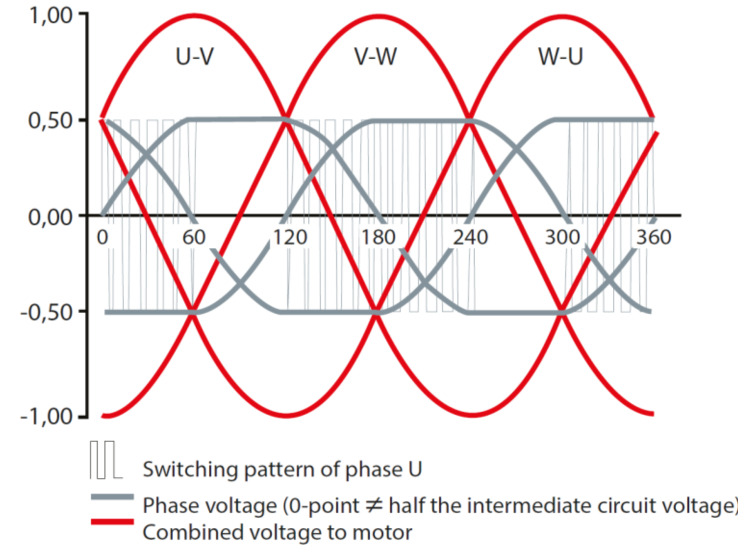
SFAVM

Stator Flux-oriented Asynchronous Vector Modulation (고정자 자속 지향 비동기 벡터 변조)

- 임의로 인버터 전압을 변경할 수 있는 공간벡터 변조(Space-vector modulation) 방법
- 이 변조방법의 주 목적은 고정자 전압 전 범위에 있어, 고정자 자속을 최적 수준으로 유지하여 토크 리플이 없도록 하는 것
- 전압 벡터의 길이 : 모터 전압



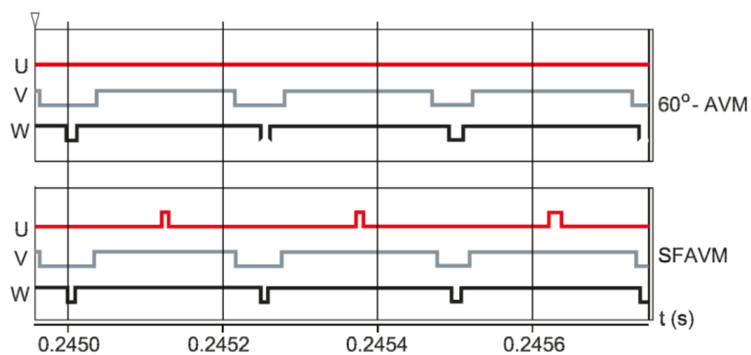
〈 Inverter Switch States 〉

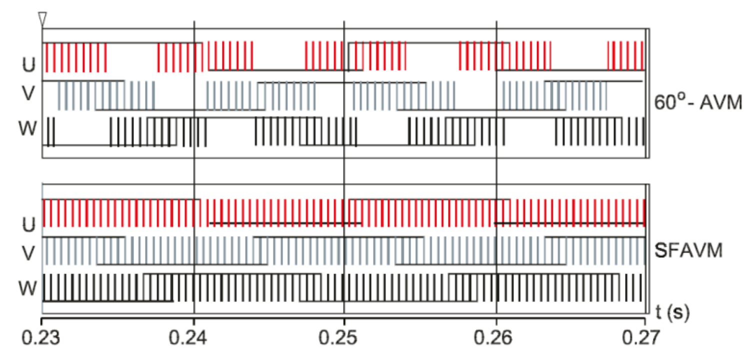


60˚ AVM

Asynchronous Vector Modulation (비동기 벡터 변조)

- 인버터의 1상은 해당 주기의 60˚ 동안 일정하게(0또는 1) 유지
- SFAVM의 고속 제한으로, 60˚ AVM 선호
- 60˚ 동안 켜지고, 60˚ 꺼지는 동작에 의해 스위칭 손실을 최소화





〈 60˚AVM과 SFAVM의 Switching sequence 비교 〉

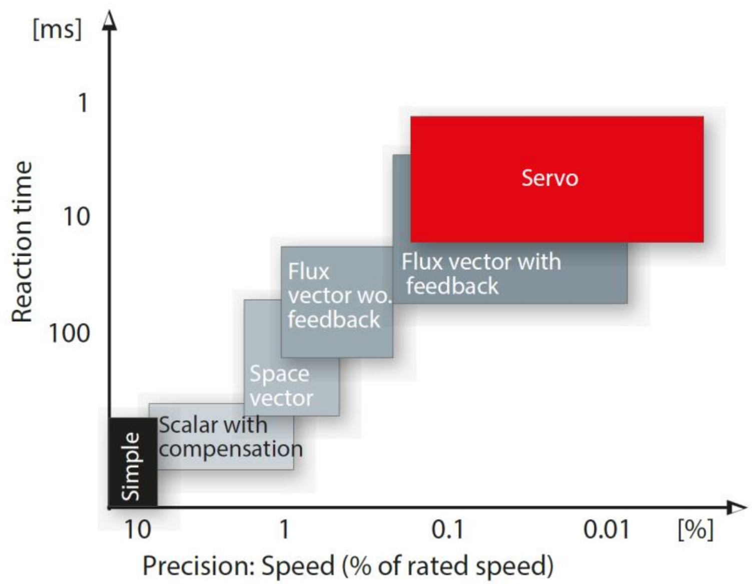
3.5 Control Circuit and Methods

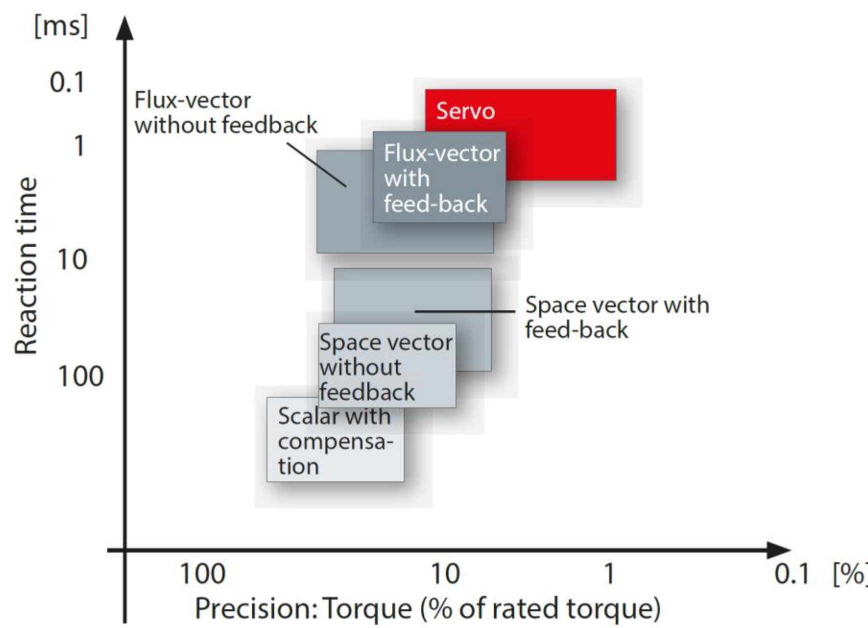
AC 드라이브 기본 기능

- 로터 회전 및 위치 지정
- 모터 Open/Closed Loop Speed Control
- 모터 Open/Closed Loop Torque Control
- 작동상태 모니터링 및 신호 전달

AC 드라이브 제어 유형 및 유형별 속도 설정 범위

• Simple(Scalar) without compensation control (보상제어 없는 단순 스칼라)	1:15
• Scalar with compensation control (보상제어 있는 스칼라)	1:25
• Space Vector control (공간벡터제어)	1:100(0)
• Open loop Flux (field-oriented) control	1:1000
• Closed loop Flux (field-oriented) control	1:10000
• Servo-controlled systems	1:10000

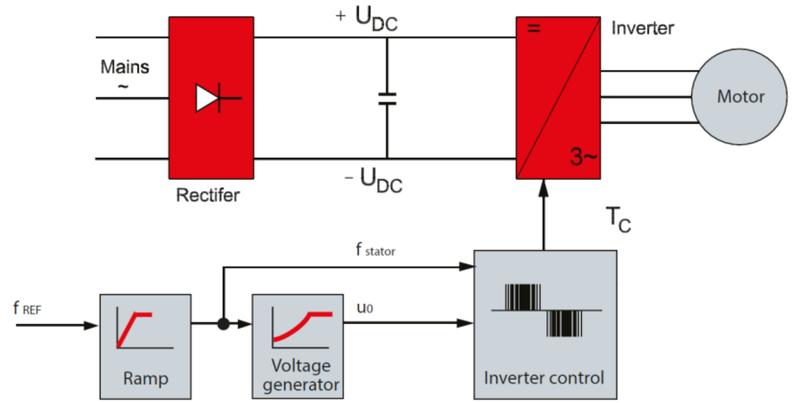




1) Simple Control method

모터 속도와 전압 사이의 관계(U/f control)

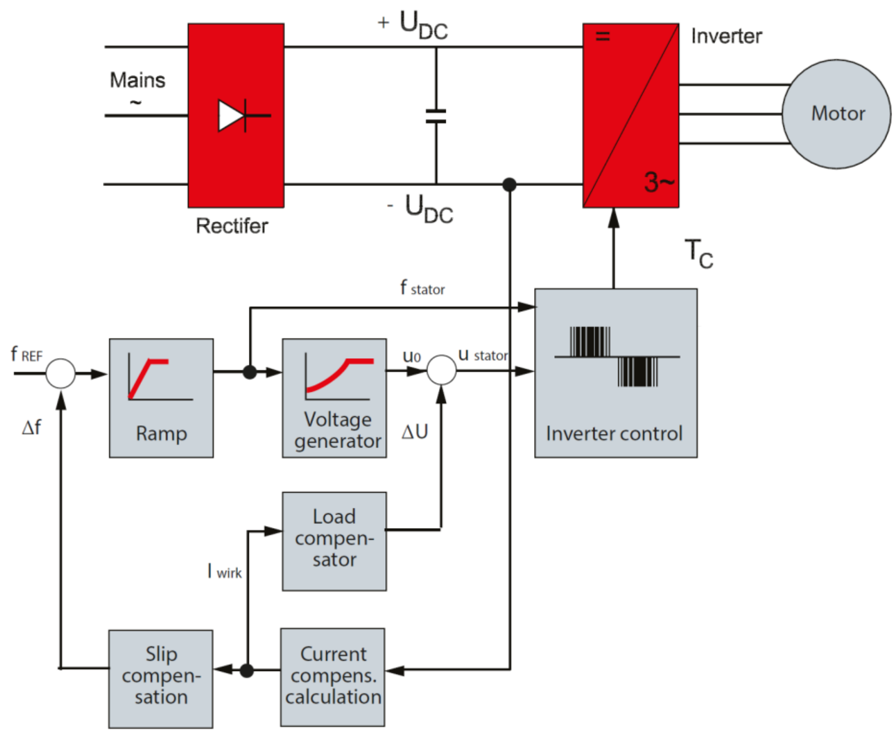
- 모터 속도 불안정
- 어려운 모터 시동
- 모터 보호 없음



2) Scalar Control with compensation

부하보상 및 슬립보상을 갖는 U/f control, 전압 및 주파수 제어

- 중간회로의 전력은 모터 소비 전력과 같다고 가정.
  ⇒ 중간회로의 shunt를 통해 전류 측정 후 보상 값 계산
- Speed setting range 1:25
  Speed accuracy ±1% of rated frequency
  Acceleration torque 40-90% of rated torque
  Speed change response time 200-500 ms
  Torque control response time Not available
- Simple Scalar control 대비 향상된 제어 특성
  급격한 부하변동에 견딜수 있다
  외부 피드백 신호 불필요
  공진문제 해결 불가능
  토크 제어 특성 없음
  고출력 모터 제어시 문제 발생
  저속 범위에서 부하 변동 시 문제 발생



3) Space Vector with/without Feedback

Closed loop control (with 외부 속도 피드백) 및 Open loop control 사용 가능

- 모터 전류를 자화 및 토크 전류로 변환, 전압(U) 및 주파수(f)와 함께 Voltage angle(θ) 조정
- ① 스칼라 제어에 비해 향상된 동적 성능
  ② 급격한 부하 변동에 아주 잘 견딘다. (보상기능을 갖는 스칼라 대비)
  ③ 전류 Limit에서 작동
  ④ active resonance damping (능동 공진 감쇠)
  ⑤ Open/Closed loop 토크제어 가능
  ⑥ High starting and holding torque
  ⑦ Flux Vector 대비 급격한 역전환시 문제
  ⑧ Rapid current control 없음

Space Vector (Open Loop)

- 외부 속도 피드백 없이, 속도와 위치는 측정된 모터 전류 및 모터 주파수 정보를 기반으로 계산
- 정상 상태 특성값과 관련된 Voltage vector control (static)
- Speed setting range: 1:100

Speed setting range	1:100
Speed accuracy (steady state)	± 0.5% of rated frequency
Acceleration torque	80-130% of rated torque
Speed change response time	50-300 ms
Torque change response time	20-50 ms

Space Vector (Closed Loop)

- 외부 센서(엔코더 등)에 의한 속도 피드백
- 제어 정확도는 제어 소프트웨어, 피드백 해상도 및 엔코더 해상도에 의해 결정
- Speed setting range: 1:1000-10000

Speed setting range	1:1000-10000
Speed accuracy (steady state)	Depend on resolution of feedback component
Acceleration torque	80-130% of rated torque
Speed change response time	50-300 ms
Torque change response time	20-50 ms

4) Flux Vector Control

Field-oriented control이라고 한다. 이전 제어 방법은 고정자를 통한 자속제어, Field-oriented control은 회전자 자속 직접 제어

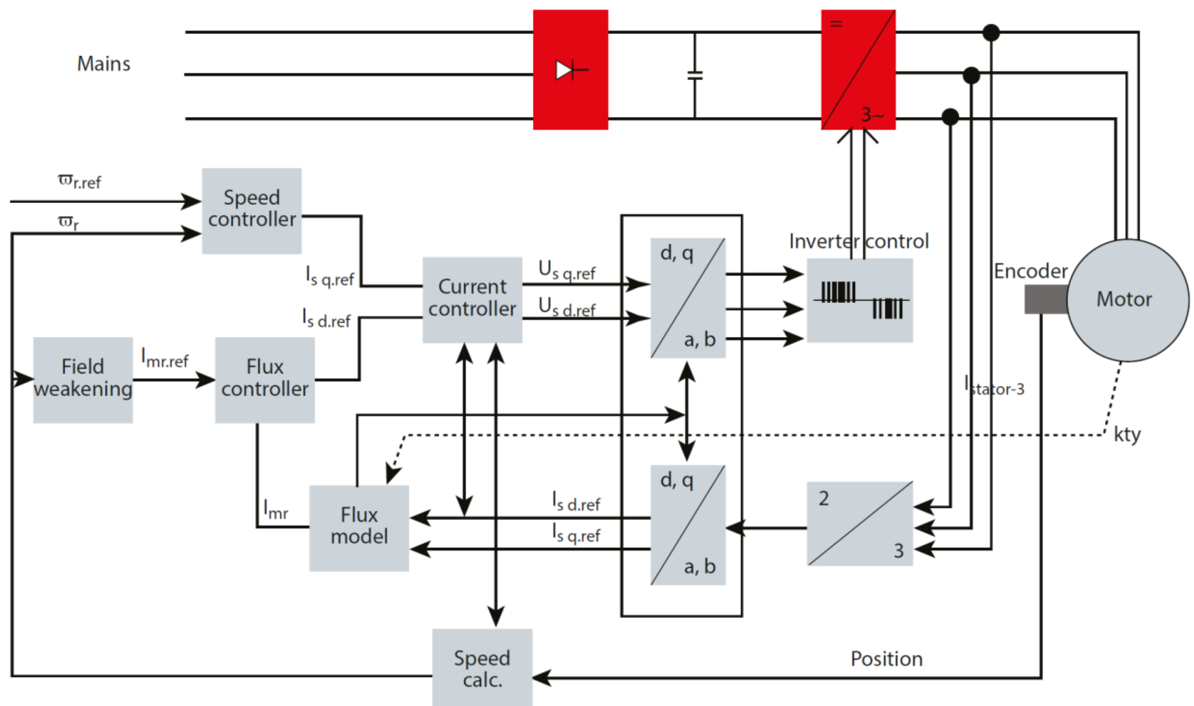
- 제어되는 모터 변수 : 속도와 토크
- 모터의 정격 데이터를 입력하면, 자속 모델을 사용하여 최적의 모터 자화에 필요한 전압과 각도 결정
  측정된 모터 전류는 토크 전류와 자화 전류로 변환, 내부 PID control은 측정된 모터 전류를 기준으로 피드백 값을 추정하여 속도를 제어

Space Vector (Open Loop)

- 저속에서 최적의 성능을 얻기 어렵다.
- Speed setting range 1:1000
  Speed accuracy (steady state) ± 0.5% of rated freq'
  Acceleration torque 100-150% of rated torq'
  Speed change response time 50-200 ms
  Torque change response time 0.5-5 ms

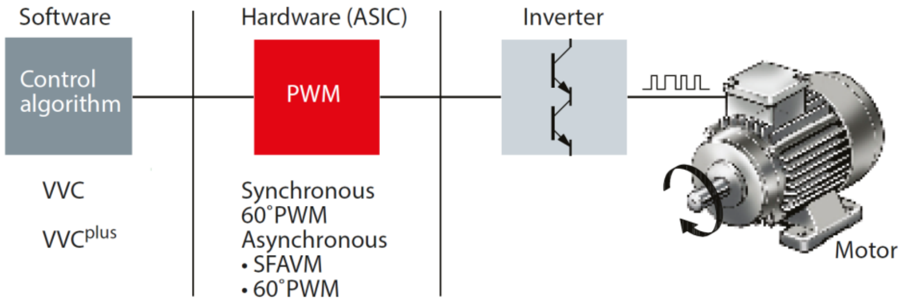
Space Vector (Closed Loop)

- 외부 센서(엔코더 등)에 의한 속도 피드백
- 제어 정확도는 제어 소프트웨어, 피드백 해상도에 의해 결정
- Speed setting range 1:1000-10000
  Speed accuracy (steady state) Depend on resolution of feedback component
  Acceleration torque 100-150% of rated torq'
  Speed change response time 5.00-50 ms
  Torque change response time 0.5-5 ms



3.6 Danfoss Control Principles

VVC (Voltage Vector Control) **사용,** 전압 벡터의 진폭과 각도, 주파수 직접 제어



※ U/f 제어

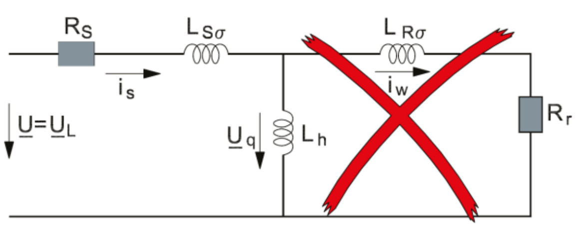
- Special motor, Motor 병렬 연결에 적합, 모터 보상은 불필요
- ① 저속 범위(0~10Hz)에서 향상된 동적 특성
  ② 모터 자화 개선 ③ 능동 공진 감쇠(Active resonance dampening)
  ④ 속도 제어 범위 : 1:100 Open loop
  ⑤ 속도 정확도 : 피드백 없이 정격 속도의 ±0.5%
  ⑥ 토크 제어 ⑦ 모터 전류 Limit에서 작동

1) Danfoss VVC+ Control 원리

VVC+는 정전압 소스 PWM 인버터 벡터 변조 방식 사용

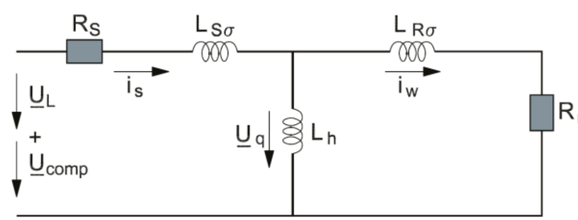
- 스위칭 패턴은 SFAVM 또는 60° AVM 사용
- 공극 내 맥동 토크를 매우 작게 유지
- 75℃ 미만 : SFAVM 사용, 75 ℃ 이상 : 60° AVM 사용
- 모터 등가회로 단순화

무부하 상태(no-load state, idle state)



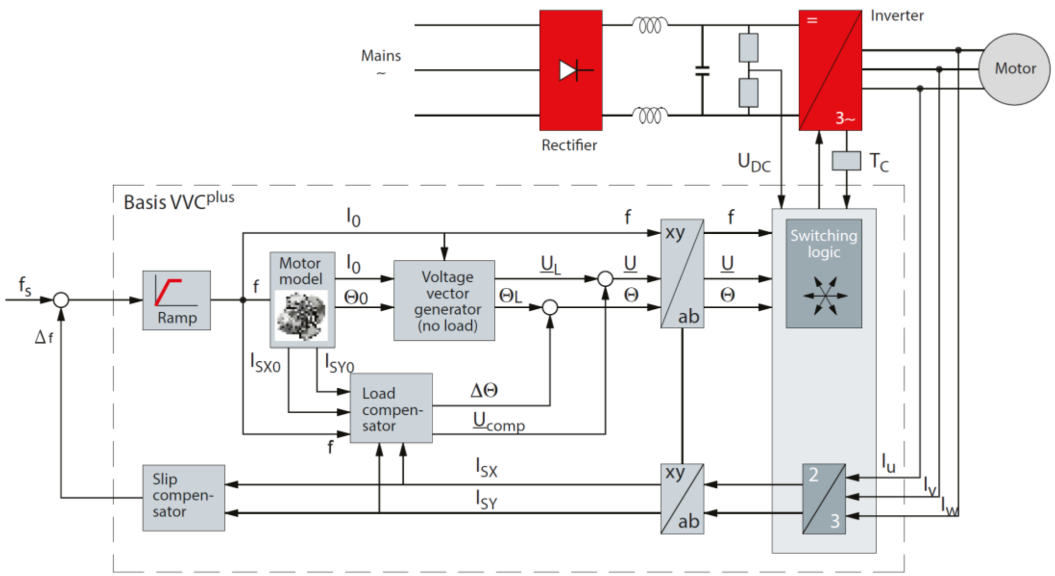
- 모터에서 사용하는 전류는 자화 및 손실 보상에만 필요하다고 가정
- 전압(U_L)은 모터 데이터(정격 전압, 전류, 주파수, 속도)에 따라 결정

부하 상태(loaded state)



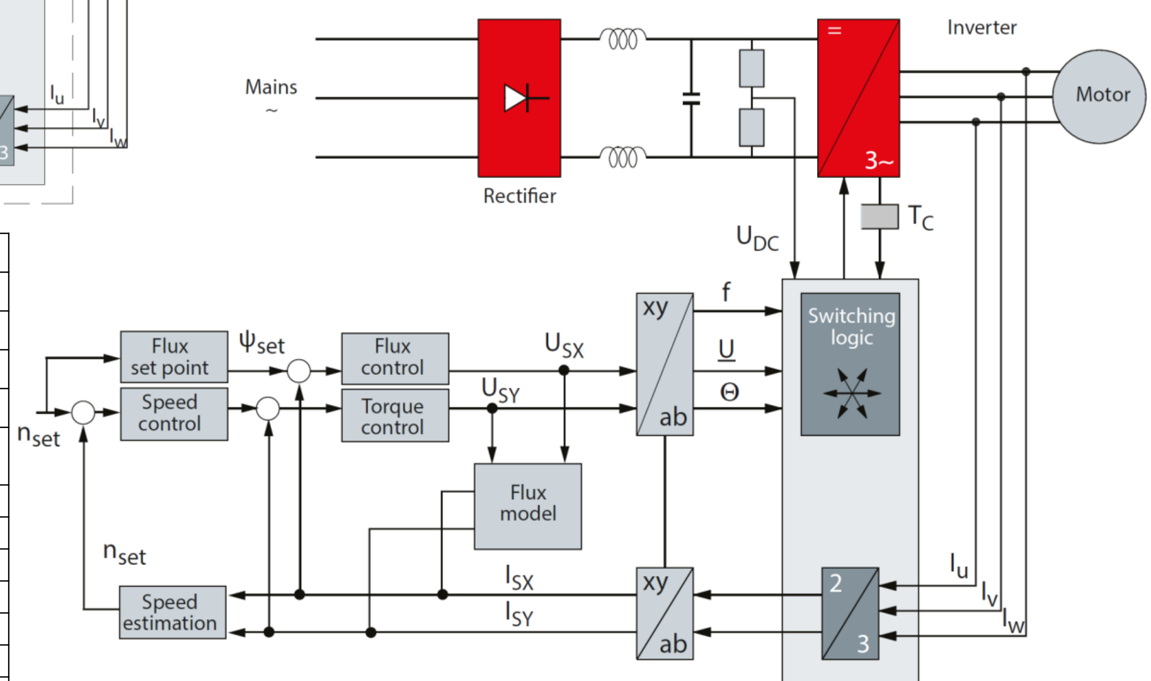
- 필요한 토크를 생성하려면 유효 전류(I_W)가 필요
- 모터의 손실(특히 저속 범위에서) 보상해야 한다.
- $U = U_L + U_{comp}$
- Ucomp는 부하 및 무부하, 저속 및 고속에서 측정된 전류를 사용하여 결정
- 전압 값과 속도 범위는 모터 정격 데이터를 기반으로 결정

1) Danfoss VVC+ Control 원리



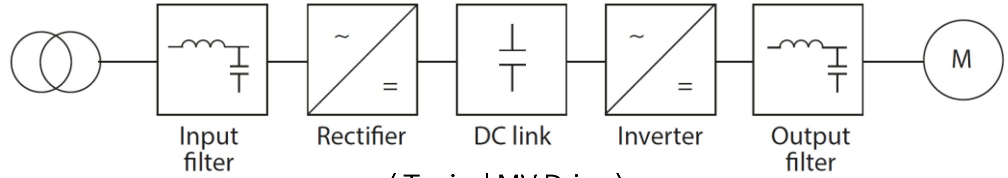
f	Internal frequency	U_{DC}	DC-link voltage
fs	Reference freq' set	U_L	No-load voltage vector
Δf	Calculated slip freq'	U_S	Stator voltage vector
I_{SX}	Reactive current (calculated)	U_{comp}	Load-dependent voltage comp.
I_{SY}	Active current (calculated)	U	Motor supply voltage
I_{SXO}, I_{SYO}	No-load current of x/y axis (calculated)	X_h	Reactance
I_U, I_V, I_W	Measured phase current	X_1	Stator leakage reactance
Rs	Stator resistance	X_2	Rotor leakage reactance
Rr	Rotor resistance	ωS	Stator frequency
θ	Voltage vector angle	Ls	Stator inductance
θ_0	"No-load" θ value	L_{Ss}	Stator leakage inductance
Δθ	Load-dependent angle comp.	L_{Rs}	Rotor leakage inductance
I0	"No-load" current value	Tc	Heat-sink temp. (measured)

2) Danfoss Flux Vector Control 원리



3.7 Medium Voltage Drives

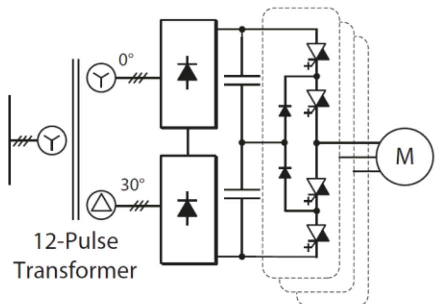
※ 전력 반도체 : 일반적으로 IGBT, IGCT, IEGT 사용
※ 각 토폴로지별 장단점이 있으며, 적용되는 어플리케이션의 요구 사항에 따라 적절한 토폴로지가 선택된다.



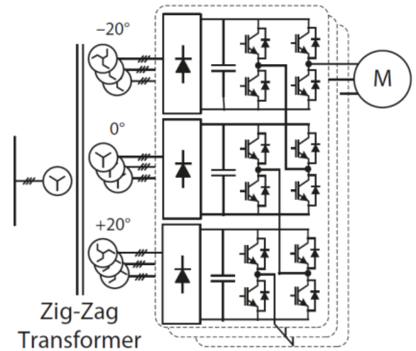
〈 Typical MV Drive 〉

- AC 출력전압의 dv/dt 및 THD 감소
- 인버터를 직렬 구조의 스위치 장치없이 특정 전압 레벨 구성 가능
- DC-link 커패시터 전압 밸런싱 필요

3L-NPC



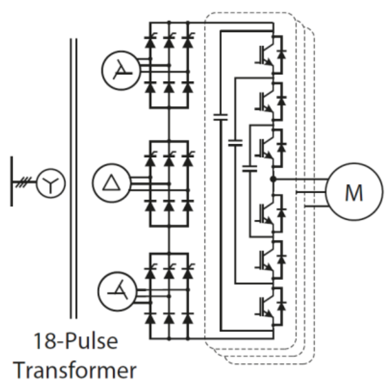
7L-CHB



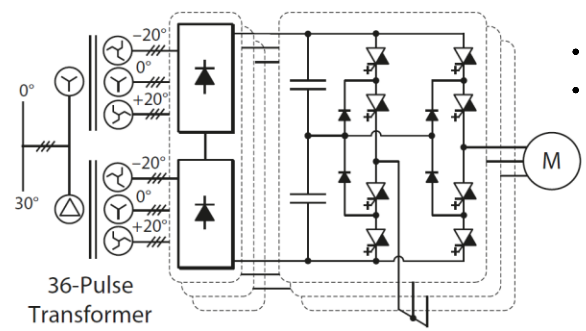
- 다수의 단상 3레벨 H브리지 유닛으로 구성
- Cascade로 연결하여 특정 전압 레벨 구성
- 복잡한 위상 변압기 필요
- 출력 필터가 필요 없다
- 복잡한 변압기 사용으로 대부분 다이오드 정류기 사용

- 많은 커패시터와 복잡한 제어방식으로 실제 사용은 제한적

4L-FC



5L-HNPC



- DC 전원 시스템의 복잡성과 비용 증가
- 그리드측 전류 개선으로 dv/dt 및 THD 낮다

〈 Different MV Drive Topologies 〉

4.1 기본 원리

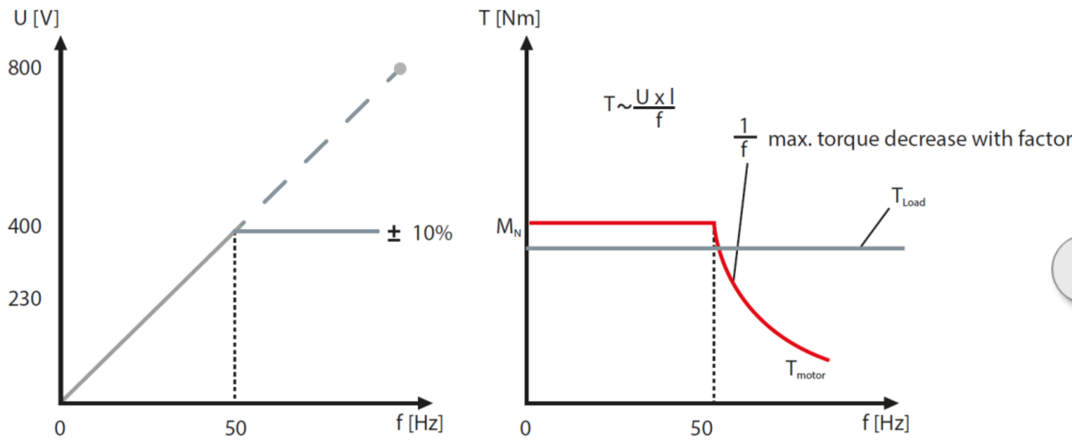
모터 명판에서 제공되는 기본 정보(전압, 주파수, 전류)에 의해 토크를 계산할 수 있다.

$$T = \frac{P \times 9550}{n} = \frac{\eta \times \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\varphi \times 9550}{f \times 120/p \times (1-s)} = \frac{k \times V \times I}{f}$$

$$T \approx \frac{V}{f} \times I$$

U/f Operation and Field Weakening

- 전압(U)과 주파수(f) 사이의 일정한 비율을 이용하여 전압원 AC 드라이브를 제어한다.
- 모터의 자속밀도(Φ)는 상수비(U/f)에 의해 결정된다.
- AC 드라이브는 U/f 비율에 따라 제어를 하며, 이러한 방식을 “U/f 특성 제어 " 라 한다.



〈 U/f 원리에 의한 전압과 토크 특성 〉

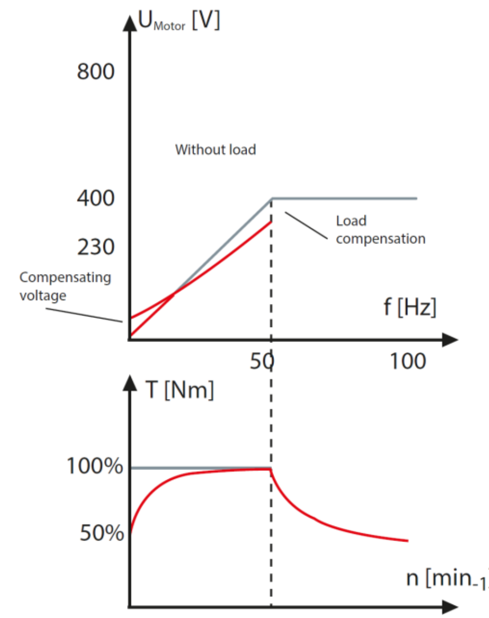
- 모터 절연 때문에, AC 드라이브 출력전압은 모터 정격전압 이내로 제한
- 주파수를 모터 정격 주파수 이상 증가 시킬 수 있다.
- 정격 주파수 이상에서는 모터 정격전압으로 제한되므로, 자속밀도가 감소
  ⇒ 이 속도 범위를 **Field weakening 영역** 이라고 한다.
- **자속밀도가 감소하면 최대 모터 토크가 감소**한다.
  공칭 토크가 1/f 감소하는 동안, stall torque는 1/f² 감소한다.

Running in Current Limit

- 모터 Shaft Torque 와 모터 Current의 관계
  - 모터 전류를 제한한다는 것은 토크도 제한된다는 것을 의미
- AC 드라이브는 요구되는 최대 토크와 관련된 Current Limit까지 연속 전류 운전이 가능하도록 설계되어야 한다.
  - 참고사항 : 속도가 감소하면 토크가 감소한다.

4.2 Compensation

- 모터 특성은 비선형이기 때문에 최적의 자화전류와 토크전류를 위해 보상이 필요하다.
  (보상 파라미터 : 기동시, 저속 범위, 정격 속도 까지의 범위)



Load-independent Start Compensation

(부하 독립적 Start 보상)

- 필요시 Start voltage를 수동으로 설정하여 저속범위에서 출력전압을 높인다. (전압 부스트)
- 기동시 최적의 토크를 생성
- 모터 병렬 운전시 비활성화 권장

Load-dependent Start Compensation

(부하 종속 Start 보상(기동 및 slip 보상))

- 유효 전류 측정에 의해 결정
- IxR보상, Boost, 토크 증대 또는
  Start compensation(Danfoss 명칭) 이라고도 한다.
- 전압 증가는 무부하 작동시 고정자 및 회전자 포화 발생으로 모터 과열 발생 가능성

Load Compensation

- 측정된 모터 전류로 부터 확인된 부하상태에 대해 모터 전압 상승
- 낮은 주파수 및 기동 중 Voltage Boost가 적용
- U/f 특성 대비 출력전압이 너무 높으면 모터 과여자 현상 발생

Slip Compensation

- 유도 전동기 slip은 일반적으로 정격속도의 약 5% 해당
  (대형 모터의 경우 1% 미만)
- 일반적으로 Slip 이하의 주파수 운전시 모터 정지
  → 모터 유효전류 측정으로 slip 보상
- 모터 메이커로 부터 slip 주파수(f_{slip})와 자화 또는 무부하 전류(I_{ϕ}) 계산
  → slip주파수는 유효전류(무부하전류와 측정전류 차이)에 따라 선형적으로 조정

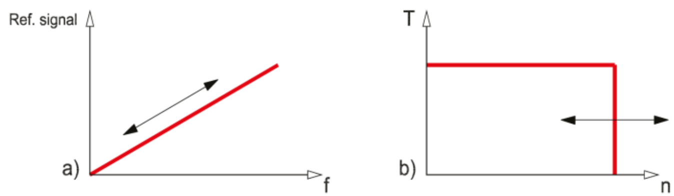
4.3 Danfoss Automatic Motor Adaptation (AMA, Identification)

- Identification 또는 Auto-tuning이라고도 한다.
- 고정자 저항 및 인덕턴스 등 모터 파라미터 변수를 측정한다.
- 모터 정지상태에서 측정하는 "Static(정지)" 튜닝과 특정속도로 가속하여 측정하는"Dynamic(회전)" 튜닝이 있다.
  - 정지튜닝시 모터가 회전하지 않아야 한다.
  - 회전튜닝시 모터가 부하/기계에서 분리되어야 한다.

4.4 Operation

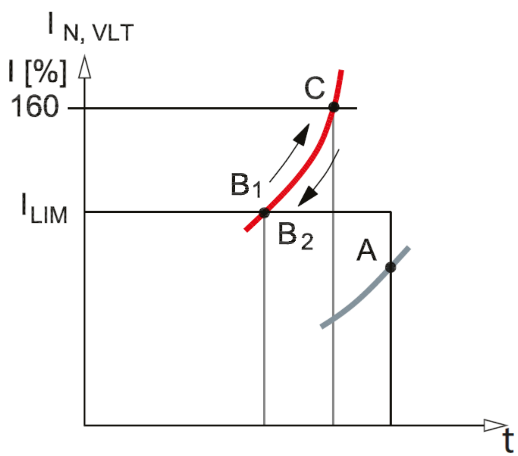
Motor Speed Control

- 속도 Ref' 증가에 따라 모터 속도 상승하고,
  모터 토크 특성의 수직부분이 오른쪽으로 이동



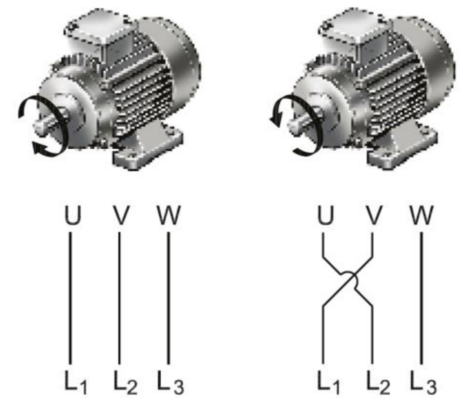
〈 Reference와 Motor torque 관계 〉

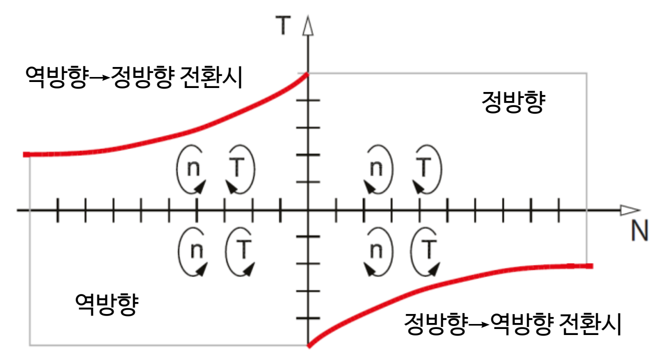
- if 부하 토크 〈 모터 토크, Motor 속도 = Ref' 속도 (A)
- if 부하 토크 〉 모터 토크, Motor 속도 〈 Ref' 속도 (B)
  Overload에 의해 Trip없이 속도 증가 가능하지만 Overload 시간 제한됨



〈 Current Limit 와 Over Current Limit 〉

- 모터의 회전 방향은 공급 전압의 위상 순서에 의해 결정



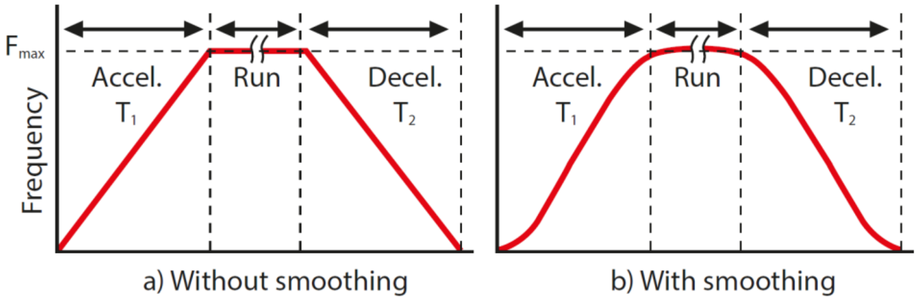


〈 역회전 전환시 Braking torque 〉

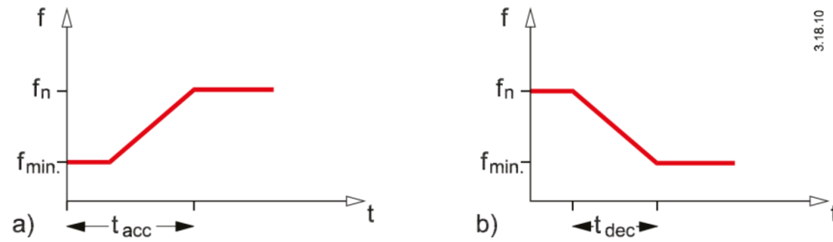
가감속 Ramp (Ramp Up and Down)

- Ramp : 속도가 천천히 전환되도록 하는 기능
- 가감속 Ramp에 대한 기준 속도는 드라이브에 따라 다르다.
  (일반적으로 최소 주파수에서 최대 주파수 까지의 도달시간)

- **S-Ramp** : 속도 전환 시점 및 목표 속도 도달시 가감속 ramp를 smoothing



〈 Linear Ramp a) and S-ramp b) 〉



〈 Acceleration and deceleration times 〉

- 모터 관성과 부하 관성을 알면, 최적의 가속(t_{acc}) 및 감속(t_{dec}) 시간을 계산할 수 있다.

$$t_{acc} = J \times \frac{n_2 - n_1}{(T_{acc} - T_{fric}) \times 9.55} \qquad t_{dec} = J \times \frac{n_2 - n_1}{(T_{acc} - T_{fric}) \times 9.55}$$

J	: the moment of inertia of the motor shaft and load [kgm^2]
Tfric	: the friction torque of the system [Nm]
Tacc	: the overshoot torque used for acceleration [Nm]
Tdec	: the braking torque that occurs when speed reference is reduced [Nm]
n1 and n2	: the speeds at frequencies f1 and f2 [min^{-1}]

Motor Torque Control

- **토크 제어 목적**
  ① 기계 등의 손상 방지를 위한 토크 제한
  ② 다수의 모터가 부하를 분담하는 토크 제어
- 모터의 slip, 역률 및 온도에 따라 전류와 토크의 관계가 달라진다.
  즉, 일반적인 전류 측정에 따른 제한으로 토크 제어는 정확하지 않다.
- Space Vector 또는 Flux Vector의 경우
  전류를 3상 벡터 방식으로 측정하여, 토크 전류를 계산하므로
  토크 제한이 정확하다.

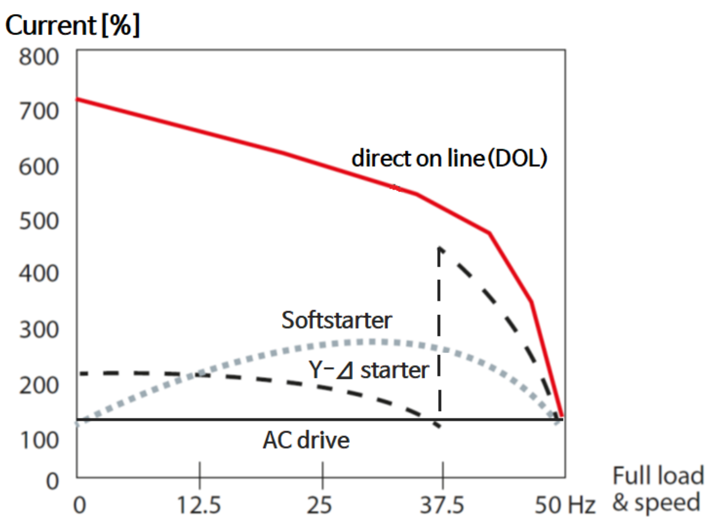
- **Droop 기능**
  하나의 모터가 속도를 제어하고, 그 외 드라이브는 동일한 속도를
  따르도록 하여, 자동으로 부하를 분배하는 기능

- **Example**
  100m 길이의 컨베이어 벨트에 다수의 모터 구성. 모터 중 하나가 다른 모터 보다 조금
  더 빠르게 작동하는 경우, 이 모터는 더 많은 토크를 제공해야 한다.
  - 모터에 과부하가 걸리고 과열 될 수 있다.
  - 부분적인 높은 토크로 인하여 벨트가 손상될 수 있다.
  - 풀리와 구동 드럼이 과도한 마모로 인해 슬립이 생길 수 있다.

  이 경우 토크 분배가 중요

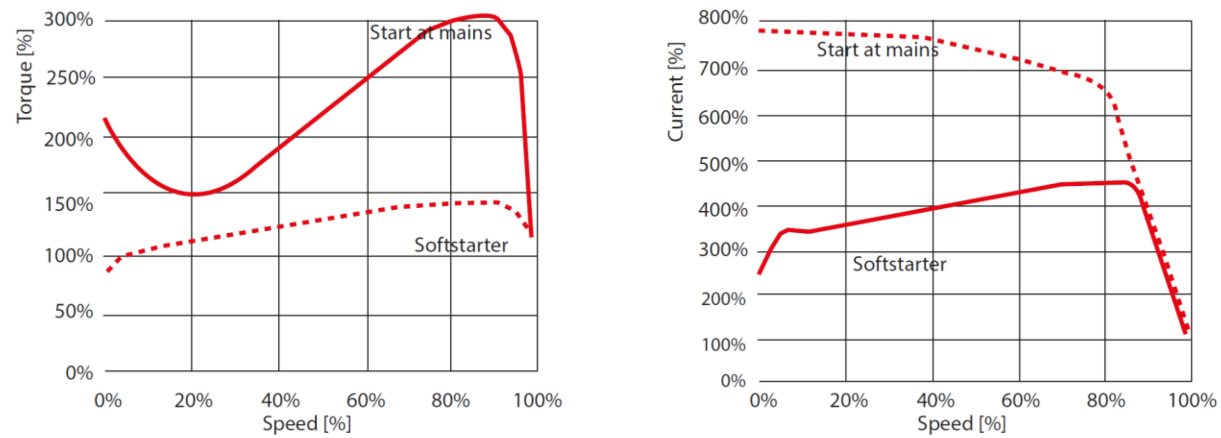
에너지 효율적 모터 기동

- 모터 기동을 위한 에너지는 3부분으로 나눌 수 있다.
  ① 부하 작동에 필요한 에너지
  ② 부하 및 모터 가속에 필요한 에너지
  ③ 모터 및 제어 손실

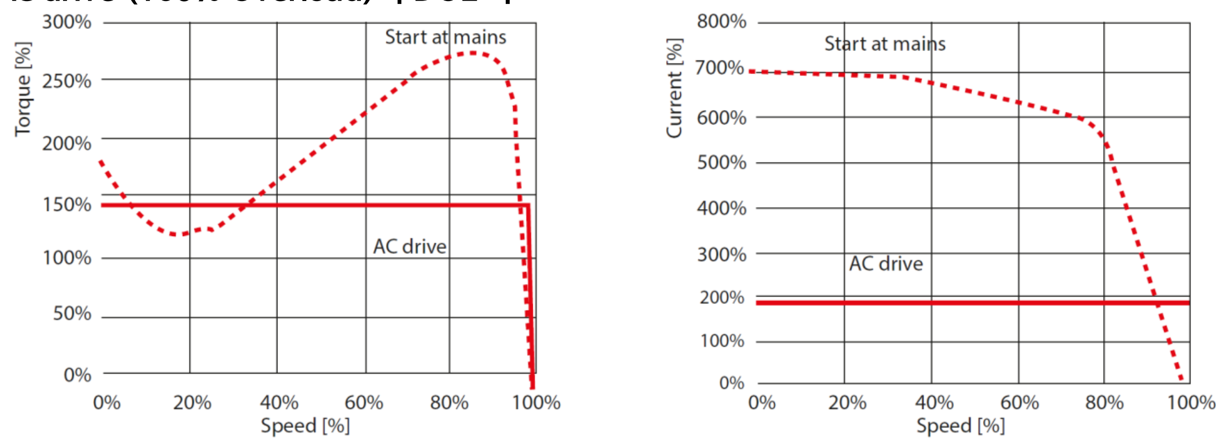


〈 Typical motor current curves 〉

Softstarter (400% current limit)와 DOL 비교



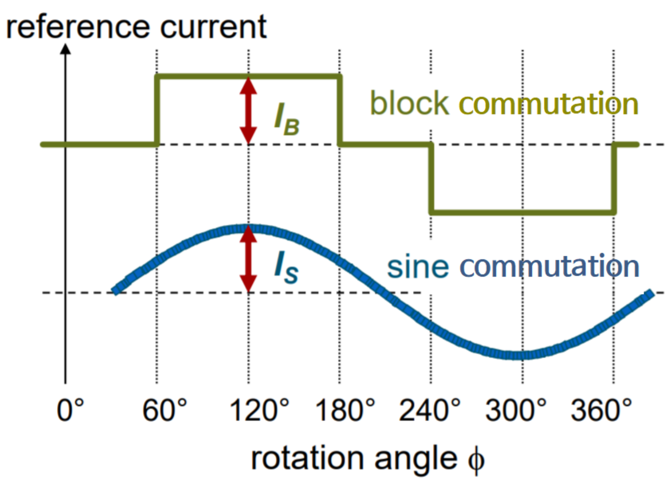
AC drive (160% Overload)와 DOL 비교



에너지 효율적 모터 제어

역기전력 파형에 가깝게 공급 전압 파형 일치 제어

- Block commutation 과 Sine commutation



일정 토크 각도 (Constant Torque angle)

- 토크 전류 벡터를 y축에 두고, 회전자 d축 전류를 0으로 제어함으로써 일정 각도 유지

Maximum Torque Per Ampere

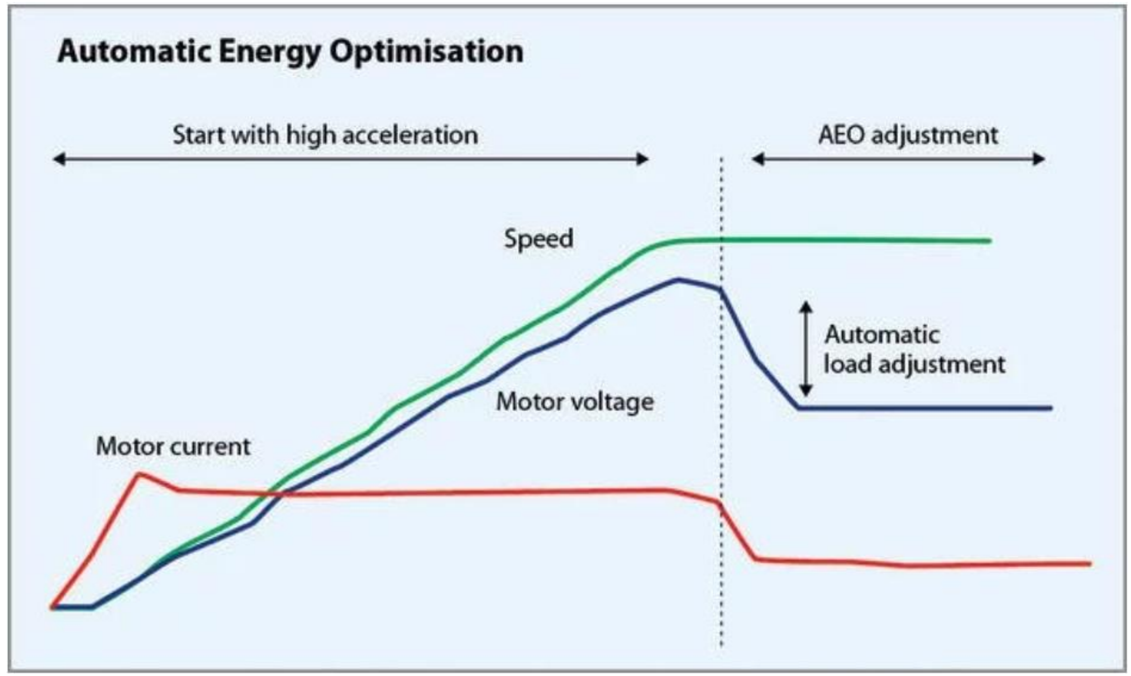
- 자기저항 토크를 고려하면서 필요한 토크에 대한 고정자 전류 크기를 최소화

일정 역률 제어 (Constant Unity Power Factor control)

- 전류와 전압 벡터 사이의 각도가 일정하게 유지되므로 인버터의 피상 전력 정격을 줄일 수 있다.

AEO (Automatic Energy Optimization)

- 부하 감소시 자속 강도를 줄이는 기능
- 어플리케이션이 안정된 상태에 도달하면 자동 조정(Auto adjustments) 수행
- 자속 강도(magnetization level)와 그에 따른 에너지 소비를 줄인다.

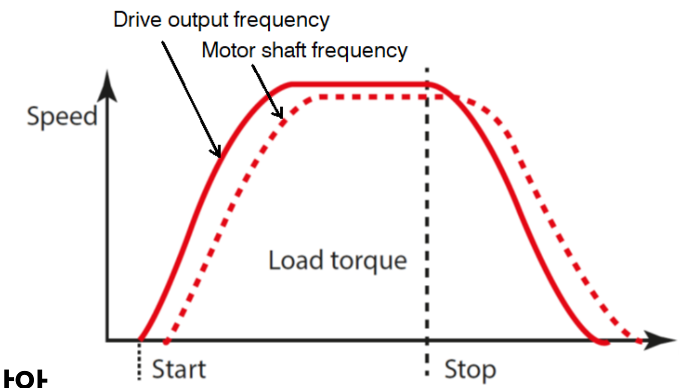


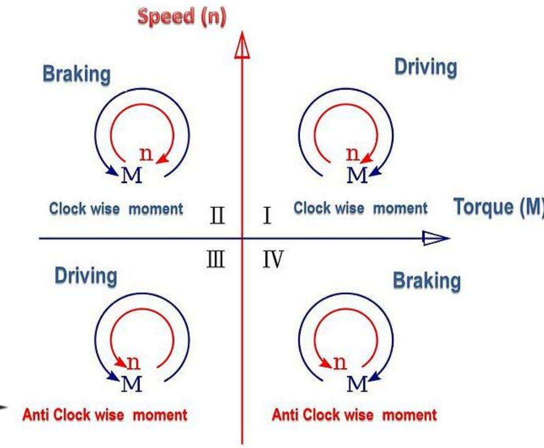
4.5 Dynamic Brake Operation

AC 드라이브의 4사분면 동작

AC 드라이브에 의한 고정자 주파수(및 전압)의 감소 시
모터의 발전기 역할로 기계 에너지가 전기 에너지로 변환된다.

- 제동 에너지는 드라이브의 DC-link에 저장
  → AC 드라이브는 자체 보호를 위해
  "과전압(Over voltage)" 발생시 트립 조치





〈 4-quadrant operation 〉

※ "과전압 (Over voltage)" 고장 발생시 조치 방안

① 감속 Ramp 시간 연장

- OVC(**OverVoltage Control**) 기능을 이용한 Ramp 자동 연장
- Ramp 시간 연장으로 이동 거리가 길어질 수 있다.

② 모터의 에너지 분산(모터를 제동 저항으로 사용)

- 모터를 다시 자화시킨다. (기능: AC Brake, **Flux Brake**, compound braking)
- 제동 횟수가 많을 수록 모터 과열 상승

③ "Brake chopper"와 제동저항 장착

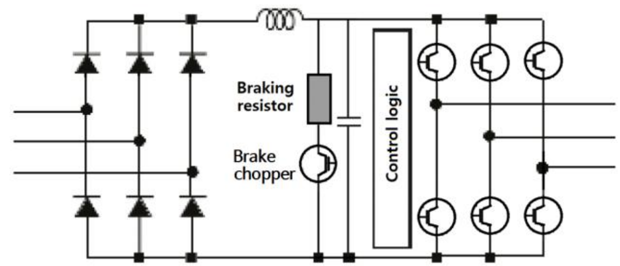
- chopper 회로에 의해 연결된 제동저항으로 초과 전압 제거
- 열, 공간 및 무게 문제 발생할 수 있다.

④ 주 전원으로 에너지를 공급하기 위한 회생제동 장치 사용

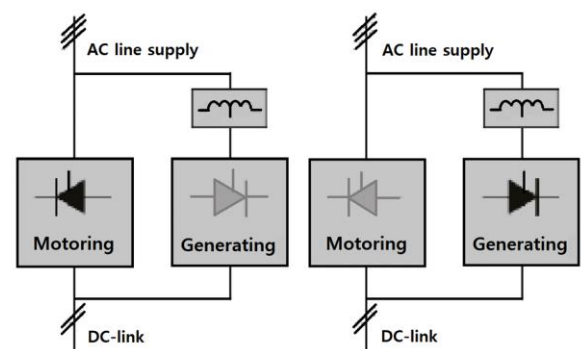
⑤ 주 전원으로 에너지를 회생하기 위한 Active 정류기 사용

⑥ Common DC bus를 통해 다른 드라이브로 에너지 공급

⑦ 에너지 저장소에 저장(예: 배터리)



〈 Brake chopper and resistor 〉



〈 Regenerative braking unit 〉

4.6 Static Brake Operation

※ 모터 shaft의 정지를 위한 Brake 및 Coasting 기능

① Coasting to stop

- Motor coasting으로 전압과 주파수가 즉시 중단되고(0V/0Hz), 모터에 전원이 공급되지 않는다.
- 부하 속도와 관성에 따라 정지될 때 까지 수 초~수 시간 소요될 수 있다.

※ **다음의 3가지 기능은 Stop Command 실행 후 수행**된다.
회전방향 반전 시 이 기능 미사용 권장,
(Ref' 값 0Hz는 Stop Command로 작동하지 않는다)

② DC Braking

- 모터 3상 중 2상에 DC 전압을 인가하여 고정자에 정지 자기장을 생성하는 기능
  정격 주파수에서 높은 제동 토크를 생성할 수 없다.
- 모터 과열 발생 시킬 수 있다.
- DC Braking에 필요한 3가지 parameter
  - Braking 주파수 : 모터 slip 주파수를 기준으로 사용(10Hz 미만 권장)
    0Hz 설정은 비활성화를 의미
  - Braking 전류 : 모터 과열 방지를 위해 모터 정격 전류를 초과하지 않아야 한다.
  - DC braking 시간 : 어플리케이션에 따라 다르다.

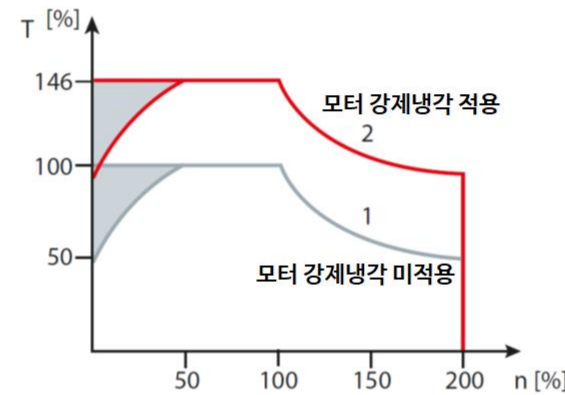
③ DC Hold

- 모터의 "auxiliary heating"을 위해 사용할 수 있다.
  모터에 정전류를 공급하므로, 모터 과열방지를 위해 모터 정격 전류를 초과하지 않아야 한다.

④ Electromechanical Brake

- 전자기계식 Brake는 모터 샤프트를 정지시키는데 사용된다.
  드라이브에서 릴레이를 통해 제어할 수 있다.
- 전자기계식 Brake 사용시 고려 사항
  - Motor pre-magnetization (최소 전류 필요)
  - 활성화 또는 비활성화 되는 주파수
  - 릴레이 반응 시간(delay time)
- 예: 호이스트의 경우, Start command 이후 최적의 pre-magnetization을 확인한 다음 brake 해제

※ Motor Heating and Thermal monitoring



Graph 1: Motor of rated size, e.g. 15 kW
Graph 2: Oversize motor, e.g. 22 kW

모터 온도 모니터링 방법

① Calculation : 모터 수식 모델 기반 계산
② Measurement : 모터 내부 써미스터 또는 PTC 센서 사용

4.7 Functional Safety

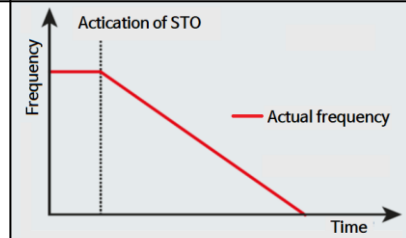
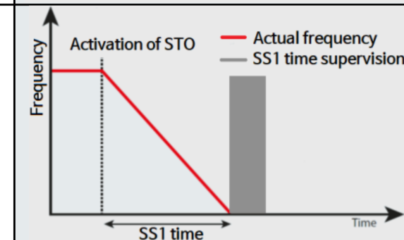
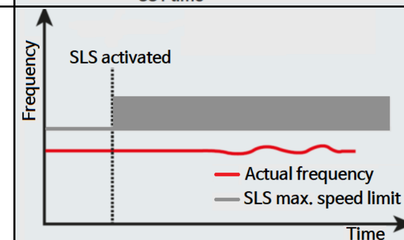
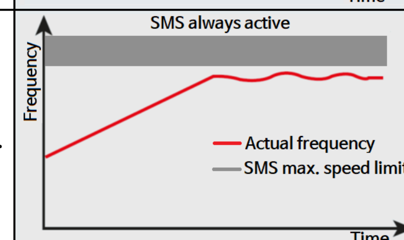
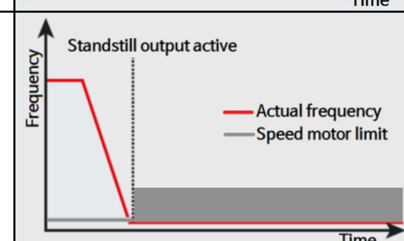
구성 부품 또는 시스템의 기능 오류에 의한 위험에 대한 보호 기능 필요한 안전 수준(required safety lecel)은 위험 분석(risk analysis)을 통해 정의된다.

〈 Safety Level and Standard〉

Safety Level	Abbreviation	Standard
Category	Cat	EN 954-1
Performance Level	PL	EN ISO 13849-1
Safety Integrity Level	SIL	IEC 61508 / IEC 62061

[EN/IEC 61800-5-2 additional functional safety function]

- SOS Safe Operating Stop
- SS2 Safe Stop 2
- SDI Safe Direction
- SBC Safe Brake Control
- SMA Safely-Monitored Acceleration
- SLP Safely-Limited Position
- SCA Safe Cam
- SLI Safely-Limited Increment
- SSR Safe Speed Range
- SBT Safe Break Test
- SQS Safe Quick Stop
- SLA Safely-Limited Acceleration
- SAR Safe Acceleration Range
- SLT Safely-Limited Torque
- STR Safe Torque Range
- SMT Safe Motor Temperature

Function	Description	Illustration
Safe Torque Off **STO**	모터는 **Torque/Rotation을 생성하는 에너지를 얻지 못한다.** 이 기능은 IEC 60204-1에 따른 Stop CAT. 0을 준수한다.	
Safe Stop 1 **SS1**	기계의 구성요소에 전원이 공급되어 기계를 정지하는 **controlled stop.** **전원은 정지상태에 도달한 경우에만 차단된다.** 이 기능은 IEC 60204-1에 따른 Stop CAT. 1을 준수한다.	
Safe Limited Speed **SLS**	안전한 속도 상태를 **Safe Limited Speed**라고 한다. 이를 통해 기계가 일정한 안전 속도로 작동한다. 더 빨리 동작할 경우 Stop 기능이 활성화 된다.	
Safe Maximum Speed **SMS**	**정의된 최대 속도보다 높은 수준에서 기계가 동작하지 않도록 한다.** 기계 손상을 방지하고 위험을 줄인다. 기능적으로는 SLS와 동일한 원리이다.	
Safe Speed Monitor **SSM**	SSM은 zero speed를 모니터링하여, **0 속도에 도달할 경우 출력신호를 high로 설정한다.** 이 기능은 도어의 잠금을 해제하거나 단순히 기계가 정지상태임을 표시하는 데 사용할 수 있다.	

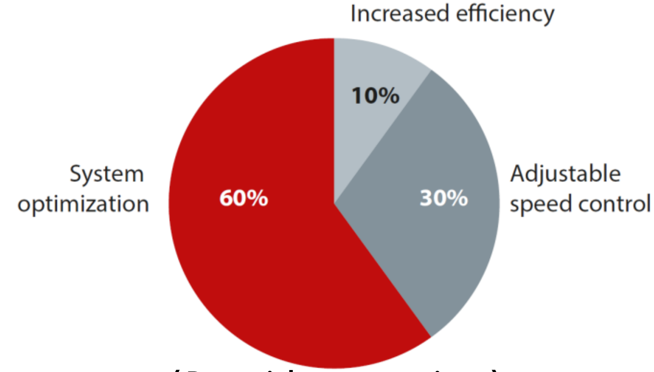
시스템에서 얻을 수 있는 총 **잠재적 에너지 절감**을 100%라 가정할 때

① 보다 효율적인 부품 사용시 : 약 10% 절감

② 조정 가능한 속도 제어시 : 약 30% 절감

대부분의 어플리케이션(약 60~70%)이 속도 제어에 적합하기 때문에 높은 에너지 절약을 빠르고 쉽게 구현 가능
특히 어플리케이션의 거의 50%를 차지하는 팬과 펌프는 엄청난 에너지 절약 잠재력을 포함한다.

③ 전체 시스템 최적화시 : 최대 약 60% 절감 할 수 있다.



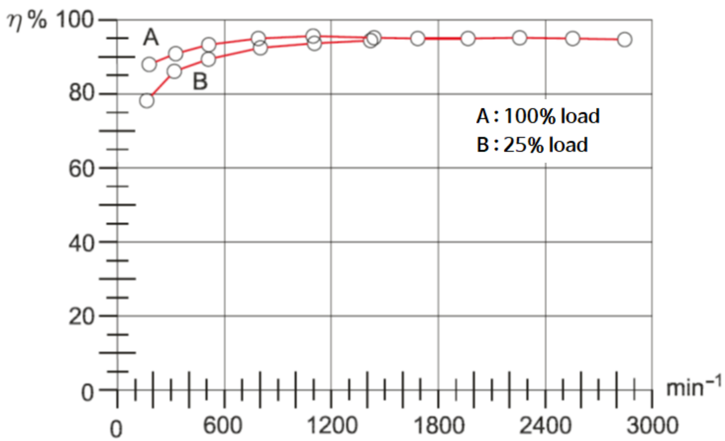
〈 Potential energy savings 〉

Motor + AC Drive 효율

AC 드라이브에 의해 작동되는 모터로 구성된 시스템의 효율 계산식

$$\eta_{System} = \eta_{Motor} \times \eta_{AC\ drive}$$

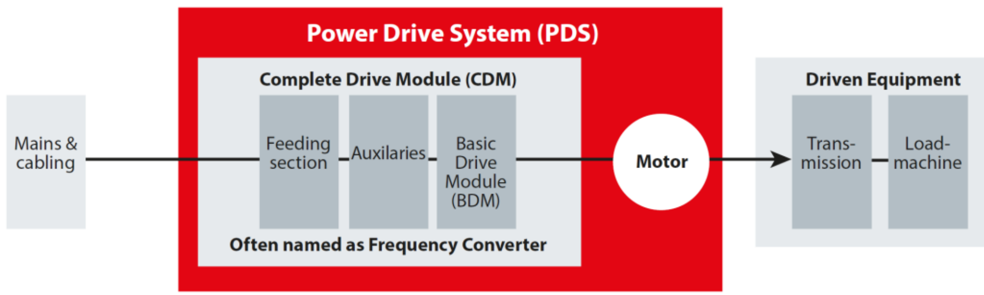
AC 드라이브는 부하와 관계없이 전체 제어범위에서 효율이 높다TM



〈 AC drive 효율 예 〉

Direct driven	100%	Flat belt	96...98%
Spur gear	98%	V-belt	92...94%
Bevel gear	98%	Tooth belt	96...98%
Worm gear	95%	Chain	96...98%

〈 Transmission 효율 〉



〈 CDM과 PDS 정의 〉

※ Danfoss 에너지 효율 계산 Tools

MyDrive® ecoSmart™ (ecoSmart.danfoss.com 참조)

- 모터 데이터 및 드라이브 선택에 따른 시스템 효율성 계산

가변 토크 어플리케이션

일반적으로 Fan, Pump가 해당

$$\frac{Q_1}{Q_2} \approx \frac{n_1}{n_2}$$ Flow는 speed에 비례

$$\frac{H_1}{H_2} \approx \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$$ Presure or head는 speed의 제곱에비례

$$\frac{P_1}{P_2} \approx \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$ Power는 speed의 세제곱에비례

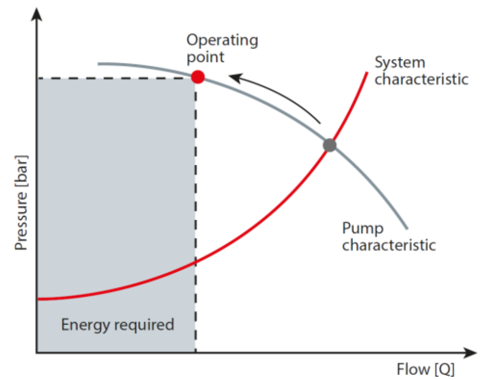
일정 토크 어플리케이션

일반적으로 컨베이어 벨트, 호이스트, 믹서가 해당

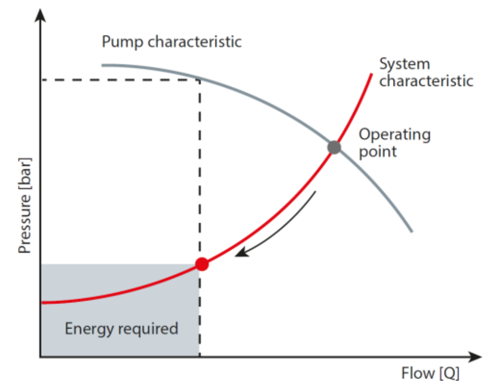
- 이동하는데 필요한 토크는 항상 일정
- 에너지는 필요한 토크와 모터 속도에 비례

$$P \approx T \times n$$

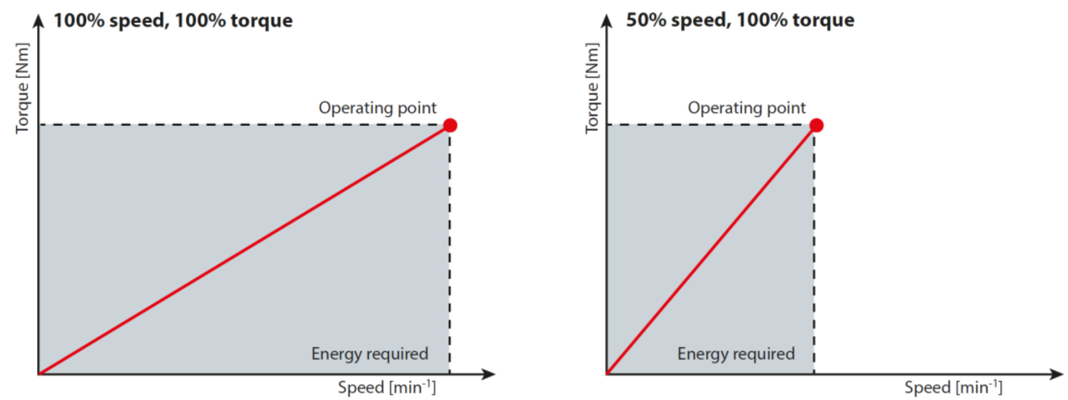
- 냉동 사이클의 경우, 일정한 부하로 속도가 감소하면 에너지가 절감 효과
- 컨베이어 벨트의 경우, 속도가 감소해도 이동거리가 일정하기 때문에 소비 에너지에 영향을 미치지 않는다.



- 대부분의 팬 및 펌프는 swil flap, damper, throttle을 이용하여 흐름 제어
- Pump 특성곡선을 따라 동작 point가 이동한다.



- 팬/펌프가 속도에 의해 제어되는 경우, 동작 point는 시스템 특성곡선을 따라 이동한다.
- 기계적 제어에 비해 에너지 절감이 훨씬 높다.



〈 속도 차이와 부하에 따른 소비 전력 〉

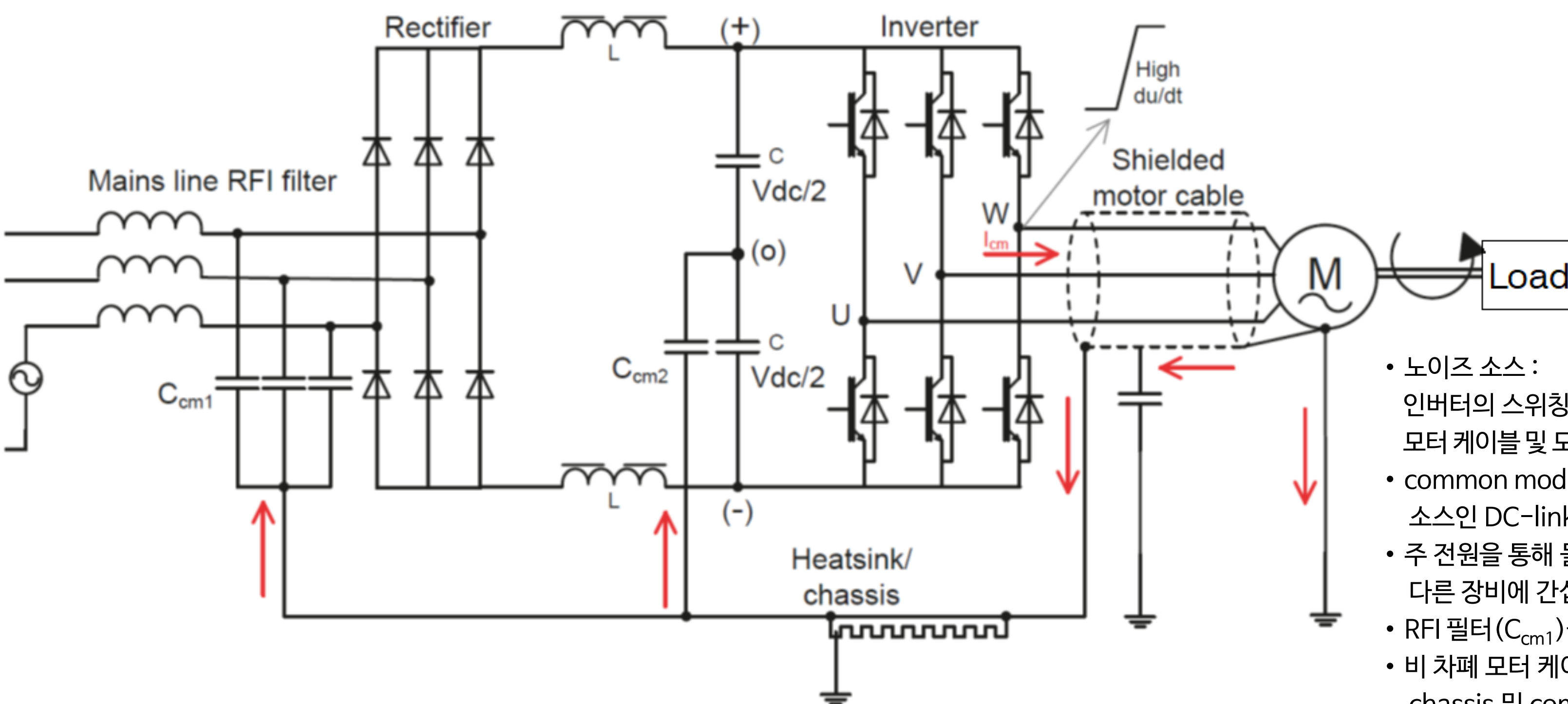
6. 전자파 적합성(EMC)

6.1 EMI and EMC

- **EMI**(electromagnetic interference) : 전자파 교란으로 인한 장비의 성능 저하
- 전자파 노이즈 : 전도(conducted) 노이즈, 방사(radiated) 노이즈
- EMC(electromagnetic compatibility) : 전자파 적합성
  장비나 시스템이 어떠한 전자기 방해를 발행시키지 않으면서,
  전자기 환경에서 만족스럽게 동작하는 능력

- 전자파 간섭 결합(coupling) 메커니즘
  - Galvanic coupling : 두 회로가 공통의 전기 전도성 연결부를 공유할 때
  - Capacitive coupling : 기생 커패시턴스에 의해 두 도체간 노이즈 결합
  - Inductive coupling : 전류가 흐르는 도체 주변의 자기장이 다른 도체에 유도될 때
  - Electromagnetic coupling : 송신 안테나 역할을 하는 도체를 통해 전자기 에너지 방출 및 수신 안테나 역할을 하는 도체를 통해 교란을 수신

6.2 EMC and AC Drives



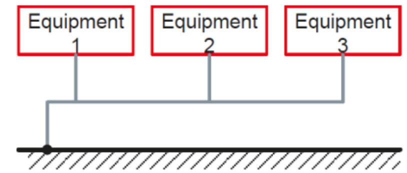
- 노이즈 소스 :
  인버터의 스위칭에 의한 High du/dt 발생으로 모터 케이블 및 모터 접지에 common mode 전류 발생
- common mode 전류는 폐루프를 형성하여, 소스인 DC-link로 돌아가야 한다.
- 주 전원을 통해 돌아 오는 common mode 전류는 다른 장비에 간섭을 발생시킬 수 있다.
- RFI 필터(C_{cm1})을 사용하여 최소화 한다.
- 비 차폐 모터 케이블 사용시, chassis 및 common-mode 커패시터를 통해 일부만 반환되므로 주 전원망에 간섭이 발생한다.

6.3 Grounding and Shielding

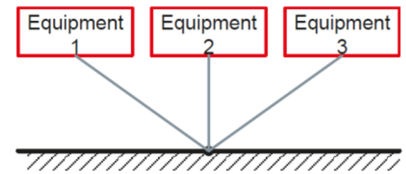
Grounding

- 접지 목적 : ① 전기 절연 성능 저하로 인한 감전 위험 방지 ② 노이즈 감소
  전기 안전은 항상 EMC보다 우선 순위라는 점에 유의해야 한다.
- 연결된 장비들의 등전위 제공을 위해 접지 연결 임피던스는 가능한한 낮아야 한다.

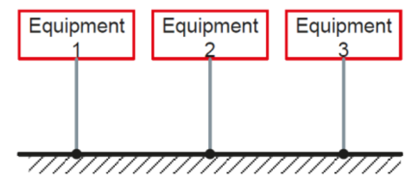
Series



Parallel

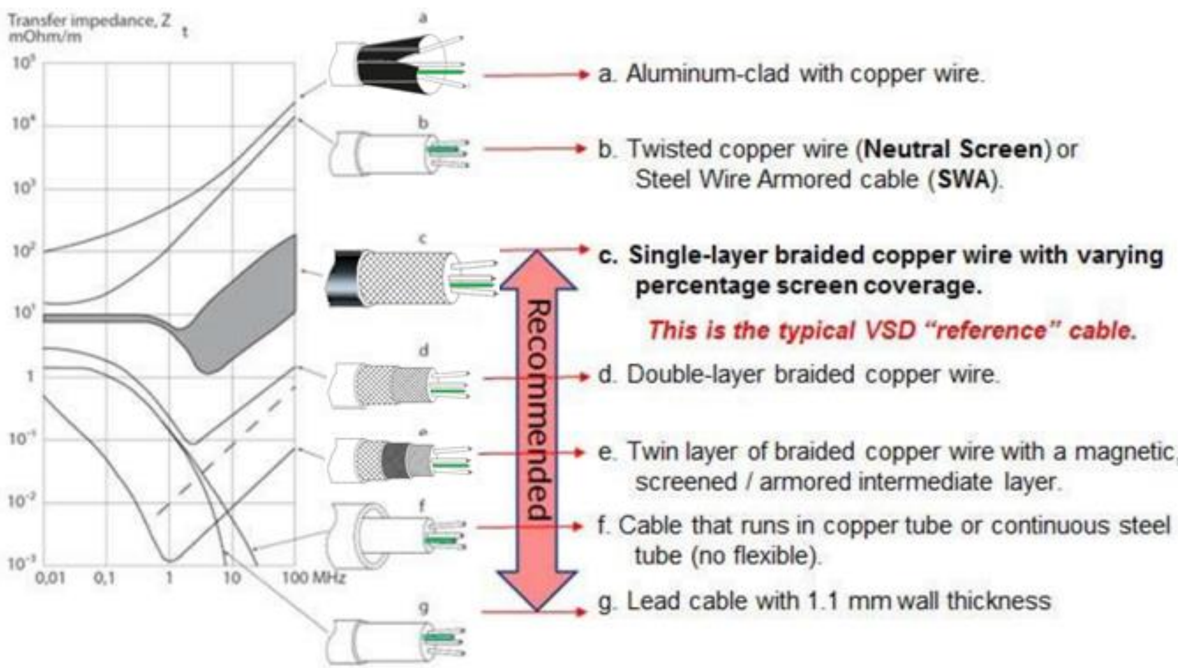


Multi-point grounding

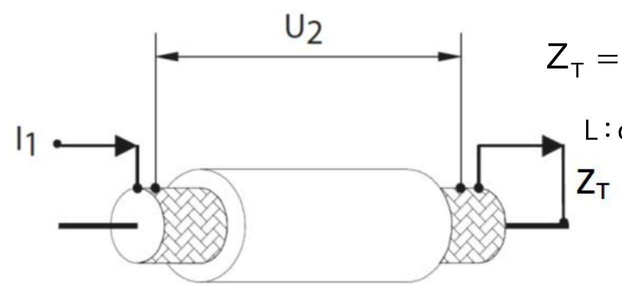


Shielding

- 차폐 목적 : ① 외부 간섭으로 부터 보호 ② 외부로의 간섭 방지
- 차폐 케이블은 전원(모터 케이블 및 제동저항 케이블)과 신호(아날로그 신호, 통신) 모두에 사용된다.
- 전달 임피던스 값이 낮을수록 차폐 성능이 우수



〈 Type of Screen Cables per transfer impedance 〉

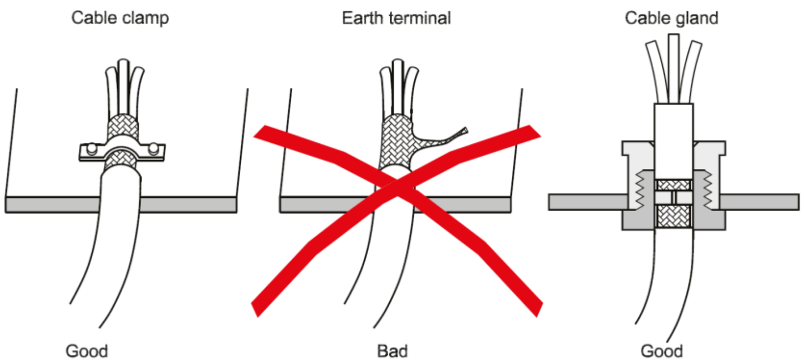


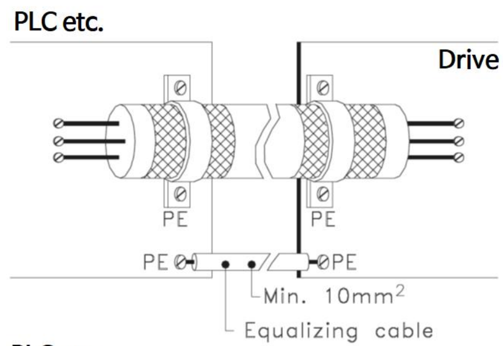
$$Z_T = \frac{U_2}{I_1 \times L}$$

L : cable length

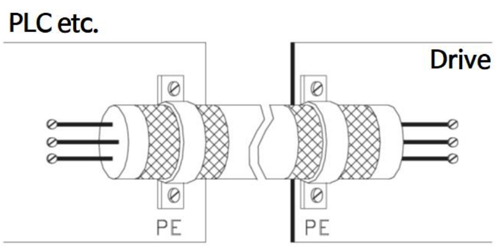
〈 transfer impedance 〉

Grounding of the cable shield

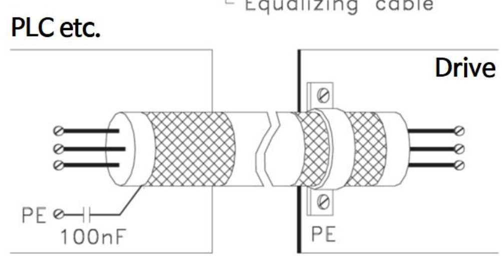




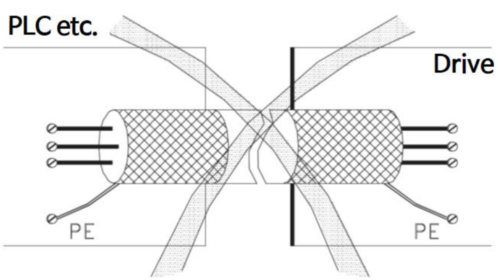
Ground potential between PLC and drive: Disconnect cables and measure voltage with voltmeter to check.
Use equalizing cable or make sure units are bolted together.



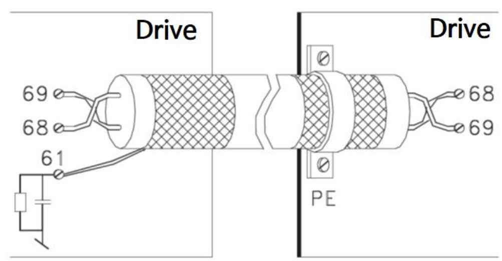
Control cables and serial communication cables should normally be grounded at both ends.



50/60 Hz ground loop: Use current clamp meter to check.
=> Ground one end through 100 nF capacitor with short leads.

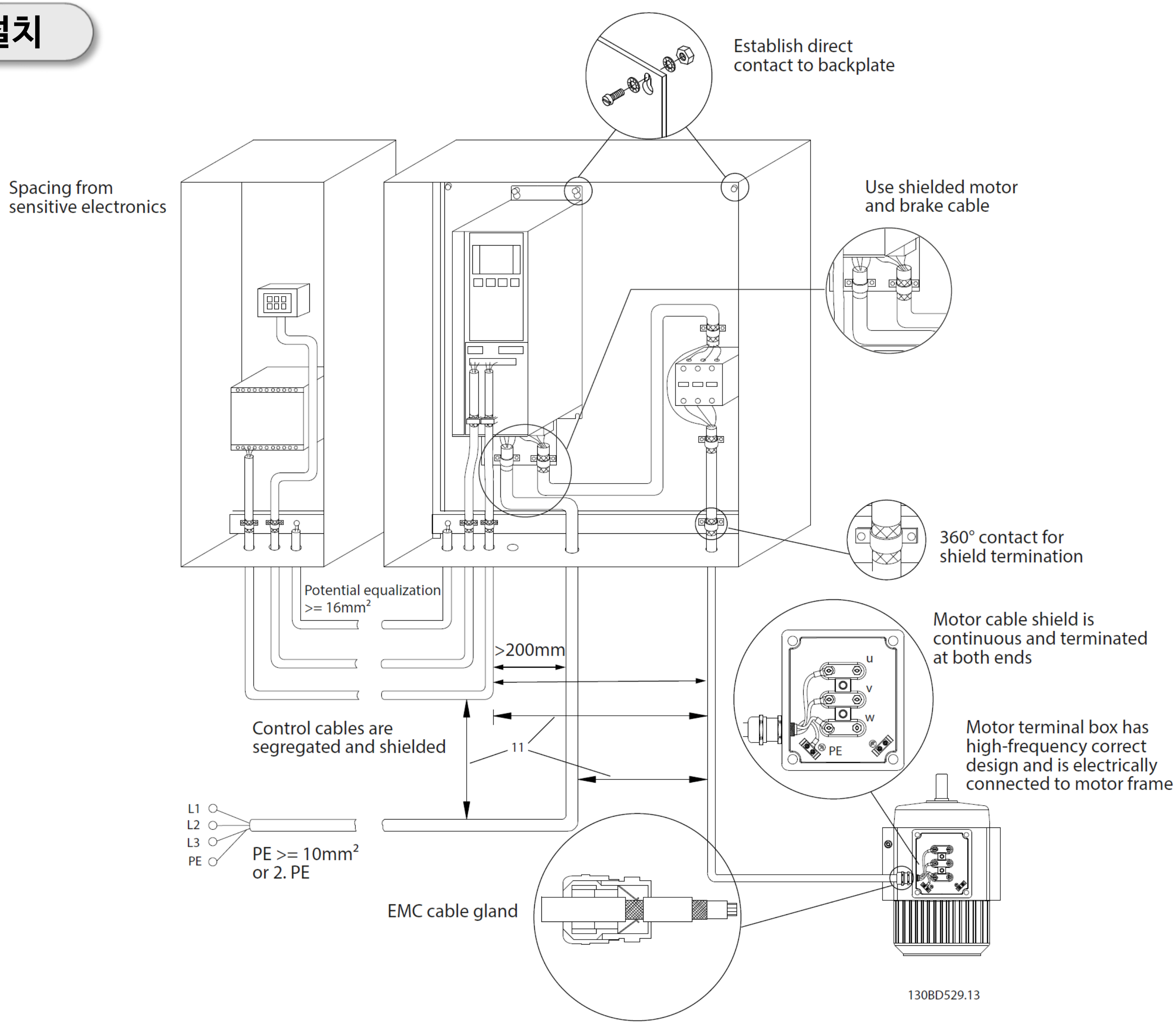


Never terminate shield through pigtail.



Potential equalizing currents in serial communication cable shield between two drives:
=> Connect one end of the shield to the special shield connection terminal with RC decoupling. Remember "correct" pigtail installation!

AC Drive 설치

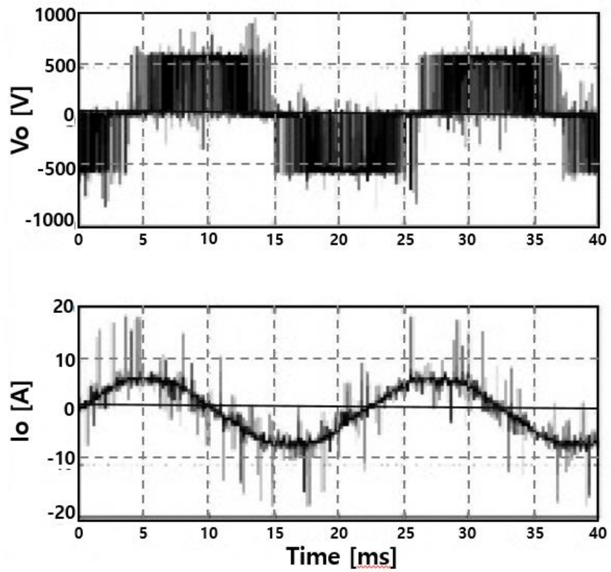

Establish direct
contact to backplate
Spacing from
sensitive electronics
Use shielded motor
and brake cable
360° contact for
shield termination
Potential equalization
>= 16mm²
>200mm
Motor cable shield is
continuous and terminated
at both ends
u
v
w
PE
Control cables are
segregated and shielded
11
Motor terminal box has
high-frequency correct
design and is electrically
connected to motor frame
L1
L2
L3
PE
PE >= 10mm²
or 2. PE
EMC cable gland
130BD529.13

6.4 Output filters

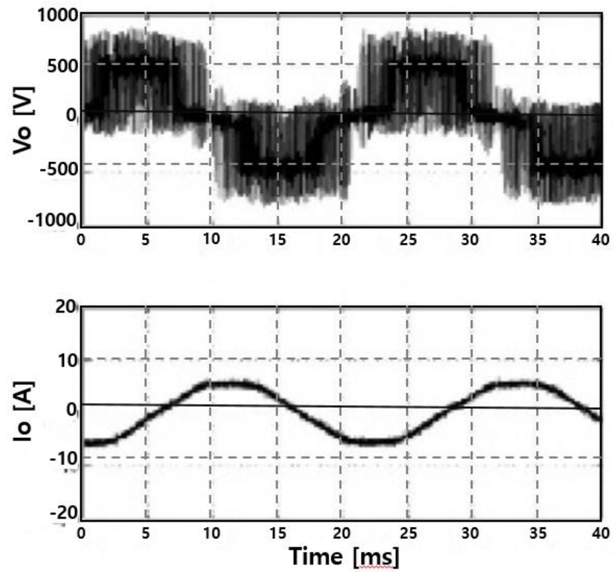
드라이브 동작에 의해 Motor winding isolation stress, Bearing stress, 모터 스위칭 노이즈 및 전자파 간섭 등 2차 영향이 발생

⇒ 이러한 영향을 완화하기 위해 드라이브 출력에 필터 설치(du/dt 필터, Sine wave 필터, Common-mode 필터)

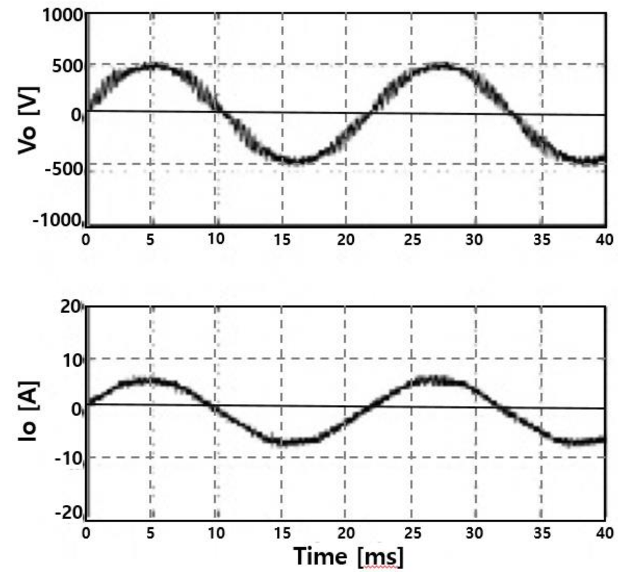
Motor 입력 전압/전류(without Filter)



Motor 입력 전압/전류(with du/dt Filter)



Motor 입력 전압/전류(with sine Filter)



dU/dt 필터

- 차단 주파수가 드라이브 스위칭 주파수 이상으로 설계된 LC필터(때로는 댐핑저항 포함)
- du/dt 필터는 드라이브 출력 전압펄스의 slew rate를 500V/us 미만으로 제한한다.
  (모터 권선의 절연 스트레스 감소)

Sin-wave 필터

- LC Low-pass filter로, du/dt 필터와 달리 출력 전압의 모든 고주파 성분을 제거하도록 설계. 정현파 전압 생성
- 모터 직입 기동 방식과 동일한 전압 스트레스
- AC 드라이브 모터가 아닌 범용의 구형 모터에 적합
- 베어링 전류 및 전압 반사 제거, 모터 노이즈 레벨 감소 스트레스의 원인인 고주파 성분 제거
- 사인파 필터 적용시 훨씬 긴 모터 케이블 사용 가능
- 약 7~10% 전압 강하 발생

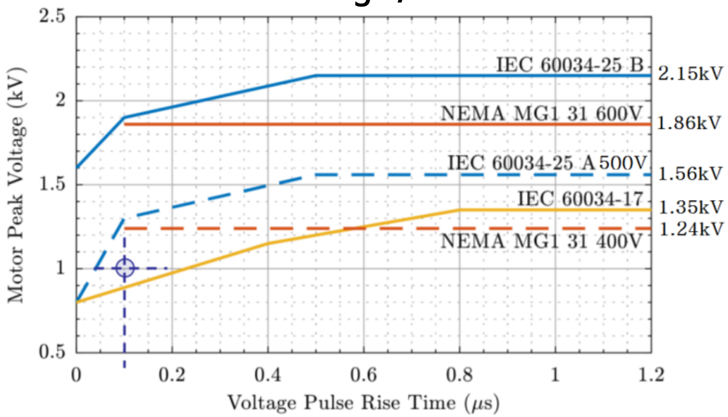
Common-mode 필터

- 베어링 및 접지 전류를 줄이는데 사용
- Common-mode 전류만 임피던스 증가
- 페라이트는 전도성이므로 케이블이 충분히 절연되어야 한다.
- 드라이브 출력 바로 뒤에 다른 출력 필터보다 먼저 설치
- PE를 제외한 3상 출력 케이블을 하나의 페라이트에 통과되도록 설치

Standard (모터 단자대에서의 rise-time and peak voltage)

- 모터 단자의 rise-time과 peak voltage에 대한 standard limit (IEC 표준과 NEMA는 약간 차이가 있다.)

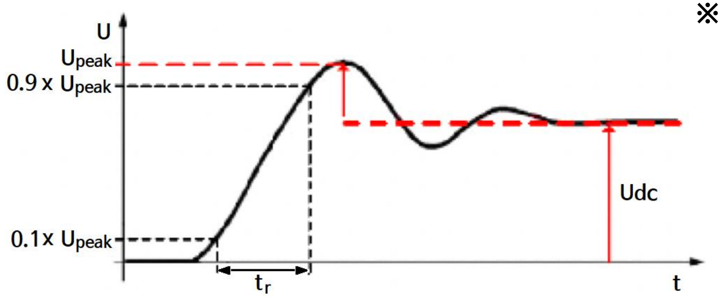
Motor Pulse withstand Characteristic Curves Peak Voltage / Rise Time



Motor 절연등급

Motor rated voltage		Voltage Spikes motor terminals	Rise Time	dv/dt Inverter terminals	적용 규정
General Purpose motor	600V 미만	Vpeak ≤ 1000V	≥ 2us		NEMA MG1 30
	600V 이상	Vpeak ≤ 2.4 p.u	≥ 1us		
Inverter motor	600V 미만	Vpeak ≤ 2.04 p.u	≥ 0.1us		NEMA MG1 31
	600V 이상	Vpeak ≤ 3.1 p.u	≥ 0.1us		
WEG社 motor	$V_{nom} \le 460V$	Vpeak ≤ 1600V	≥ 0.1us	≤ 5200V/us	
	$460 < V_{nom} \le 575V$	Vpeak ≤ 1800V		≤ 6500V/us	
	$575 < V_{nom} \le 690V$	Vpeak ≤ 2200V		≤ 7800V/us	

IEC



※ 모터 정격 전압 = 460V

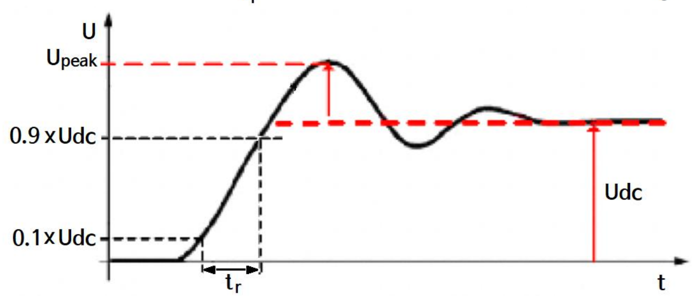
Vpeak = 1200V_{peak} 일 때

$$\Delta V = 0.8 \times 1200 = 960V$$

$t_r = 0.25\mu s$일 때

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{960}{0.25} = 3840[V/\mu s]$$

NEMA



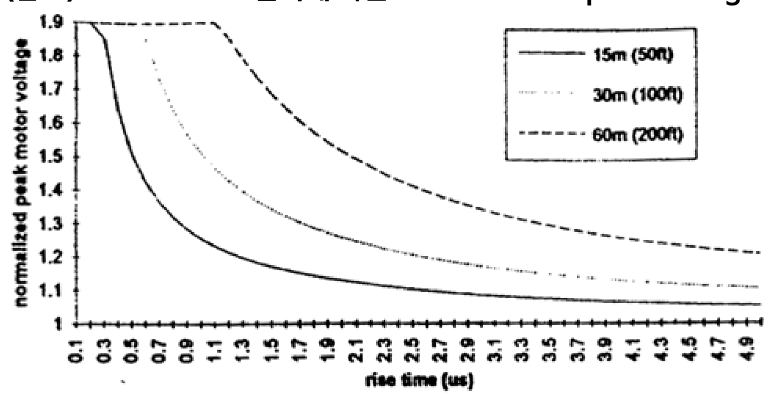
$$V_{dc} = \sqrt{2} \times 460 = 650V_{dc}$$

$$\Delta V = 0.8 \times 650 = 520V_{dc}$$

$t_r = 0.1\mu s$일 때

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{520}{0.1} = 5200[V/\mu s]$$

〈참조〉 Motor cable 길이에 따른 rise-time and peak voltage



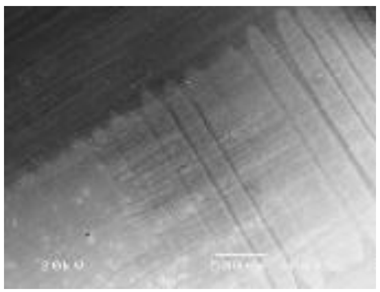
〈참조〉 WEG社 Motor cable 길이에 따른 출력 필터 적용 제안

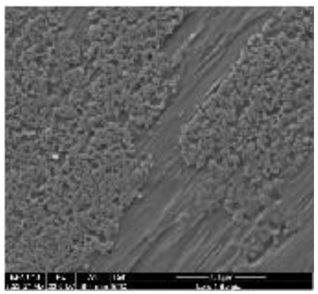
Cable length L	Output filters
L ≤ 100m	no needed
100m < L ≤ 300m	Output reactor needed (최소 2% voltage drop)
L > 300m	Special filters needed

Bearing electric stress

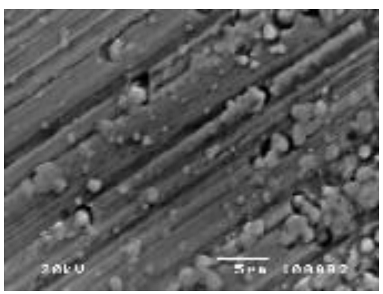
- 모터 회전 시 베어링 레이스와 베어링 볼 사이에 윤활유의 얇은 막(0.5um) 형성되어, 고정자로 부터 회전자를 절연시킨다.
- 방전 발생 시 베어링에 미세한 피트(EDM)가 발생
- AC 드라이브에 의한 EDM이 증가하는 주된 이유
  ① Capacitive coupling - 고정자 권선과 회전자 사이에 높은 dv/dt를 갖는 common-mode 전압의 capacitive couplin으로 인해 발생
  ② Inductive coupling - 고정자 순환 전류와 회전자 순환 전류 사이의 순환 전류의 자기 결합으로 인해 발생
- 모터 샤프트 전압 상승의 또 다른 요인 : 모터 비대칭 또는 비대칭 모터 케이블 사용. (특히 모터 전류가 100~200A를 초과하는 대용량)

Bearing 고장

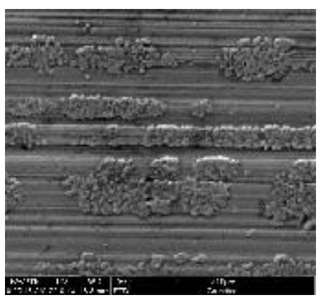




〈 Bearing의 전기적 stress 〉



〈 Bearing 고장 사진 〉



〈 Bearing의 기계적 stress 〉

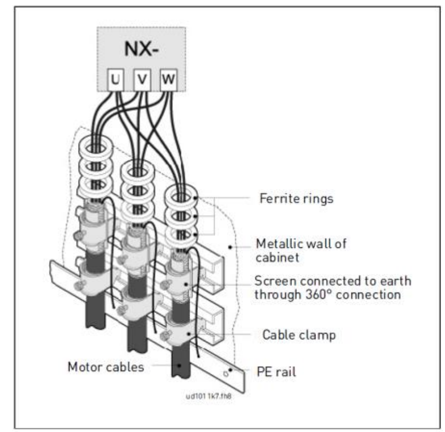
잘못된 축 방향 하중으로 인한 기계적 스트레스를 받아 평행 트렌치가 발생.
트렌치 근처 pitting은 기계적 스트레스로 인해 전기적 스트레스가 발생

기계적 완화 조치

- 모터와 부하의 올바른 정렬 확인
- 베어링의 기계적 하중(방사형 및 축 방향)이 사양 범위 이내인지 확인
- 진동 수준 확인
- 베어링의 그리스 점검 및 올바른 윤활 상태 확인

전기적 완화 조치

- 고조파 전류에 대한 저임피던스 리턴 경로 제공
- EMC 설치 규칙을 엄격하게 준수
  (드라이브와 모터 사이에 차폐 케이블을 사용,
  적절한 고주파 연결로 양쪽 끝에서 쉴드를 연결)
- 모터가 적절하게 접지되어 있고, 고주파 전류에 대해 접지 임피던스가 낮은지 확인
- 모터 섀시와 부하 사이에 양호한 고주파 접지 제공
- 샤프트 전압을 제거하기 위해 **샤프트 접지 브러시를 사용**
- 특히 모터 전류가 100~200A를 초과하는 대용량 어플리케이션에서는 대칭 모터 케이블 사용
- 드라이브와 모터 사이의 고주파 전류를 줄이기 위해 **common-mode 필터를 사용**



〈 Common-mode 필터 설치 〉

6.5 EMC Standards

EMC emission standards for drives

Environment	EN/IEC 61800-3	EN 55011	EN 61000
	Product standard	Environmental standard	Generic standard
1. Environment Residential, Commercial and light industrial	Cat. C1	Class B	EN 61000-6-3
	or Cat. C2 (restricted use)	-	-
2. Environment Industrial	Cat. C2	Class A, group 1	EN 61000-6-4
	Cat. C3	- (<20 kVA)	-
	Cat. C3 (I > 100 A)	Class A, group 1, 20~75 kVA high power electronic equipment	-
	Cat. C3 (I > 100 A)	Class A, group 2, >75 kVA high power electronic equipment	-
	Cat. C4 No emission limits (prepare EMC plan)	-	-

EMC Standards		Conducted emission		
Standards and requirements	EN 55011 (시설 운영자 준수)	Class B Housing and light industries	Class A Group 1 Industrial environment	Class A Group 2 Industrial environment
	EN/IEC 61800-3 (컨버터 제조업체 준수)	Category C1 First environment, home and office	Category C2 First environment, home and office	Category C3 Second environment

PosDrive EMC	병원	주거 지역	상업	경공업	중공업	해양
C (Cat. C1)	O					
H (Cat. C2)	R	R	R	O	O	
L (Cat. C3)				R	R	
T (Cat. C4)					R (IT)	R (IT)

O : Option, R : Requirement

7.1 접지 유형

전원공급 설비 – 접지 연결

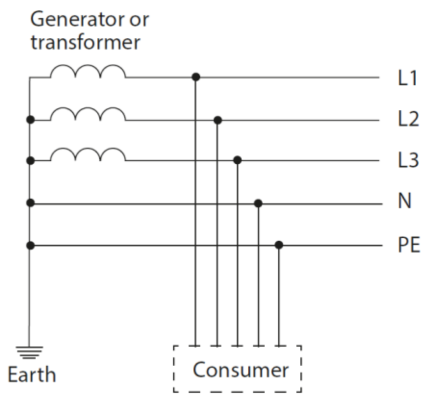
T	Terra (lat.)	direct connection to ground
I	Isolated	no ground connection/floating

T N
T T
I T

공급된 장비 – 접지/전원망 연결

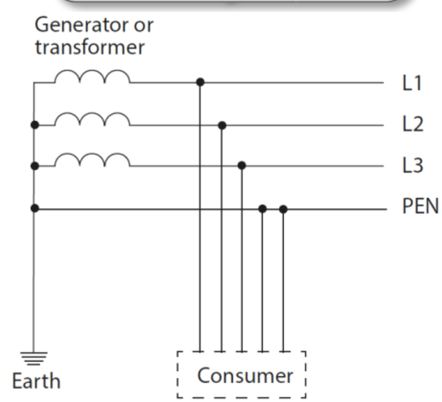
T	Terra (lat.)	direct connection to ground
N	Neutral	direct connection to the neutral/PE

TN-S system



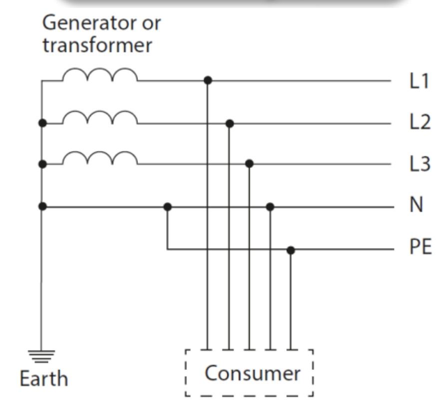
- **N접지와 PE접지 분리**
- EMC 성능 가장 우수
- **AC 드라이브 어플리케이션에서 선호**
- N 접지를 통하는 전류가 PE접지의 전위에 아무런 영향을 미치지 않는다.
- 접지 고장 감지용 RCD(잔류 전류 장치) 불필요

TN-C system



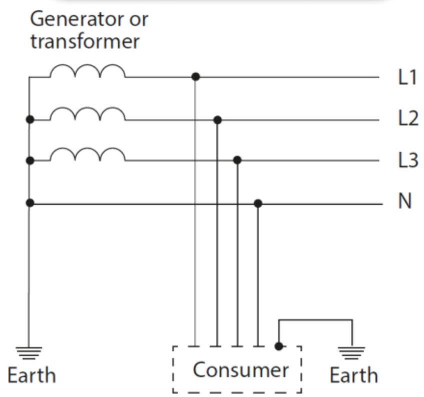
- **N접지와 PE접지를 결합한 하나의 PEN접지**
- EMC 관점에서 최적상태가 아님
- Ground와 장비 샤시 사이에 전위차 발생
- AC 드라이브 등 비선형의 전자 부하가 있을 경우, 발생하는 고주파 전류가 오작동 유발 가능

TN-C-S system



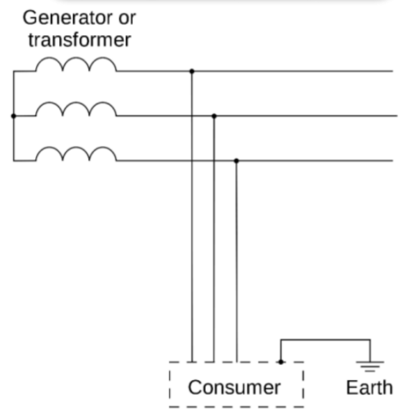
- **TN-S와 TN-C 하이브리드형**
- 변압기에서 건물의 분배 지점까지 하나의 접지 (PEN접지)
- 건물 분재 지점에서 PE접지와 N접지 분리
- 변압기-건물 분배지점의 PEN접지 도체는 일반적으로 임피던스가 낮기 때문에 TN-C의 부정적 영향 감소

TT system



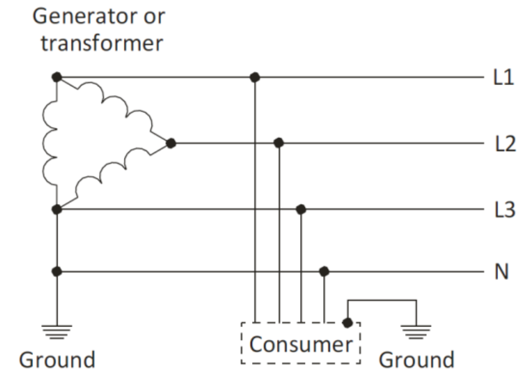
- **N접지와 별도의 로컬 PE접지**
- 전기장치의 **PE접지 고주파 전류가 N접지의 저주파 전류와 분리**
- 통신 및 특수 어플리케이션에서 선호
- 변압기 접지와 전기장치 접지 사이의 임피던스를 알 수 없기 때문에, 전기장치의 PE 단락시 감전 보호 보장할 수 없다. 이는 RCD를 사용하여 완화 가능

IT system



- **주전원 floating 접지와 별도의 로컬 접지**
- **선박 및 병원과 같은 특수환경과 Industry에서 사용**
- EMC 관점에서 최적상태가 아님
- 각 상과 접지간 절연 모니터링 장치 사용
- EMC 성능이 낮다.
- 접지 노이즈 전류 발생시 전자장비 오동작 유발
- 네트워크의 접지 고장 모니터링 시스템 오동작 방지를 위해 모든 커패시터를 접지측에서 분리 필요 (예: RFI필터의 Common-mode 커패시터)
- 주 전원측에 많은 고주파 노이즈 생성 가능

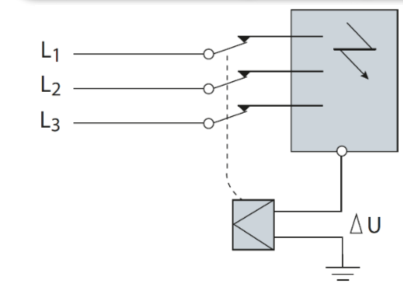
Corner-grounded network



- **Δ변압기 한쪽 코너 접지와 별도의 로컬 접지**
- 현재는 거의 사용되지 않는다.
  (이유는 송전시스템의 Δ-Y 변압기 사용)
- 코너 접지 네트워크의 전압 레벨이 다르기 때문에 **드라이브가 사용 가능한지 항상 확인 필요**

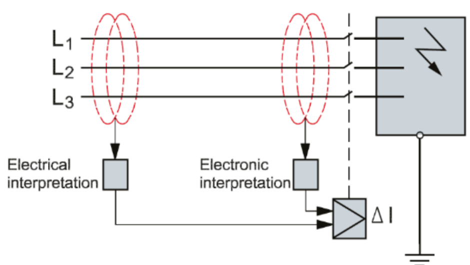
7.2 Ground Fault Protection

Fault Voltage Relay



- **AC 드라이브 접지와 시스템 접지 사이에 설치**
- 접지가 허용되지 않는 상황에 유리

Residual Current Relay

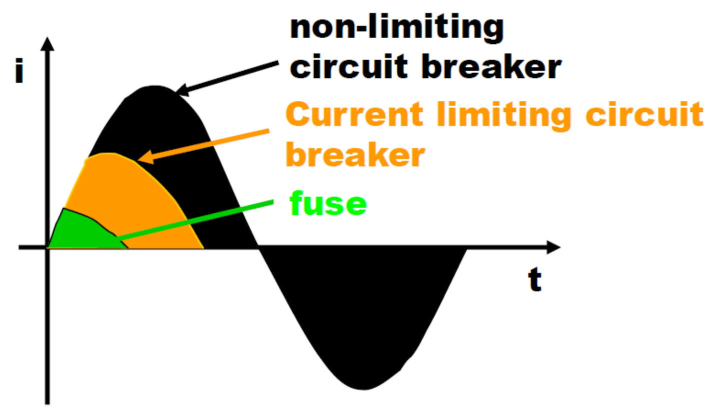


- **영상전류 감지 차단**
- AC 및 DC 전류를 감지할 수 있는 Type B RCD 사용 권장

7.3 Fuse & Circuit Breaker

- **FUSE**
  - 장비의 추가 손상을 방지하기 위해 과전류 차단
  - 특징 : 정격전류(연속전류)와 속도(과전류에서 끊어지는데 걸리는 시간)
  - aR 퓨즈 : 반도체 보호, 단락 또는 내부 부품 고장시 손상방지
    gG퓨즈 : 범용 퓨즈
- **Circuit Breaker**
  - 차단 속도가 퓨즈보다 늦다.
  - **ACB**(Air circuit breaker)
    ① 고전압 및 고전류(최대 6kA) 차단
    ② 일반적으로 주 차단기로 사용
    ③ 차단 속도가 늦으므로, AC 드라이브 보호를 위해 초고속 퓨즈 함께 사용
  - **MCCB**(Molded-case circuit breaker)
    ① 낮은 전압과 전류(최대 1kA) 차단
    ② AC 드라이브의 Main 스위치, 과부하 및 단락 보호
    ③ 차단 속도가 빠르므로, 소용량의 경우 초고속 퓨즈가 필요하지 않을 수 있다.
  - **MCB**(Miniature circuit breaker)
    ① 저전력 전기회로(최대 100A, 6kA) 차단
    ② 과부하 및 단락보호, 저전력 주회로 및 보조회로(제어회로)

	FUSE	Circuit Breaker
Maintenance	Fuse can only be used 1 time, it is a non-resuable device	Circuit Breaker can offer total no of operations as declared by manufacturer
Trip Time	2~5ms, quickest operating device	Vary as per the device ex) ACB : it can be 30ms MCCB : it can be less than 10ms
Utilization Category	If first letter is 'b' means both protection (O/L + S/C). If first letter is 'a' only S/C will be there	If category A it means no Icw shall be there, If category B, Icw shall be there
Method of tripping	'SOLDER' for Overload 'ELEMENT' for Short Circuit	Available as 'Microprocessor' type & 'Thermal Magnetic' type



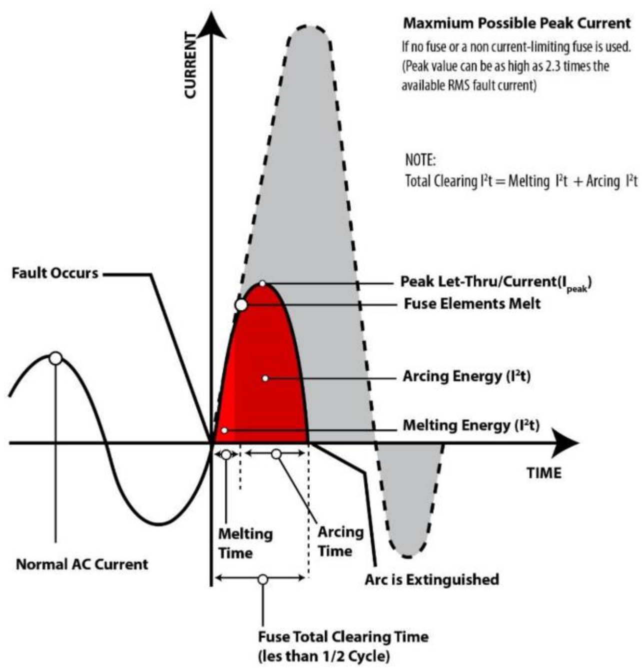
Identification of Fuse type

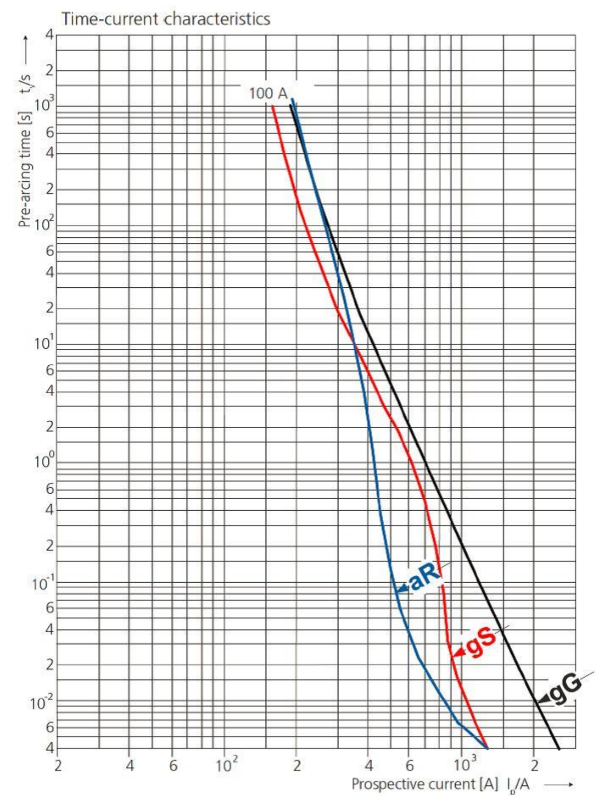
FIRST LETTER

g	Full Range Protection
a	Partial Range Protection

SECOND LETTER

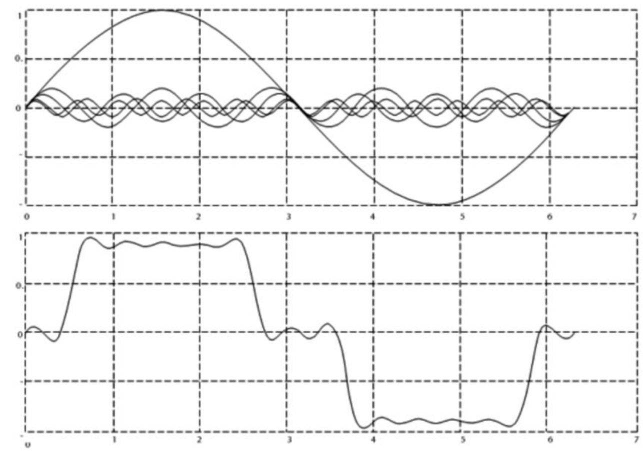
M	Protection of electrical motors Capable of withstanding motor starts
L	General Application, Normal Blow Protection of wiring
G	General Application, Normal Blow
B	General Application, Normal Blow Robust design for mining application
Tr	Transformer Protection
R	Very Fast Acting. Semiconductor Protection Fuse





- 비선형 부하(다이오드 정류기 등)는 비정현파 전류를 생성한다. 정현파가 아닌 파형은 기본 주파수의 정수배의 주파수를 가진 정현파 파형의 합으로 분해될 수 있다. 기본 주파수(ω_1)의 정수배를 고조파(harmonics)라고 한다.
- 전력전자 장치는 홀수 고조파만 생성한다.
- 3상 시스템에서 고조파(h)=k * p ± 1 고조파가 생성된다.
  (p = 정류기 pulse 수, k=1,2,3,…) 예) : 6펄스 정류기의 경우, h=5,7,11,13,…
- Total Harmonic Distortion(THD)는 기본 주파수 RMS값에 대한 고조파 성분 RMS 비율의 총 합

$$f(t) = \sum_{h=1}^{\infty} Ah \sin h\omega t \qquad I_{RMS} = \sqrt{\sum_{h_1}^{h_{max}} I_{(h)}^2} \qquad THD = \sqrt{\sum_{h_2}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \times 100\%$$



〈 Non-linear load : 6-pulse 정류기 부하에서 3상 전원 전류파형 〉

배전 시스템에서 고조파 영향

- 고조파 전류는 배전 시스템 임피던스의 전압 강하로 인해 전압 왜곡을 유발
- 임피던스가 높을 수록 전압 왜곡 수준이 높아진다.
- 고조파의 부정적 영향
  - 고조파 전류는 시스템 손실에 영향(케이블, 변압기)
  - 고조파에 의한 전압 왜곡은 다른 부하의 장애 유발 및 손실 증가 영향

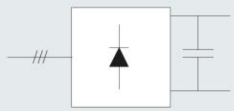
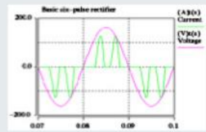
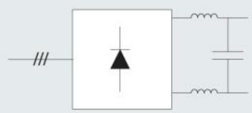
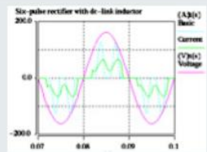
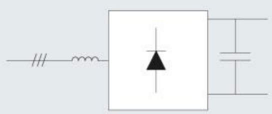
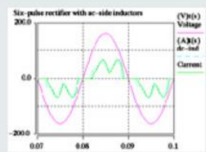
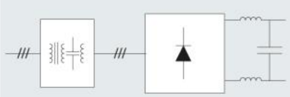
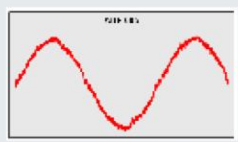
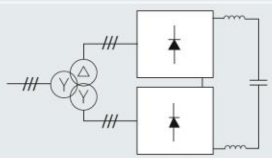
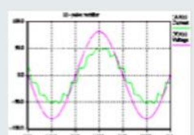
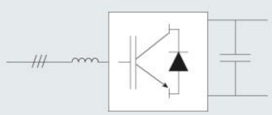
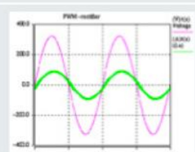
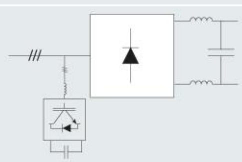
고조파가 모터에 미치는 영향

- 비선형 부하인 경우 고조파 영향 발생하지만, DOL 모터는 영향이 없다.
- 고조파 영향
  - 고조파 주파수에 의한 코어 및 권선의 열 손실 발생
  - 높은 가청 소음 발생
  - 회전자의 고조파 전류 발생
    ① 회전자의 고조파 전류는 고정자 권선의 고조파로 인해 발생
    ② 고정자의 5차 및 7차 고조파는 로터에 6차 고조파 생성
    고정자의 11차 및 13차 고조파는 로터에 12차 고조파 생성
  - 회전자 고조파 전류는 회전자 가열 및 맥동 증가, 토크 감소 유발

Harmonic Limitation Standards and Requirements

Standard	Description
IEC/EN 61000-3-2	Limits for harmonic current emissions (≤ 16 A per phase)
IEC/EN 61000-3-12	Limits for harmonic currents 〉16 A and ≤ 75 A)
IEC/EN 61000-3-4	Limitation of emission of harmonic currents 〈〉 16 A)
IEC/EN 61000-2-2 IEC/EN 61000-2-4	Compatibility levels for low frequency conducted disturbances
IEEE 519	IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems
G5/4	Engineering recommendation, planning levels for harmonic voltage distortion and the connection of nonlinear equipment to transmission systems and distribution networks in the United Kingdom

Harmonic Reduction Methods in AC Drives

Mitigation method	Circuit diagram	Typical current waveform
No mitigation THD > 80%		
DC inductors THD < 40%		
AC inductors THD < 40%		
Passive harmonic filter THD < 10%		
Multi-pulse rectifier (12/18) THD < 10%		
Active front end THD < 5%		
Active filter THD < 5%		Waveform similar to AFE

- **DC Inductor**
  - 정류기와 DC 커패시터 사이, + 또는 - 단에 단일 또는 양단 사용
  - THDi를 35~40%로 줄인다.
- **AC Inductor**
  - 정류기 입력 측에 사용
  - 고조파 성능은 DC 인덕터와 유사, THDi를 35~40%로 줄인다.
- **DC vs. AC Inductor**
  - DC Inductor : 저주파(5차, 7차, 11차 고조파) 감쇠 효과적
    정류기 전류 Ripple 성분에 대해서만 전압강하 발생
  - AC Inductor : 높은 차수 고조파 감쇠 효과적
    전압 강하 발생(약 4%), 입력 전원 투입시 돌입전류 방지 효과
- **Passive Harmonic Filter**
  - 특정 고조파(5차, 7차 등)를 대상으로 설계, L과 C조합(경우에 따라 댐핑 R추가)
  - AC 드라이브의 DC-link 구성(DC Inductor 유/무, 정전용량 값)에 따라 달라진다.
  - 설계시 공진방지 고려 필수, Size 大.
- **Multi-pulse Rectifiers**
  - 이상 변압기(Phase Shift Transformer) 사용,
  - 일반적으로 12펄스(2x3상) 또는 18펄스(3x3상) 사용
  - 변압기 위상 차에 의해 고조파 상쇄(12펄스의 경우 5차, 7차)
- **Active Front End (AFE)**
  - 입력 전류는 거의 정현파, 고조파 존재하지 않는다.
  - 스위칭 노이즈 줄이기 위해 LCL 저역통과 필터 사용
- **Active Filter (AF)**
  - 그리드에 발생하는 고조파에 대해 역상 고조파 전류를 생성하여 고조파 상쇄

※ Danfoss사 제공 고조파 분석 Tool
- 오프라인 Tool : VLT® Motion Control Tool MCT 31
  온라인 Tool : HCS (Harmonic Calculation Software)

AC Drive 설계시 고려사항

① AC Drive를 선택하기 전에 사용할 **모터를 결정**해야 한다.

② 모터 및 부하 사양 등을 기준으로 **AC 드라이브를 설계**한다.

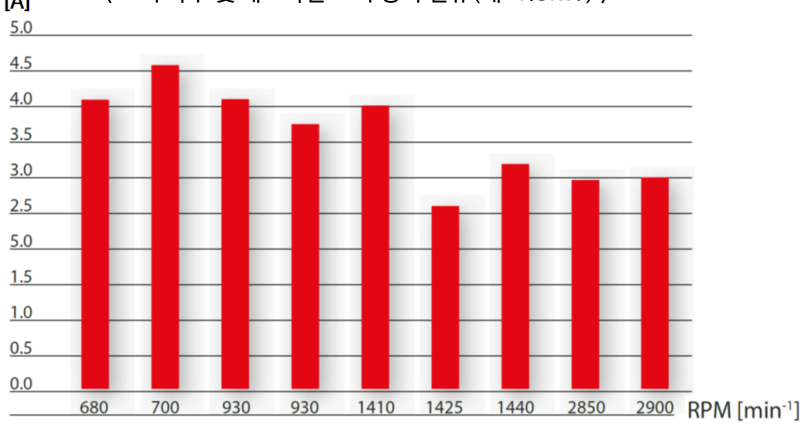
③ AC Drive 설계 시 고려해야할 기본 Parameter

- 모터 사양에 따른 AC Drive 정격
- 모터 역률 고려
- 과부하 용량
- 제어 범위 및 약계자
- AC Drive 출력 감소율
- 회생 에너지
- 모터 케이블 길이
- 사용 환경 조건(온도, 고도 등)
- 설치 방법 (Central vs. de-centralized)

※ AC Drive 선정

- **모터 정격전류 및 Overload를 고려하여, Drive의 정격 전류 및 Overload 전류가 만족하도록 선정**

〈 모터 극수 및 제조사별 모터 정격 전류(예: 1.5kW) 〉



Overload capacity

■ **Typical overloads in constant torque applications**

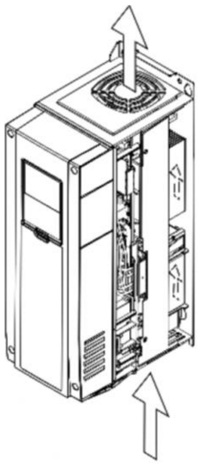
Application	Excess load
Lifting equipment	160%
Conveyor belt	160%
Stirrer / Mixer / centrifuge	160%
Rotary piston compressor / piston compressor	150%
Spiral pump (thick sludge)	150%
Sludge dehydration press	150%
Piston pump	150%
Rotary gate valve	150%
Rotary piston blower	110%
Surface aerator	110%
Metering pump	110%
Booster pumps(2-stage)	110%
Recirculation pump	110%
Side channel blower for pool aeration	110%

■ **Typical overloads in variable torque applications**

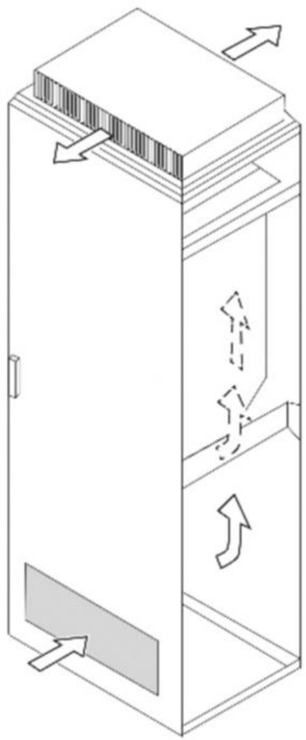
Application	Excess load
Fan	110%
Well pump	110%
Booster pump / centrifugal pump	110%
Filter infeed pump	110%
Groundwater pump	110%
Hot water pump	110%
Non-clogging pump (solid materials)	110%
Centrifugal pump / fan	110%
Primary and secondary heating pump	110%
Primary and secondary cooling water pump	110%
Rainwater basin evacuation pump	110%
Recycling sludge pump	110%
Spiral pump (thin sludge)	110%
Submerged motor pump	110%
Excess sludge pump	110%

Drive & Drive Panel 냉각

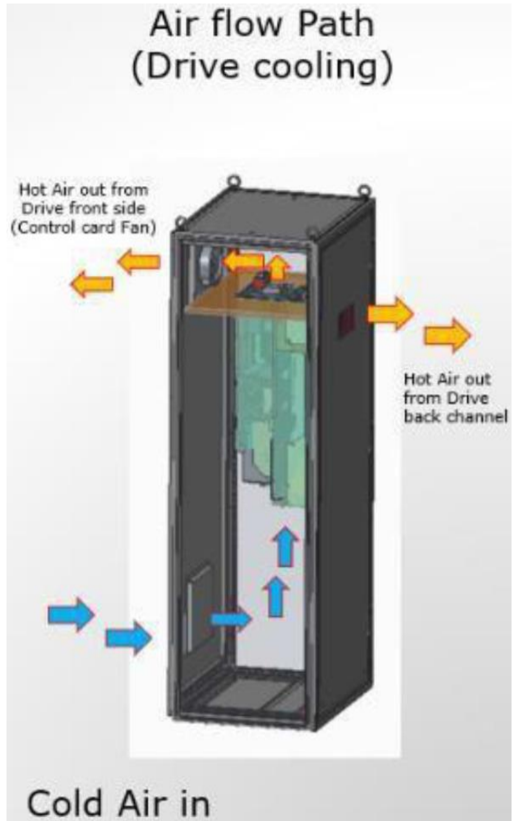
Drive Unit Air Flow



Drive Panel Air Flow



Panel 내부 격벽 설치
(뜨거운 공기의 판넬 내부 순환 방지)



Back-channel Cooling

※ 유입되는 냉각 공기와 배출되는 뜨거운 공기가 섞이지 않도록 설계되어야 한다.

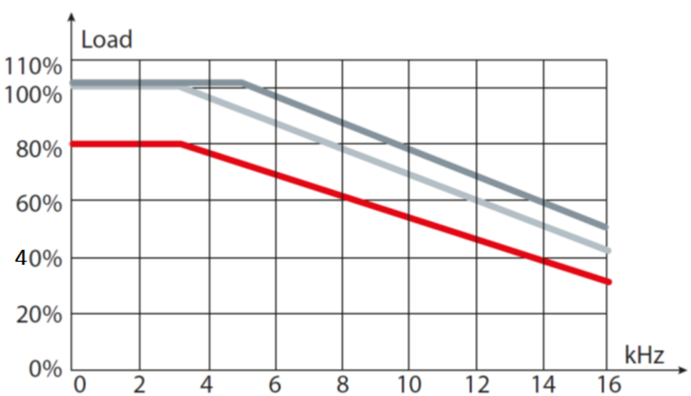
※ Panel 내부에 인덕터 또는 출력 필터 설치시
- 냉각을 위해 Panel 하부에 설치
- 필요시 추가 냉각을 위해 별도 팬 설치

Derating of an AC Drive

- Drive의 스위칭 주파수가 높아지면
  - 모터 소음이 줄어든다.
  - 인버터의 전력손실이 증가, 발열 증가
- Drive의 스위칭 주파수가 너무 낮으면
  - 모터가 덜 부드럽게 작동하는 경향이 있다.

※ 스위칭 주파수는 노이즈 생성, 원활한 작동, 손실을 고려하여 결정 하여야 한다.

- **주변 온도에 따른 Drive 정격전류 감쇠계수 : 1.5%/1˚C**
  - Dirve 작동 주위 온도 : -10˚C~40˚C, max. 50˚C
- **고도 1000m 이상의 경우 : 100m당 1.5% 용량 감소**



〈 Power reduction diagram for switching frequency 〉

Motor Cables

- 차폐 케이블 사용 목적 : Drive에 의한 EMC 문제발생 방지
- 케이블에 의한 문제 발생 원인 : 케이블 커패시턴스
- 케이블 커패시턴스 : 차폐 케이블 > 비차폐 케이블
- 케이블에 의한 EMC 요구사항 만족할 경우
  일반적으로 사용 가능한 최대 케이블 길이는
  차폐 케이블 - 50m/75m, 비차폐 케이블 - 150m/300m
- EMC 문제 등을 고려하여, 차폐 케이블 사용 권장
- 케이블 설치시 공심 리액터 형태의 케이블 배선에 의한 추가 커패시턴스 발생되지 않도록 주의
- 하나의 AC 드라이브에 모터 병렬 연결시, Star 형태로 케이블 연결할 경우 추가적인 커패시턴스로 인한 문제 발생 가능성 높아진다.

1. 인버터 용량 선정시 고려 사항

① 부하 특성
- 부하의 종류
  마찰부하, 유체부하, 관성부하, 전력의 전달 및 축적을 포함하는 부하
  정토오크, 정출력, 저감토오크
- 부하의 성질
  전동부하, 제동부하, Over Rolling 부하, 일정부하, 충격부하, 반복부하,
  고 시동 토오크, 저 시동 토오크

② 운전 방법
- 연속운전, 연속이나 저속의 장시간 운전, 단시간운전

③ 정격 출력
- 최고속도 출력, 정격 출력

④ 정격 회전수
- 최고 회전수, 정격 회전수

⑤ 속도 제어 범위

⑥ 제어 정밀도

⑦ 제어 방법
- 운전 Command 및 Reference(Keypad, I/O, Fieldbus)
- Dynamic Brake, 회생제동, 플러깅

⑧ 전원
- 전원 변압기 용량/사양, 전압, 상수, 주파수

① AC Drive를 선택하기 전에 사용할 **모터를 결정**해야 한다.

② 모터 및 부하 사양 등을 기준으로 **AC 드라이브를 설계**한다.

③ **AC Drive 설계 시 고려해야할 기본 Parameter**
- 모터 사양에 따른 AC Drive 정격
- 모터 역률 고려
- 과부하 용량
- 제어 범위 및 약계자
- AC Drive 출력 감소율
- 회생 에너지
- 모터 케이블 길이
- 사용 환경 조건(온도, 고도 등)
- 설치 방법 (Central vs. de-centralized)

※ AC Drive 선정
- **모터 정격전류 및 Overload를 고려하여, Drive의 정격 전류 및 Overload 전류가 만족하도록 선정**

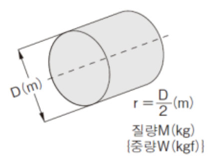
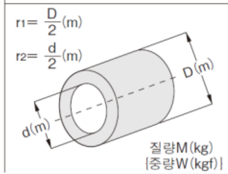
2. 관성 모멘트 산출법

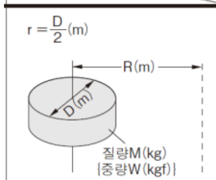
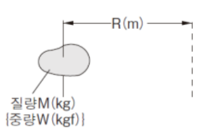
SI 단위계의 관성 모멘트 J (kg·m²)와 중력 단위계 GD2 (kgf·m²)의 환산법

$$J=\frac{GD^2}{4}$$

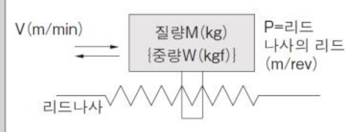
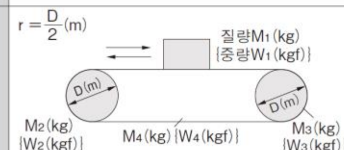
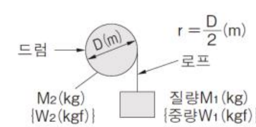
G : 중량 (kgf)
D : 회전 직경 (m)
J : 관성 모멘트 (kg·m²)

■회전체의 관성 모멘트 J {GD²}

회전중심이 중심(重心)과 일치하는 경우		
	S I 단위	중력 단위
	$J=\frac{1}{2}Mr^2$ (kg·m²)	$GD^2=\frac{1}{2}WD^2$ (kg·m²)
	$J=\frac{1}{2}M(r_1^2+r_2^2)$ (kg·m²)	$GD^2=\frac{1}{2}W(D^2+d^2)$ (kg·m²)

회전중심이 중심(重心)과 일치하지 않는 경우		
	S I 단위	중력 단위
	$J=\frac{1}{2}Mr^2+MR^2$ (kg·m²)	$GD^2=\frac{1}{2}WD^2+4WR^2$ (kg·m²)
	(크기를 무시할 수 있는 경우) $J=MR^2$ (kg·m²)	(크기를 무시할 수 있는 경우) $GD^2=4WR^2$ (kg·m²)

■직선운동을 하는 경우의 관성 모멘트 J {GD²}

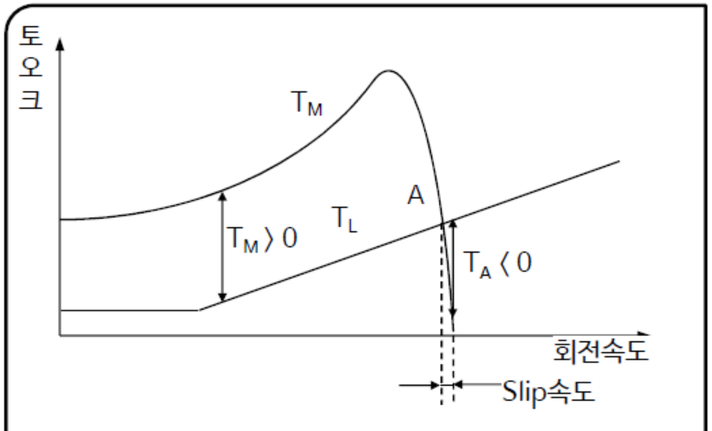
		S I 단위	중력 단위
일반적인 경우		$J=\frac{1}{4}M\cdot\left(\frac{V}{\pi\cdot n}\right)^2$ (kg·m²)	$GD^2=W\cdot\left(\frac{V}{\pi\cdot n}\right)^2$ {kgf·m²}
수평 직선운동의 경우 (리드나사에 의해 물체를 움직이는 경우)		$J=\frac{1}{4}M\cdot\left(\frac{P}{\pi}\right)^2$ $=\frac{1}{4}M\cdot\left(\frac{V}{\pi\cdot n}\right)^2$ (kg·m²)	$GD^2=W\cdot\left(\frac{P}{\pi}\right)^2$ $=W\cdot\left(\frac{V}{\pi\cdot n}\right)^2$ {kgf·m²}
수평 직선운동의 경우 (컨베이어 등)		$J=M_1r^2+\frac{1}{2}M_2r^2$ $+\frac{1}{2}M_3r^2+M_4r^2$ (kg·m²)	$GD^2=W_1D^2+\frac{1}{2}W_2D^2$ $+\frac{1}{2}W_3D^2+W_4D^2$ {kgf·m²}
수직 직선운동의 경우 (크레인·윈치 등)		$J=M_1r^2+\frac{1}{2}M_2r^2$ (kg·m²)	$GD^2=W_1D^2+\frac{1}{2}W_2D^2$ {kgf·m²}

3. 가속 토오크

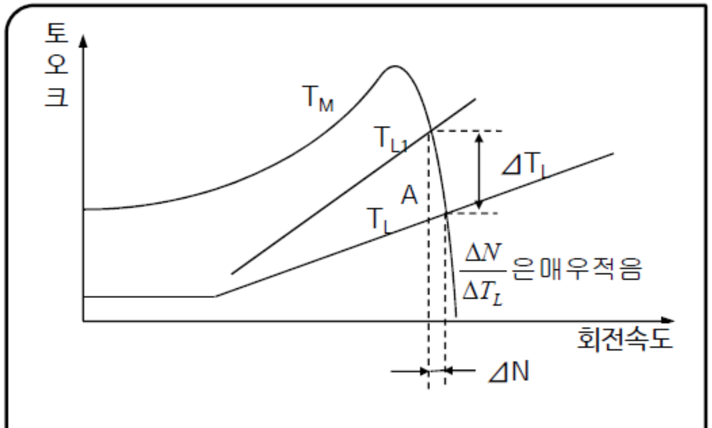
$$T_A = \frac{GD^2}{4g} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dN}{dt} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dN}{dt} \ (kg \cdot m)$$

- T_A = 0 인 경우 : 속도 N은 일정하게 유지
- T_A 〉0 인 경우 : 속도 N은 상승
- T_A 〈 0 인 경우 : 속도 N은 하강

T_A : 가속 토오크 = $T_M - T_L$ (kg·m)
T_M : 모터 발생 토오크 (kg·m)
T_L : 부하 토오크 (kg·m)
GD^2 : 물체의 관성을 수직화 한 것으로 무게와 지름의 제곱에 비례 (kgf·m^2)
N : 회전속도 (rpm)
t : 가속시간 (s)
g : 중력가속도 (9.8m/s)



Motor Torque와 부하 Torque



부하 Torque 변동에 대한 회전속도 변동

4. 가감속 시간

모터 속도가 N_a 에서 N_b에 도달할 때 까지 소요되는 시간

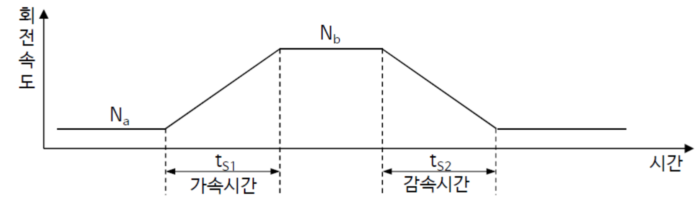
$$t = \frac{GD^2}{375}\int_{N_a}^{N_b}\frac{dN}{T_A}\ (s)$$

[정토오크 부하인 경우 가감속 시간 설정]

$$t_{S1} = \frac{GD^2(N_b - N_a)}{375(T_M \cdot \alpha - T_{Lmax})}\ (s) \qquad t_{S2} = \frac{GD^2(N_b - N_a)}{375(T_M \cdot \beta - T_{Lmin})}\ (s) \qquad T_M = \frac{974P_0}{N_0}\ (kgf \cdot m)$$

P_0 : 모터 정격 출력 [kW]
N_0 : 모터 정격 회전수 [rpm]
T_M : 모터 정격 토오크 [kgf·m]
GD^2 : 모터 관성 GD^2_M + 부하관성 DG^2_L [kgf·m²]
N_a : 가속전 또는 감속후의 회전속도 [rpm]
N_b : 가속후 또는 감속전의 회전속도 [rpm]

t_{S1} : 가속시간 [s]
t_{S2} : 감속시간 [s]
T_{Lmax} : 속도제어 범위내에서의 최대 부하 토오크 [kgf·m]
T_{Lmin} : 속도제어 범위내에서의 최대 부하 토오크 [kgf·m]
α : 평균 가속 토오크율, 가속 토오크 계수 (0.8~1.2)
β : 평균 감속 토오크율, 회생 제동 계수 (0.2)



- 가속 토오크 계수 α 는 인버터로 구동되는 모터에 발생되는 최대 토오크의 평균치와 정격 토오크에 대한 비율을 말한다.
- 회생 제동 계수 β는 인버터와 모터를 조합한 경우 발생하는 제동 토오크의 평균치와 정격 토오크에 대한 비율을 말한다.
- 안전한 영역 계산을 위하여 T_{Lmax}는 크게, T_{Lmin}는 작게 평가 해두는 것이 좋다

[2승 저감 토오크 부하인 경우 가감속 시간 설정]

$$t_A \geq \frac{GD^2 \times N_{max}}{375 \times T_{AAmin}}\ (s) \qquad t_D \geq \frac{GD^2 \times N_{max}}{375 \times T_{ADmin}}\ (s)$$

t_A : 가속시간 [s]
t_B : 감속시간 [s]
N_{max}: 모터 최고 회전수 [rpm]
T_{AAmin} : 모터 최저 가속 토오크 [kgf·m]
T_{ADmin} : 모터 최저 감속 토오크 [kgf·m]

※ 모터의 가감속 시간은 모터의 발생 토오크와 부하 토오크, 그리고 부하의 관성 모멘트(GD²)에 따라 결정 된다.
가감속중 전류제한 기능이나 스톨방지 기능이 동작하는 경우에는 시간이 증가할 수 있으므로 가감속 시간을 길게 설정한다.
가감속 시간을 짧게 하고 싶을 때는 외부에 정격의 제동저항(DB저항)을 달거나 토오크 부스트 값을 크게 설정하든지, (너무 크게하면 시동시에 과여자전류로 인해 과전류 트립이 발생할 수 있음) 인버터의 용량을 크게 선정하면 가능하다. 이 경우에도 사전 면밀한 설계검토가 필요하다.

5. 인버터 용량

일반적으로 인버터 용량을 선정할 때는 모터 정격 전류 및 과부하 내량, 인버터 출력 전류를 고려하여 선정한다.

[표준전류] $I[A] = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times V_{LL}}$

V_{LL}: line-line Voltage

[인버터 표준 용량] $P_{inv}[kVA] = \frac{k \times P_m[kW]}{\eta \cdot cos\varphi} \times \frac{O.L}{1.5} \times k_p$

k : 파형률에 의한 보정계수 (1.05~1.1)
cos φ : 전동기 역률 (4극 기준 0.80)
η : 전동기 효율 (4극 기준 0.85)

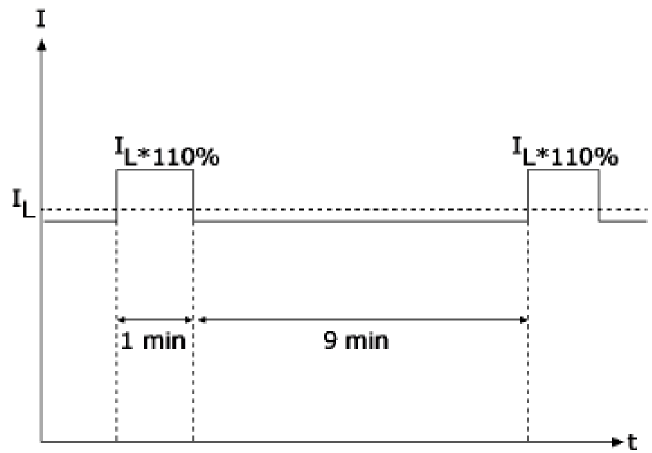
O.L : 전동기 과부하 내량
1.5 : 인버터 과부하 내량
k_p : 극수에 따른 정수

극수 / 부하종류	2&4 pole	6 pole	8 pole
정토오크 부하	1	1.3	1.6
2승 저감 부하	1	1.15	1.3

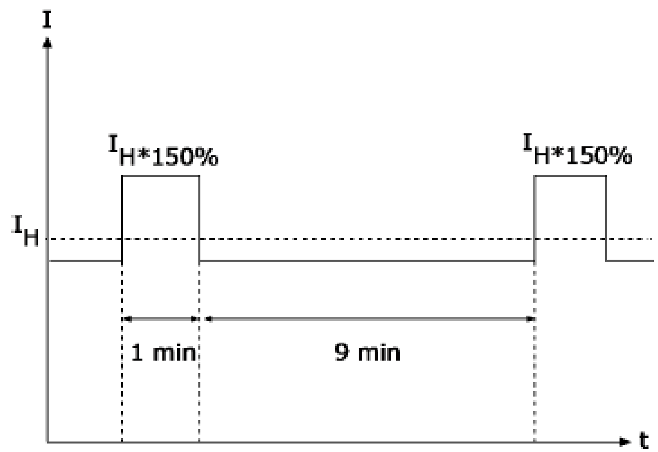
[과부하 내량 기준] 150%, 1분

[과부하 특성]

- **Low Overload (Normal Duty)**
  만약 연속 전류(I_L)의 110%에 해당하는 전류가 매 10분 간격으로 1분 동안 흐를 경우, 나머지 9분 동안 연속 전류(I_L)의 약 98% 이하의 전류가 흘러야 함을 의미.
  해당 Duty Cycle 동안의 출력 전류는 연속 전류(I_L)값 이상이 되어서는 안된다.
- **High Overload (Heavy Duty)**
  만약 연속 전류(I_H)의 150%에 해당하는 전류가 매 10분 간격으로 1분동안 흐를 경우, 나머지 9분 동안 연속 전류(I_H)의 약 92% 이하의 전류가 흘러야 함을 의미.
  해당 Duty Cycle 동안의 출력 전류는 연속 전류(I_H)값 이상이 되어서는 안된다.



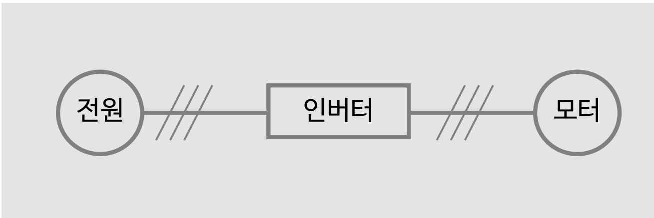
〈 Low Overload 〉

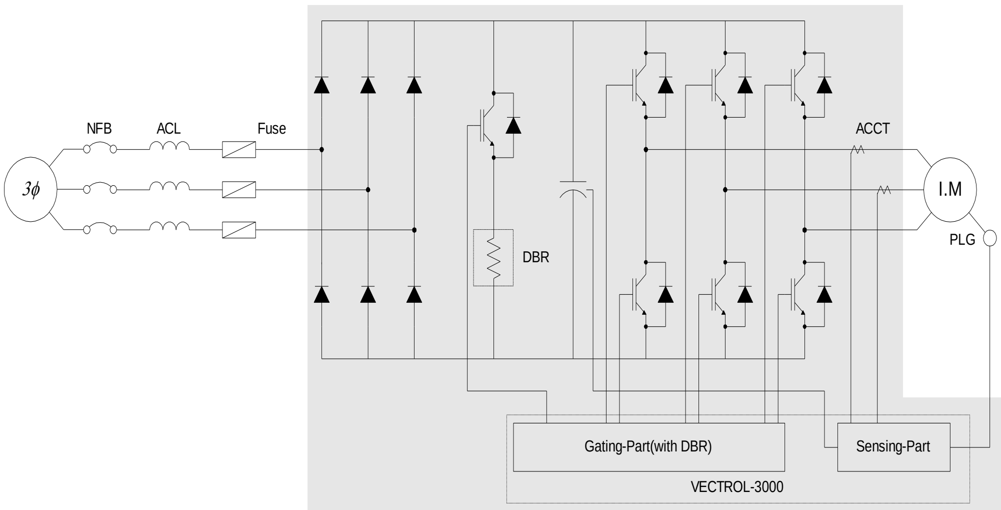


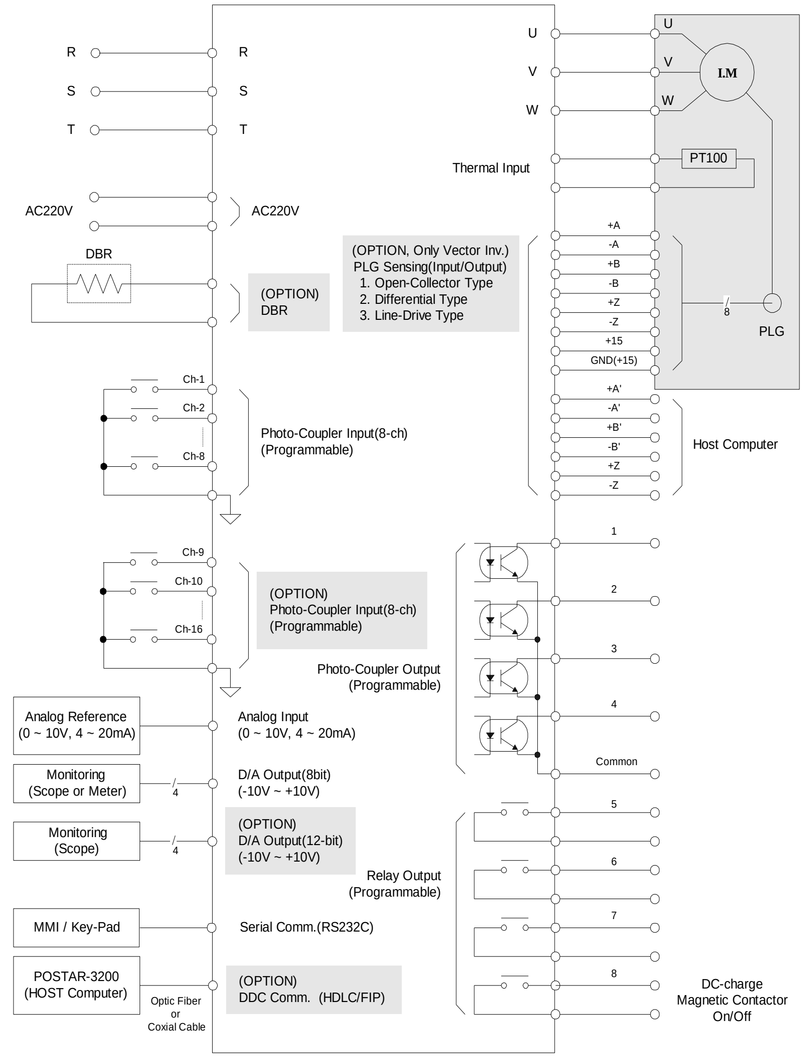
〈 High Overload 〉

6. Connection Diagram & Configurations

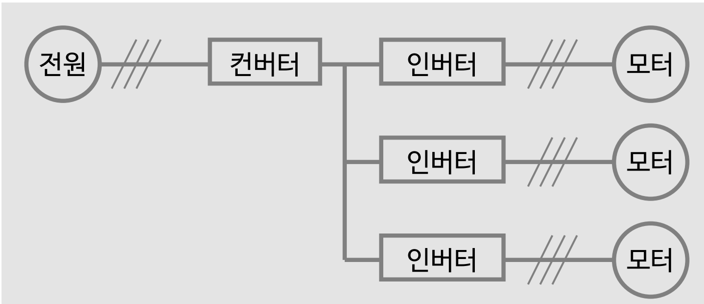
[Single Dirve]

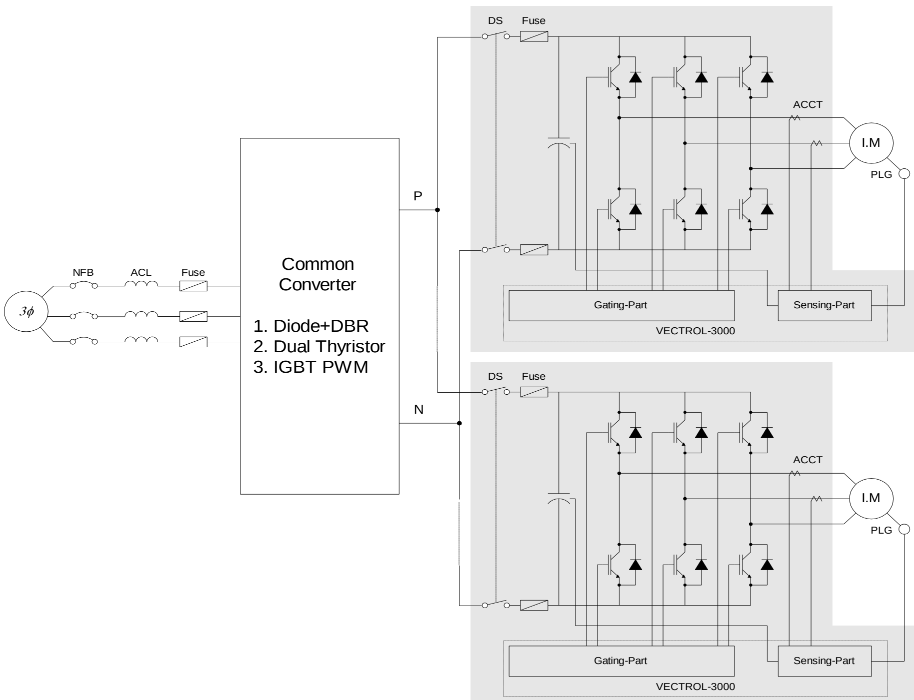


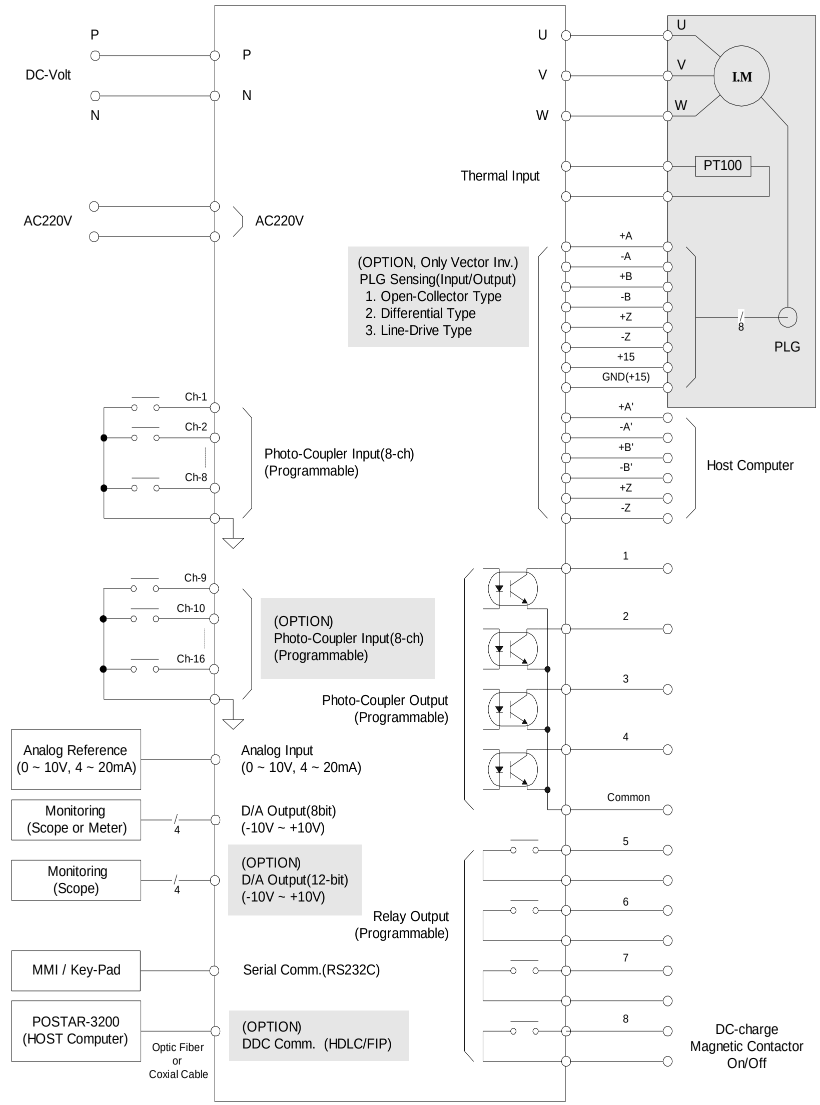




[Common DC bus Dirve]







7. 인버터 용량 선정

1) 연속 운전시의 선정

인버터의 정격 전류는 전동기의 정격 전류보다 크게 선정

- 단독 : $I_{INV} \geq I_M$ (I_{INV} : 인버터 정격전류, I_M : 전동기 정격전류)
- 그룹 : $I_C = k \times nT \times I_M \leq I_{INV}$ (I_C : 인버터 Total 출력 전류, k : 파형에 의한 보정계수(1.05~1.1), nT : 전동기 수, I_M : 전동기 정격전류)

2) 가감속시의 선정

인버터 운전시 최대 출력 토오크는 인버터의 최대 출력 전류로 결정. 따라서 가감속시 120%까지 전류를 허용하므로, 가감속시 전류가 인버터 정격 전류의 120% 이하로 선정

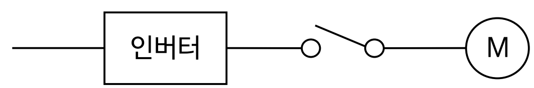
3) 고빈도 가감속 운전시의 선정

가속, 정속, 감속 등의 각 운전 모드의 전동기 전류를 확인하여 선정

$I_{INV} \geq \sqrt{\frac{I_1 t_1 + I_2 t_2 + I_3 t_3 + \cdots}{t_1 + t_2 + t_3 + \cdots}} \times k_1$ (I_{INV} : 인버터 정격전류, I : 각 모드의 전류, t : 각 모드의 시간, k_1 : 안전계수(운전이 급할 경우 1.2, 기타 1.1))

전류가 불규칙할 경우 : 운전중의 Motor 전류가 불규칙적으로 변화하여 시간과 전류를 구하지 못할 경우는 최대 토오크 출력을 내고 있을 때의 전류보다 인버터의 정격을 크게 선정

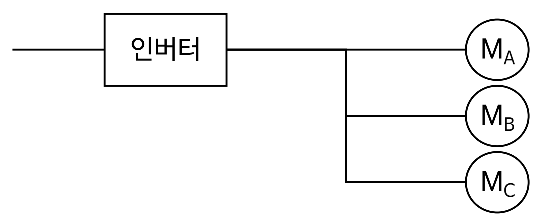
4) 인버터 운전 중 직입 시동시에 선정



- $I_{INV} \geq I_S / k$ (I_{INV} : 인버터 정격전류, I_S : 시동전류, k : 인버터 과전류 내량(1.2))
- 직입 시동시의 시동 전류는 일반적으로 정격 전류의 5~6배가 된다.

※ 인버터 운전 중 출력 MC 사용은 적합하지 않음.

5) 복수대의 Motor를 1대의 인버터로 운전 할 경우



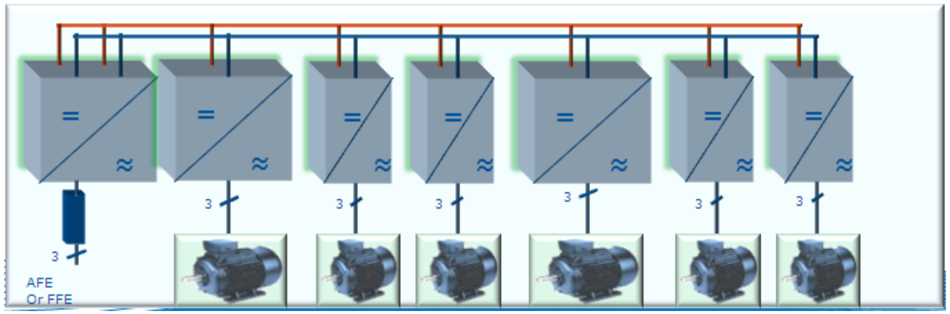
- $I_{INV} \geq (I_{MA} + I_{MB} + I_{MC}) \times 1.2{\sim}1.3$ (I_{INV} : 인버터 정격전류, I_{MA},I_{MB},I_{MC} : 각 모터의 정격전류)
- 소형 모터를 다수로 사용할 경우 모터의 효율이 나빠지기 때문에 전류가 증가한다.
- 가감속 시간은 여러대 중 가장 늦은 모터에 맞춘다.

8. 컨버터 용량 선정

일반적으로 컨버터는 Common DC bus Drive에서 3상 AC 입력 전압을 Common DC전압으로 변환하기 위해 사용

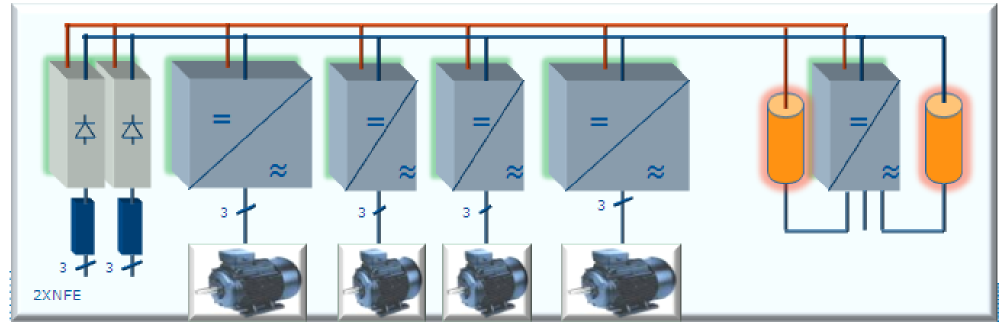
[AFE를 사용한 Common DC bus Dirve]

- 제동력이 자주 필요한 곳에 사용



[NFE를 사용한 Common DC bus Dirve]

- 제동력이 가끔 필요한 곳에 사용



※ Common DC bus Drive 적용 장점

- Common DC bus 구성으로, 드라이브의 역기전력에 의해 발생되는 회생에너지를 다른 모터 드라이브에 직접적으로 전달
- Common DC bus Drive 시스템은 다양한 프론트 엔드 모듈을 가지고 다양한 전기적 네트워크 및 드라이브가 사용되는 프로세스 라인 요구사항에 대응
- 최적화된 드라이브 시스템 구성은 투자비를 최소화 과도한 제동 에너지를 네트워크로 회생시켜 소비 에너지 비용을 절감할 수 있다.
- 최적화된 모듈 디자인은 추가적인 엔지니어링 절감 및 캐비닛 공간 절약을 통해 전반적으로 금액을 줄일 수 있다.

[Front End 비교]

	Front End	
	AFE(Active Front End)	**NFE**(Non-regenerative Front End)
기술	IGBT	Thyristor
타입	회생형	비 회생형
스위칭 주파수	3.6kHz	Line 주파수
DC 전압	1.35 x 1.1 x Us	1.35 x Us
THDi	〈 5%	6pulse: 〈30%, 12pulse: 〈12%
Filter 타입	LCL	L
Pre-charging	외장형	내부포함
병렬 구성 여부	가능	가능

1) 컨버터 용량 선정 및 계산 (단독구성)

- 컨버터 모듈 선정은 시스템의 효율과 모터 출력을 기반으로 한다.
- 모터, 출력필터와 인버터 효율 값 등이 제품 선정을 위해 필요하다.
- 필요한 DC 출력은 다음의 수식에 의해 계산할 수 있다.

$$P_{DC} = P_{shaft} \times \frac{1}{\eta_{motor}} \times \frac{1}{\eta_{filter}} \times \frac{1}{\eta_{INU}}$$

P_{DC} = 컨버터에서 필요한 DC 출력, P_{shaft} = 모터 출력, η_{motor} = 모터 효율
η_{filter} = 필터 효율 (불 필요시 =1), η_{INU} = 인버터 효율

2) 컨버터 용량 선정 및 계산 (병렬구성)

- 컨버터가 병렬 구성되어 있는 경우 컨버터 Stack간에 흐르는 전류 불평형 발생
- 병렬로 구성할 경우 각 컨버터 모듈별 용량 감소(Derating)량은 약 5%

$$P_{DC} = \sqrt{3} \times U_s \times I_n \times \cos\alpha \times \eta_{rect} \times 0.95$$

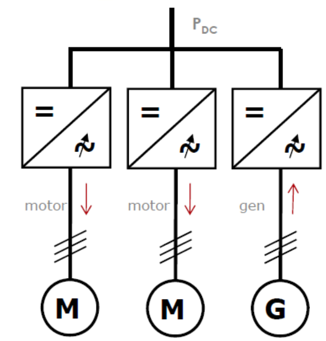
In = 컨버터 모듈별 출력 전류 [I], U_S = 입력 전압 [V]
cosα = 컨버터 역률, ηrect = 컨버터 효율

3) 컨버터 용량 선정 및 계산 (Motoring & Generating 인버터 포함시)

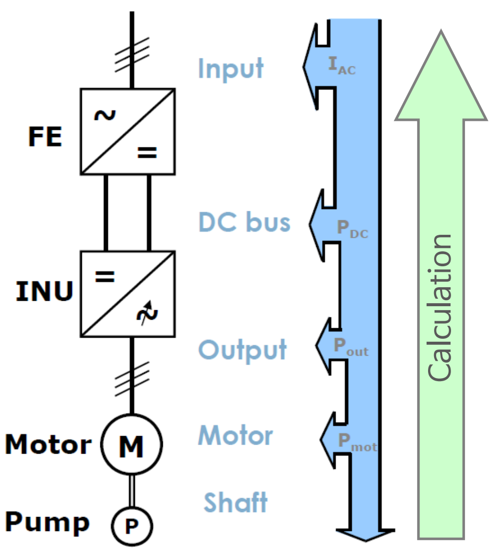
- 컨버터 구성시 Motoring 인버터와 Regenerating 인버터가 함께 포함되어 있을 경우

$$P_{DC} = \Sigma P_{motor} \times (1 / 0{,}9) - \Sigma P_{gen} \times 0{,}9$$

P_{DC} = 컨버터에서 필요한 DC 출력,
P_{motor} = Motoring Power, P_{gen} = Generating Power



4) 컨버터 용량 계산 순서



	(example)
⑤ 소요 AC 전류 계산 $I_{AC} = P_{DC} / (\sqrt{3} \times U_S \times \cos\alpha \times n_{rect})$ η_{rect} : 컨버터 효율, cosα : 컨버터 역률, U_S : 공급전압	⑤ I_{AC} = 394kW / (√3 x 400V x 0.99 x 98%) = 586A 컨버터 효율 : 98%, 컨버터(AFE) 역율 : 0.99 입력전압 : 400V
④ 소요 DC 출력 계산 ($P_{DC}=P_{out} / \eta_{inu}$) η_{inu} : 인버터 효율	④ P_{DC}=386kW / 98% = 394kW 인버터 효율 : 98%
③ 인버터 소요 출력 계산 ($P_{out}=P_{mot} / \eta_{filt}$) η_{filt} : 필터 효율	③ P_{out}=378kW / 98% = 386kW 출력필터 효율 : 98%
② 모터 소요 용량 계산 ($P_{mot}=P_{shaft} / \eta_{mot}$) η_{mot} : 모터 효율	② P_{mot}=355kW / 94% = 378kW 모터효율 : 94%
① 모터 소요 축 동력 결정 (P_{shaft})	① P_{shaft}=355kW

9. 인버터 주변기기 용량 선정

1) 변압기 용량 선정

- 인버터의 변압기 용량 선정은 인버터의 용량, 인버터 전원 투입시에 유입되는 돌입전류와 그에 따르는 변압기 2차측의 전압강하를 고려해야 한다.
- 일반적으로 변압기의 용량은 인버터 용량의 $\sqrt{2}$ 배 이상이 적당하다.
- 변압기 용량 = 인버터 출력 / (인버터 입력 역률 x 인버터 효율) [kVA]
  - · 인버터 출력 : 적용 모터의 용량 합계 [kW] · 인버터 역률 : 0.6~0.8(Reactor없을 경우), 0.8~0.85(Reactor 있을 경우) · 인버터 효율 : 0.95
- 변압기 용량이 충분하지 않으면, 전압 강하 정도가 커서 인버터의 부족 전압(정격 전압의 15% 이상 강하시) 보호 기능에 의해 인버터가 Trip된다.
  전원 투입시 전압 강하가 10% 이내가 되도록 설계해야 한다.
- 전압강하 $\triangle E = \%Z \times (n \times P_{inv}) / P_{transf}$ [%]
  - · P_{inv} : 인버터의 용량 합계 [kVA] · P_{transf} : 변압기의 용량 [kVA] · %Z : 변압기의 % 임피이던스 · n : 전원 투입시의 전류 배수(정격전류의 2～3배)

- 전원단 변압기 선정 가이드

· 변압기 정격 용량이 드라이브 시스템에서 도출한 rms 부하의 약 1.2배 이상 · 변압기 임피던스가 6% 이상
· 변압기 코어의 자속 밀도가 작을 것 (5…10%) · 고조파 전류로 인한 권선 (발열) 스트레스의 고려 · Line-line 및 line-접지간 절연이 보강된 변압기

2) 인버터 입력 차단기

- 인버터 보호를 기준으로 선정(과부하, 단락 사고시 배선 및 기기보호, 화재방지)
- 인버터 정격 전류의 약 110% 이상 선정 (통상 110~130%)

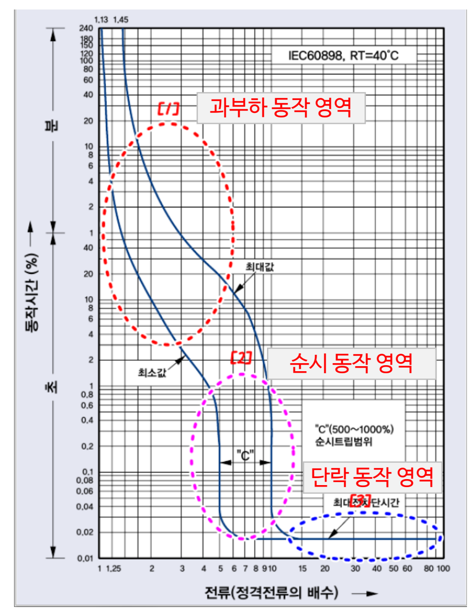
※ 배선용 차단기 선정 기준
· 사고 전류 차단이 가능할 것
· 부하전류를 안전하게 통전할 수 있을 것
· 부하 전원 투입시 등, 사고 외의 경우에 불필요하게 동작하지 않을 것
· DC 전압에 사용할 경우에는 차단 전류 및 사용전압에 유의할 것
· 목적으로 하는 보호가 가능할 것
· 회로 전압에 적합한 정격장치의 것을 선정할 것

인버터 입력차단기 정격전류

$$I_m[A] > \frac{\text{인버터정격출력[kW]} \times 1000}{\sqrt{3} \times \text{정격전압} \times \text{입력역률} \times \text{인버터효율}}$$

정격차단전류(단락전류)

$$I_S[kA] = \frac{\text{변압기 용량[kVA]}}{\sqrt{3} \times \text{변압기 2차측 전압} \times \frac{\%Z}{100}}$$



3) 입력 리액터

- 고조파 억제 및 역률 개선
- 전압강하(상전압 기준) 2~5% 이내 선정 (통상 3%)

$$L[H] = \frac{\text{인버터 입력전압} \times \text{전압강하분(백분율)}}{\sqrt{3} \times 2\pi \times f \times \text{정격전류}}$$

시뮬레이션 Data 분석								
NO REACTOR	Harmonic	3	5	7	9	11	13	THID
	(Ih / I1)%	79.48(%)	64.1(%)	28.2(%)	17.9(%)	2.5(%)	5.12(%)	83.38%
REACTOR (2%: 0.367mH)	(Ih / I1)%	48(%)	24(%)	8(%)	5.33(%)	2.66(%)	2.13(%)	42.03%
감소율		31.48%	40.1%	20.2%	12.57%	-0.16%	2.99%	41.35%

4) 입력 FUSE

- 인버터 보호 기준 (단락, 화재방지)
- 인버터 정격전류의 200% 이상 (최소 180%)
- 인버터 전원 투입시 FUSE 소손 발생 주의 (초기 충전시 돌입전류 주의)
- FUSE의 I^2t를 Diode보다 적게 선정시 Diode 보호 가능 (Fuse I^2t 〈 Diode I^2t)

5) 출력 M/C

- 출력 강제 Off시 사용 (정비성 용이)
- 모터 정력 전류의 150%, 1min 이상 용량 선정 (과부하 고려)
- 인버터 구동전에 On, 인버터 정지후에 Off가 되도록 구성

6) 출력 리액터

- 모터 과전압 억제 (dv/dt 억제)
- 전압강하(상전압 기준) 2~4% 이내 선정 (통상 2%)
- 리액터 소음에 주의할 것 (출력 전류 Ripple분 고려하여 정격전류 결정)

$$L[H] = \frac{\text{인버터 출력전압} \times \text{전압강하분(백분율)}}{\sqrt{3} \times 2\pi \times f \times \text{정격전류}}$$

※ 출력 리액터의 목적

· 인버터 스위칭시 발생하는 빠른 전압상승률(dv/dt)로 인해, 케이블에 Voltage refelction을 야기하여 출력 전압은 Motor termina측에서 거의 2배 까지 증가 할 수 있다.
· 출력 리액터는 인버터 출력 전압의 급격한 상승과 모터 절연에 미치는 Stress를 줄이는 목적으로 사용된다.
또한 베어링 전류를 줄이거나 높은 스위칭 속도에 의해 Cable 통해 발생하는광대역의 EMI 유발을 줄일 수 있다.
· 언제 사용해야 하는 가는 모터의 절연과 관계가 있다. 만약 모터의 절연이 요구사항을 만족 하지 못한다면 모터 수명은 짧아질 것이다.

7) 회생제동 저항(DBR) 용량 선정

- 회생운전 모드 일 때 발생하는 회생에너지를 열로서 소모시킴
- 사용율은 10%, 30%, 60%ED 표준 적용 (설비에 따라 다르게 적용)
- 제동토오크 150% 이상 기준(표준)으로 저항값 결정 (일반적으로 110~130%)

$$R_{DB} = \frac{\text{DC동작개시전압}V^2}{\text{모터용량}P_M \times \text{제동토오크}\%T_B}$$

○ 제동 토오크 T_B [Nm] 산출

$$T_B = \frac{(J_M + J_L) \times (N_1 - N_2)}{9.55 \times t_s}$$

J_M : Motor 관성 모멘트 [kg·m²] J_L : Motor 축의 관성 모멘트 [kg·m²] N_1 : 감속 개시 속도 [rpm] N_2 : 감속 완료 속도 [rpm]
T_L : 부하 torque [N·m] t_s : 감속시간 [sec]

○ 제동 저항기 용량 산출

- 회생 제동시에는 모터 내부의 손실 중 약 20%가 제동 토오크로서 작용함으로, 이를 고려하여 제동 저항값 ROB [Ω]을 산출한다.

$$R_{OB} = \frac{V_c^2}{0.1047 \times (T_B - 0.2T_M) \times N_1}$$

V_c : 직류회로 전압 [V] (200V급 : 300V, 400V급 : 760V)
T_B : 제동 Torque [N·m] T_M : Motor Torque [N·m] N_1 : 감속 개시 속도 [rpm]

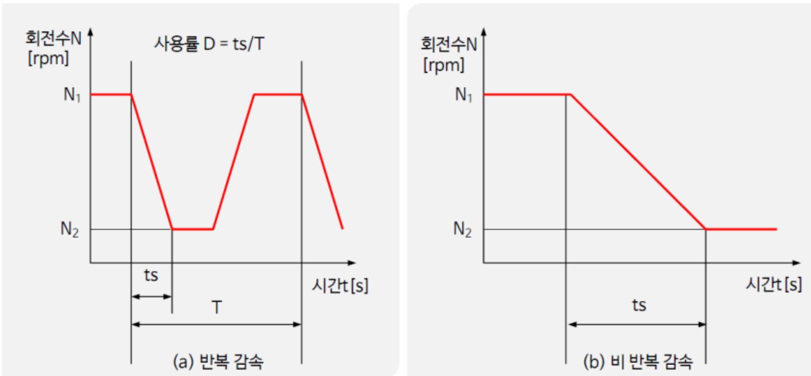
- $(T_B - 0.2T_M) < 0$ 이면 제동 저항기를 장착할 필요가 없다.
- 제동 저항기와 제동 소자로 구성되는 방전 회로에는 제동 소자의 허용 전류 I_C [A]가 회로의 허용 전류가 된다.
  따라서 회로에서 사용할 수 있는 제동 저항기의 최소값 $R_{MIN}=V_C/I_C$ [Ω] 이 되며, 소요되는 제동저항 R_B는 $R_{MIN}<R_B<R_{OB}$의 조건에 의해 결정된다.

○ 제동시의 평균 소비전력 P_{RO} [kW] 산출

$$P_{RO} = 0.1047 \times (T_B - 0.2T_M)\frac{N_1 + N_2}{2} \times 10^{-3} [\text{kW}]$$

○ 제동저항기 정격전력 P_t [kW] 산출

- 반복 감속의 유무에 따라 제동저항기의 정격 전력이 달라진다.
  그림은 감속 패턴을 나타낸 것이다.
  그림에 의해 얻은 전력 증가율 m과 제동시의 평균전력 P_{RO}에서
  제동저항기의 정격전력 P_t를 구한다. $P_t > P_{RO}/m$ [kW]
  이와 같이 계산에 따라 얻어진 제동저항값 R_{OB}, 정격전력 Pt에서 저항기를 설정한다.



감속 패턴

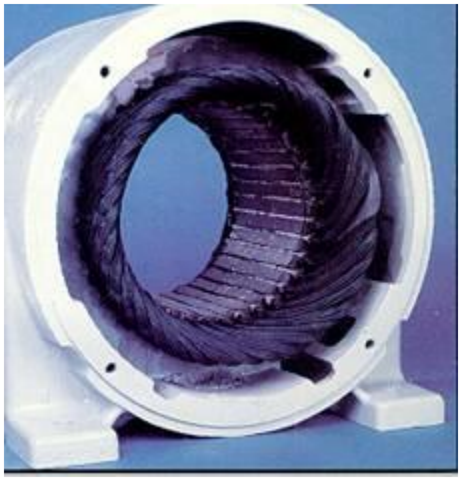
10. 인버터 출력단 필터

필터 종류	설치장소	억제원리	구성 및 제작 비용	비 고
Output Reactor	인버터출력단	전압상승률 저감으로 전압반사 억제	구성품 : L 제작비 : 인버터 용량에 비례	1.일반적 보편화 됨. 2.리액터에서의 기본파 전압강하로 리액터값을 크게 하는데 한계가 있어 전압억제 효과가 제한됨 3.대용량 일수록 제작비용 증가
R-C Terminator	전동기입력단	임피던스 매칭에 의한 전압반사 제거	구성품 : RC 제작비 : 인버터 용량에 관계없이 일정	1.구성 간단 및 낮은 Cost 장점 2.인버터 용량과 무관하게 사용가능 3.전압상승시간은 유지함 4.설치장소에 따라 전동기 입력단에 설치 곤란한 경우가 있음 5.인버터1대로 다수의 전동기 운전시 불리 6.소용량의 인버터에서는 전력손실이 문제 됨
du/dt Filter	인버터출력단	전압상승률 저감으로 전압반사 억제	구성품 : LC or LCR 제작비 : 인버터 용량에 비례	1.설치가 용이 & 인버터 1대로 다수의 전동기 운전시 유리 3.대용량 일수록 리액터 제작 비용 상승 4.케이블 길이에 따라 설계 상수를 반영한 제작 필요 5.LCR의 경우 소용량의 인버터에서는 전력손실 문제됨.
Sine-wave Filter	인버터출력단	출력전압을 정현파로 제어 전압반사 제거	구성품 : LC 제작비 : 인버터 용량에 비례	1.출력전압을 정현파로 제어함으로 반사파 전압이 거의 없음 2.전자파장애(EMI) 발생 억제에도 효과가 큼 3.토오크 응답성이 떨어짐 & 대용량 일수록 제작비용 증가 4.필터 콘덴서 충전전류의 영향으로 인버터 용량 증가 필요

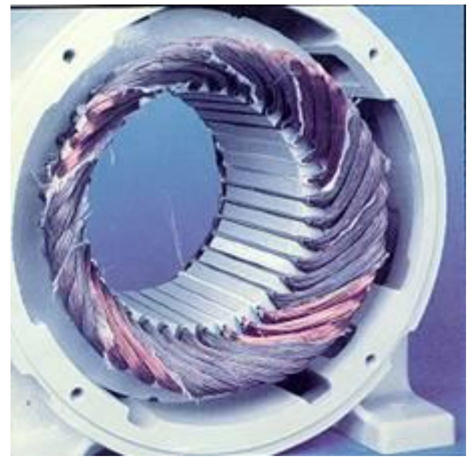
11. 전동기 권선 소손 원인

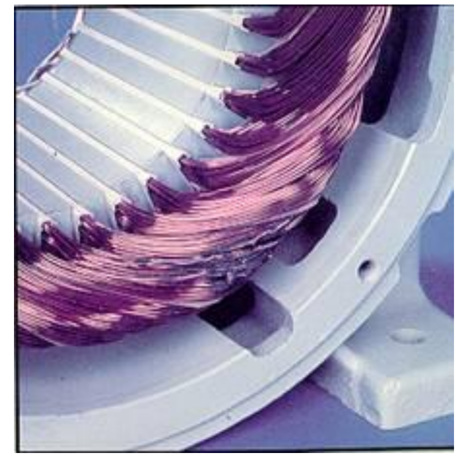
〈 출처 : 효성중공업 기술자료 〉

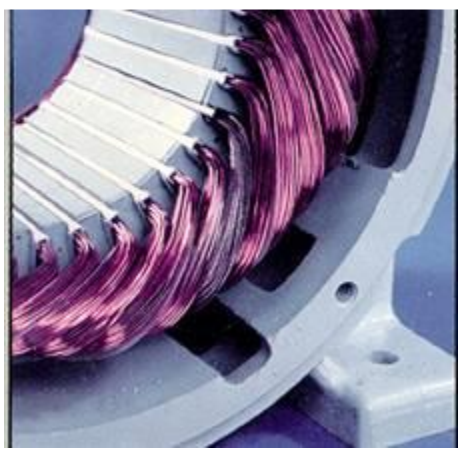
- 전기적 원인 : 과부하, 결상, 구속, 층간단락, 권선의 지락, 순간과전압의 유입
- 기계적 원인 : 회전자가 고정자에 닿는 경우, 베어링의 마모나 윤활유의 부족으로 발생한 열의 전도에 의한 소손

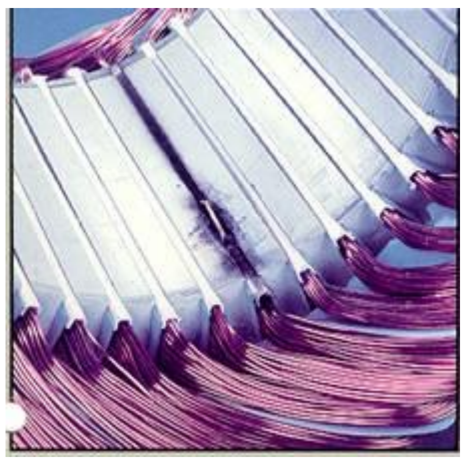

〈 과부하 〉

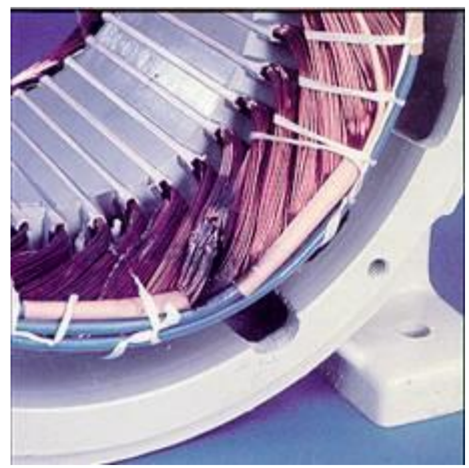

〈 결상 – Delta결선 〉


〈 결상 – Y결선 〉


〈 절연열화 – 층간단락 〉


〈 절연열화 – 선간단락 〉


〈 절연열화 – 권선지락 〉


〈 순간 과전압의 유입 〉


〈 기계적 원인 – 구속 〉

12. 인버터 판넬 설계시 고려사항

■ 외함 설계 고려사항

- Drive, Reactor, Filter, DBR 등의 발열 부품에 대한 냉각 고려
- Drive Fan 풍량에 따른 흡기 및 환기 통로를 고려한 제작 설계
- 판넬 열반 시 해당 판넬의 발열 공기가 판넬 측간 공유하지 않도록 격벽 반영
- 실외 설치하는 경우 강제 냉각을 위한 Air Cooler 반영 검토
- 자립시 무게 중심이 한방향으로 편중 되지 않도록 외함 체적 설계

■ 제동 저항 (DBR)의 판넬 배치

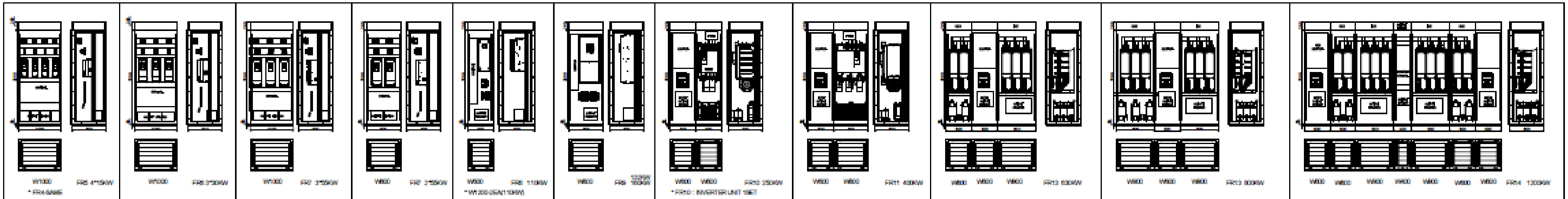
- Drive와 DBR간 Cable은 내열 Cable 적용 (석면 Cable X)
- DBR Box 최대 높이는 400mm 이내로 반영
- Drive 판넬 상부 배치시 천고 최소 공간 200mm 이상 확보
- DBR Box는 정비편의를 위하여 해체가 용이한 구조로 설계
- DBR 사용률은 Drive 용량을 기준으로 적용
- DBR은 발열체이므로 DBR Box 도색 금지
- DBR 동작회로 소손시 Main Power Off Sequence 반영

■ 판넬 구조 고려사항

- 전장품은 Power Flow를 따라 배치
- Drive 입,출력 Power Cable간 적정 거리 이격
- Power와 Signal 전선 분리
- Commercial Power 전장품은 취부 공간 부족시 측면 별도 구성
- Drive 다수 장착시 Section 구분 가능 하도록 배치
- Brake 적용 개소에는 Maintenance용 Select Switch 반영
- Bus-bar 반간 접속 연결 작업이 용이한 구조
- Communication Cable은 Power Cable과 적정 거리 이격
- Panel 외함 접지와 System 접지 구분
- Panel 상부 결로 및 자연 낙수에 대한 방수 가능한 구조
- 전,후면 Door 구조의 경우
  - · 조작부 및 감시용 전장품은 전면 배치
  - · Power 계통 전장품은 후면 배치
- 건물 구조상 진동이 있는 장소에 설치하는 경우 진동 흡수 장치 반영

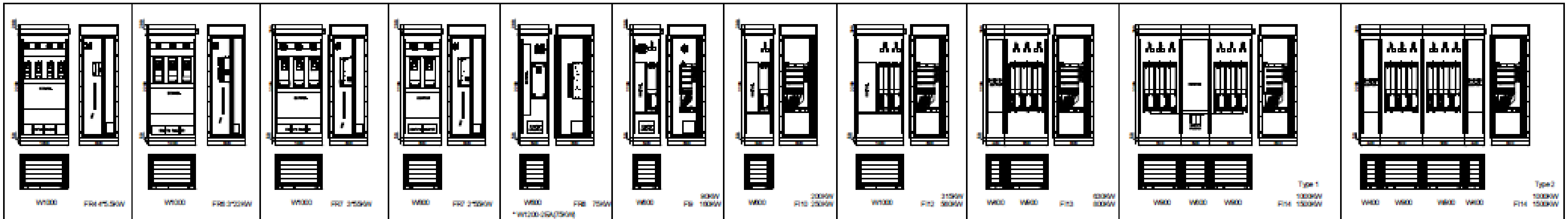
13. 판넬 Arrangement & Size (PosDrive NX Series)

SINGLE DRIVE PRODUCT NXP



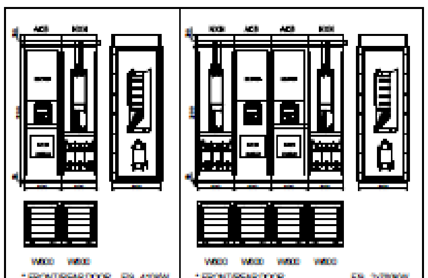
* Wall-Mounted Type : Panel Depth 1000W 적용시 전후면 사용 가능
* Output Reactor : FR10~FR14 Frame Option

COMMON DC BUS PRODUCT NXI



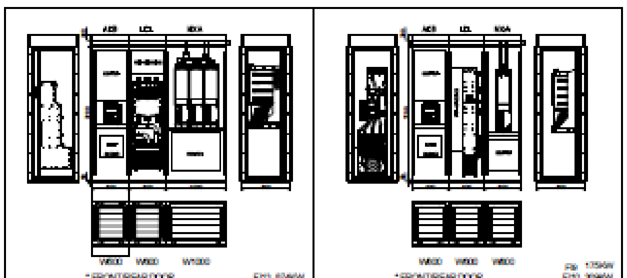
* Wall-Mounted Type : Panel Depth 1000W 적용시 전후면 사용 가능
* Load Disconnector Switch ; Option (Drive Is Not Pre-Charging Circuit)
* Output Reactor : FI10~FI14 Frame Option

COMMON DC BUS PRODUCT NXN



* Rear Space 부족시 취부작 가능한 Plate 반영 고려

COMMON DC BUS PRODUCT NXA



* Rear Space 부족시 취부작 가능한 Plate 반영 고려
* FI13 Frame 병렬 구성시 별도의 Incoming Panel 적용 필요

14. 인버터 관련 Trouble 및 대책

■ 인버터 오동작시

1. 같은 공장내에 대형모터를 기동시키면 관련 없이 운전중인 인버터가 정지해 버리는데 원인은 무엇입니까?

☞ 모터를 기동하면 정격전류의 약 5~6배의 기동전류가 흘러 모터 1차측 변압기에 전압강하가 발생하는데 모터 영향이 크면 그 영향도 커지게 되고, 같은 변압기에 접속된 인버터는 대폭적인 전압강하(부족전압) 또는 순시 정전이 발생해 보호 기능이 동작하는 것이다.

2. 인버터 입력 각상 전류를 측정 했더니 3상 전류가 같지 않고 어느 한상으로 높은 전류가 흐르고 있습니다. 원인 및 대책은 무엇입니까?

☞ 인버터는 3상 전원을 입력 받아 컨버터부에서 직류 전압으로 정류하는데, 만약 3상 전압이 같지 않고 불균형하게 되면 인버터 특성상 어느 한상으로 전류가 흐를수 있다. 이러한 경우 컨버터부의 다이오드 모듈이 소손될 수 있으므로 주의해야 한다. 대책으로는 3상 전원 변동률이 3% 이내로 되도록 하고 인버터 입력측에 리액터를 설치한다.

3. 인버터로 모터의 회전 방향을 바꾸려 하는데 잘되지 않습니다. 어떻게 해야 합니까?

☞ 모터의 3상중 어느 한상이 단선되거나 절연이 파괴되면 기동이 잘 되지 않고 회전 방향이 바뀌지 않을 수 있다. 인버터와 모터의 출력 배선을 확인하고 모터 절연 파괴 유무를 점검 하도록 한다.

4. 인버터 사용 중 제동소자(GAL) 또는 제동 유니트가 소손 되었습니다. 원인이 무엇입니까?

☞ 부하 운전 조건에 맞지 않게 제동 유니트 정격을 벗어난 사양의 제동 저항을 선정 하였거나, 제동 저항이 단락으로 인한 단락 전류 또는 판넬 프레임 등에 접지가 되어도 지락 전류에 의해 소손 될 수 있다.

5. 인버터의 초기충전저항(돌입전류 억제저항)이 소손 되었습니다. 원인이 무엇입니까?

☞ 인버터 전원을 초기 투입하면 콘덴서로 돌입 전류가 흘러들어 가는데 이 돌입 전류를 억제하기 위한 것이 초기충전저항 인데 인버터의 입력 전원을 빈번하게 ON/OFF하게 되면 높은 피크치의 돌입 전류가 빈번히 인가되어 초기충전 저항이 소손될 수 있다. 그러므로 인버터 전원을 ON, OFF 하여 모터를 운전, 정지하지 않도록 한다.
또, 순시 정전후 복전이 잦은 장소에 설치된 인버터에서도 위와 같은 현상이 발생할 수 있으므로 주의가 필요하다.

6. 인버터의 전원 입력단자와 출력단자의 전류를 측정해 보니 서로 다르게 나옵니다. 원인이 무엇입니까?

☞ 인버터의 입력측은 상용전원이 변동 없이 입력되는 반면, 출력측의 전압은 주파수에 비례해 가변되고 특히 부하특성에 따른 토오크 보상으로 인해 출력 전류는 계속적으로 변화한다. 이러한 이유로 인버터 입력 전류와 출력 전류 차이가 나게 된다.

■ 주변기기 오동작시

1. 인버터를 가동하기만 하면 PLC, 센서 등과 같은 주변 기기들이 오동작 합니다. 원인 및 대책은 무엇입니까?

☞ 인버터는 전압을 초당 10000번 이상 고속 스위칭 하는 전력변환 장치이므로 자체적으로 노이즈가 발생한다. 이 노이즈가 여러 경로를 통해서 주변 기기에 영향을 준다. 대책으로는 여러 가지가 있지만 주요 내용을 요약해 보자면 인버터 입출력 전원단자(RST,UVW)와 제어 배선은 30cm 이상 분리해 배선하고(최소 10cm이상) 배선이 교차하게 되는 경우는 가능한 수직으로 배선하고 평행 배선은 배제한다. 입력측 전원은 절연 변압기를 사용하고 주변기기와 별도 전원을 사용한다.
또 인버터 입력측에 리액터를 설치하는 것도 좋다. 접지는 인버터와 주변기기 각각 별도접지(2종 or 3종)를 하도록 한다. 여의치 않은 경우는 인버터만 프레임 접지 한다.
제어 배선은 쉴드선을 사용하고 제어 단자의 Common이나 E 단자에만 쉴드를 연결 하도록 한다. 쉴드는 절대로 프레임 접지와 함께 연결하지 않도록 한다.
주변기기는 가능한 인버터와 멀리 띄워 설치하고 여의치 않은 경우는 중간에 차폐판을 설치 하도록 한다. 또한 스위칭 주파수(Carrier Frequency)를 인버터가 허용하는 범위내에서 설정(약3~5kHz) 사용하는 것과 노이즈 필터를 사용하는 것도 한 방법이 될 수 있다.

2. 외부에 설치된 제동 저항이 소손 되었습니다. 원인이 무엇입니까?

☞ 제동저항이 타버렸다는 것은 여러 이유가 있지만 인버터 용량에 맞지 않는 제동저항을 달았거나 제동저항이 판넬등에 단락 되었을 경우에 발생할 수 있다. 또한 관성이 큰부하를 빈번하게 감속하게 되면 회생전압에 의한 제동저항 발열로 소손 될 수 있다. 이러한 경우는 제동저항의 냉각을 고려하거나 인버터의 용량을 높일 필요가 있다.

3. 인버터를 동작하면 주위에 설치된 ELB(누전차단기)가 오동작합니다. 원인 및 대책으로 무엇이 있습니까?

☞ 인버터의 입출력선간 및 대지간 정전용량이 존재하여 본래 모터 전류 외에 이 정전용량을 경유하는 누설전류가 흐른다. 상용전원에 비해 인버터의 경우 누설전류는 고주파 성분이 많이 포함되어 있는데, 높은 주파수대의 대지간 누설전류가 누전차단기의 동작 전류를 넘어 누전차단기가 동작한다. 스위칭 주파수(Carrier Frequency)가 높고, 배선길이가 길고, 대지간 정전용량이 크면 클수록 누설전류도 크게 된다. 대책으로는 고조파 surge용 누전차단기를 사용 또는 감도 전류를 높게 설정한다. 또한 모터에 전용 접지선을 배선하고 인버터의 스위칭 주파수를 낮추면 누설전류가 감소한다.

4. 인버터로 모터를 운전하는데 진동이 심합니다. 특별한 대책이 있습니까?

☞ 모터의 진동은 크게 2 종류로 구별되는데 모터에 전원을 차단했어도 발생하는 진동을 기계적 진동, 모터에 전원이 인가 되었을 때 발생하는 진동을 전자적 진동이라고 한다.
기계적 진동은 부하측에 이상이 있을 경우 발생하는 것이므로 부하를 점검하고, 전자적 진동의 대책은 스위칭 주파수를 높여 전류 파형을 안정되게 하고 인버터 출력측에 리액터를 설치한다.

5. 인버터를 사용하면 모터측에 소음이 심하다고 하는데 어떻습니까?

☞ 인버터의 출력 파형은 상용 전원과 달리 펄스 형태의 전원이므로 이 전원 파형을 만드는 스위칭 주파수로 인하여 모터에 전자 소음이 발생한다.
소음이 심한경우 스위칭 주파수를 인버터가 허용하는 범위내에서 한단계씩 증가시켜 소음이 안정되는 지점을 설정한다. 단, 인버터 스위칭 손실 증가로 인한 온도상승에 의해 정격출력을 내지 못하므로 스위칭 주파수를 올릴 때는 인버터에서 허용하는 설정범위 및 출력 필터사양, 노이즈 대책 등 여러가지 고려할 사항이 많다.

■ 기타 문제점

1. 표준(범용) 모터를 인버터로 구동하면 온도 상승이 크다고 하는데 얼마 정도입니까?

☞ 인버터의 출력파형은 상용전원에 비해 파형률이 나빠 온도상승에 따라 영향을 받는다. 또한, 저속에서는 냉각팬에 의한 냉각 효과가 떨어져 60Hz에서는 정격 토오크로 연속 사용할 수 있지만 ½속도에서는 10% 감소, 1/3속도에서는 20% 감속된 토오크로 연속 운전할 필요가 있다.

2. 브레이크가 내장된 범용 모터를 인버터로 구동할 때 주의할 점은 무엇입니까?

☞ 브레이크 여자 회로는 반드시 인버터 1차측 전원으로 구동 시켜야 한다. 그리고, 인버터가 동작중(가속, 정속, 감속)에 브레이크가 동작하면 과전류(OC)트립이 발생하므로 인버터 출력을 정지한 후 브레이크 동작하도록 시퀀스를 꾸민다.

3. 범용 모터를 인버터로 운전하는데 모터의 절연이 파괴되었습니다. 원인이 무엇입니까?

☞ 인버터와 모터 사이의 배선 길이가 긴 경우에는 케이블의 분포 정수에 따라서는 반사 공진에 의해 전동기 단자전압에서 정격의 2배에 가까운 써지 전압이 발생한다.
200V계열에서는 문제가 되지 않지만 400V계열에서는 이 써지 전압으로 인해 모터의 절연이 파괴될 수 있다.
400V계열에서는 평활된 직류전압이 × 440 = 620V이고 써지전압은 620 × 2=1200V가 되므로 범용모터 절연내력인 850 ~ 1000V를 넘으므로 모터 절연이 파괴된다.
대책으로 전동기의 절연내력을 향상시키거나 인버터 출력단에 출력 리액터나 써지억제 필터를 설치해서 써지 전압을 억제 하도록 한다.

4. 인버터의 수명은 어느 정도입니까?

☞ 평활 콘덴서, 냉각팬과 같은 소모품을 정기적으로 교체하고 급격한 부하 변동에 따른 무리한 운전을 피하고 적절한 주위 환경(온도, 습도, 먼지)을 유지하여 주면 10년 이상의 수명을 기대할 수 있다.

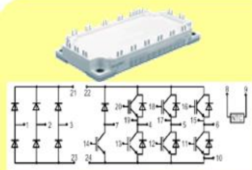
5. 인버터 부품의 교환시기는?

☞ 평활 콘덴서와 알루미늄 콘덴서는 약 5년, 냉각팬은 약 3년, 휴즈는 10년, 그리고 릴레이와 타이머 등은 점검 후 결정 하도록 한다.
그러나, 사용환경(주위온도, 통풍조건)과 사용률(부하율, 전압인가 시간)에 따라서 이 교환 년 수가 변화될 수 있다.

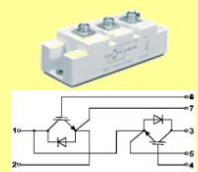
6. 인버터의 수명이 단축되는 요인은?

☞ 온도, 습도가 높거나 변화가 심한 장소에서 사용하는 경우
☞ 운전과 정지를 빈번하게 하는 경우
☞ 전원(전압, 주파수, 파형왜곡)과 부하의 변동이 큰 경우
☞ 진동, 충격이 많은 장소에 설치되어진 경우
☞ 마모, 염분, 산성가스, 유화수소 등의 유해가스,오일분진 등의 환경에서 사용하는 경우
☞ 사용전 보관상황이 나쁘거나 장기간 보존된 경우
☞ 전원 용량이 인버터 용량보다 매우 큰 경우 (약10배 이상)

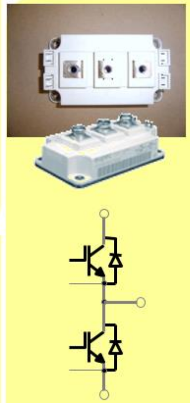
15. 인버터 반도체 소자 종류 및 점검 요령



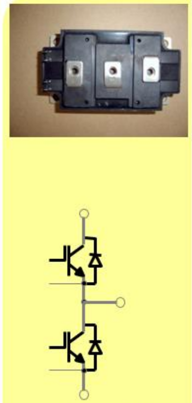
Diode + Six Pack
(10A~75A)



Dual Module
(75A~150A)

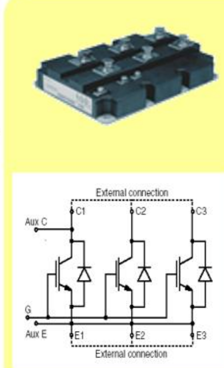


Dual Module
(150A~400A)

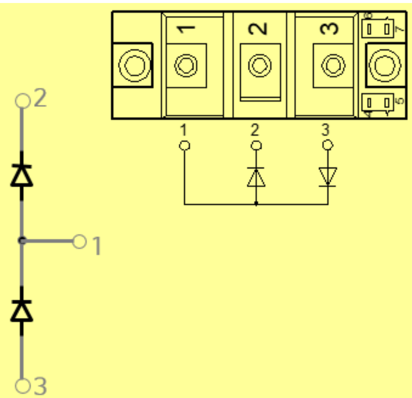


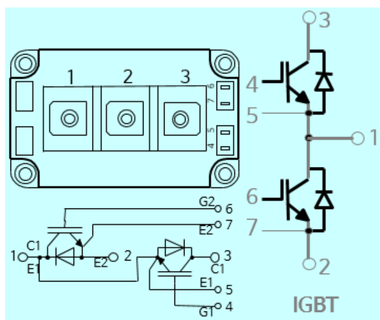
Dual Module
(150A~400A)

Dual Module
(400A~2400A)

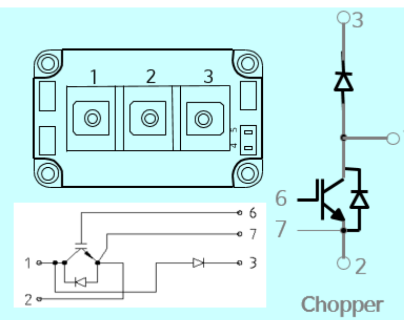


Single Module
(2400A~3600A)





IGBT
(GB)



Chopper
(GAL)

DIODE 전압 측정치

	TEST 단자 (-)→(+)	저항치(Ω)	전압치(V)
1	P②→R(S,T)①	50K 이상	0.3V이상
2	R(S,T)①→P②	50K 이상	1V(∞) 이상
3	N③→R(S,T)①	50K 이상	1V(∞) 이상
4	R(S,T)①→N③	50K 이상	0.3V이상

DIODE 전압 측정치

	TEST 단자 (+)→(-)	전압치(V)
1	R(S,T)①→P③	0.3V이상
2	N②→R(S,T)①	0.3V이상
3	P③→R(S,T)①	1V(∞) 이상
4	R(S,T)①→N②	1V(∞) 이상
5	P③→N②	0.6V이상
6	N②→P③	1V(∞) 이상

IGBT 저항 측정치

	TEST 단자 (+)→(-)	저항치(Ω)
1	Gate④⑥→Emitter⑤⑦	200K이상
2	Emitter②→Gate	200K이상
3	Gate→Collector	5M이상
4	Collector→Gate	2M이상
5	Collector→Emitter	100K이상
6	Emitter→Collector	50K이상

16. PosDrive 구성 및 이해

■ PosDrive Line-up

	Model	설명	Type	IP등급	용량 (400V급 기준)
Single Drive	**NXP** (Wall-Mounted)	AC/AC(Diode/IGBT) 인버터	Unit	IP21/54*	1.1kW(FR4)~160kW(FR9)
	NXP (Drive Module)	AC/AC(Thy'/IGBT) 인버터	Unit	IP00	200kW(FR10)~1200kW(FR14) FR10~11(x1), FR12(FR10 x2), FR13(NFEx2~3 & FI13x1), FR14(NFEx4 & FI13x2)
Common DC Bus Drive	**NXA**	AFE 컨버터(회생)	Unit	IP00	114,138,175kW(FI9), 259, 309kW(FI10), 773, 874kW(FI13), Max 4병렬
	NXN	NFE 컨버터(비회생)	Unit		410kW(FI9), Max 6병렬
	NXI	INU 인버터(DC/AC)	Unit	FR4-8 (IP21/54*) FR8, FI9-14 (IP00)	1.5kW(FR4)~75kW(FR8) 90kW(FI9)~1500kW(FI14)
	NXB	BCU(Brake Chopper Unit)	Unit		6kW(FR4)~223kW(FR8) 268kW(FI9)~2310kW(FI13)

* : Option

Module
Single Drive Products

Module
Common DC bus Drive Products

Single Drive
NXP wall-mounted

▶ 업계에서 가장 작고 포괄적인 Drive package 중 하나로, 필요한 모든 구성 요소가 단일 Frame에 내장
▶ Low power range에서 Compact IP21 또는 IP54 frame으로 사용 가능

Fully equipped

- 내부 EMC filtering을 장착하게 되며, 모든 장치는 All metal frame 내장
- FR4~FR6는 표준으로 Brake Chopper 내장
  380-500V Unit에는 내부에 Brake Resistor 장착 가능
- FR7~FR9는 Option으로 Brake Chopper를 내장 가능

Features and benefits

- Complete Voltage Range : 208 ~ 690VAC
- System 복잡성을 줄여 Engineering, 설치, 시운전 등의 시간과 비용 절감

Single Drive
NXP drive module

▶ 고출력 IP00 Drive module은 Cabinet, Switchgear 또는 별도의 외함에 설치하도록 설계됨
▶ 소형 설계로 표준 외함에 Module을 설치하기 용이

Designed to fit

- FR10~FR11은 1개의 Module, FR12는 2개의 FR10 Module로 구성
- FR13~FR14는 2개~4개의 NFE + FI13 또는 FI14 Inverter 장치로 구성
- 외장형 AC Chokes 기본 제공
- FR10~FR12은 Option으로 Brake Chopper를 내장 가능
- 6-pulse 및 12-pulse Supply versions 으로 제공

Features and benefits

- Assembly kits 사용으로 손쉬운 설치
- 최적화된 Module 설계로 Engineering에 필요한 시간과 비용 절감
- 전체 비용 및 Cabinet 공간 절감

Modular drive solutions
Common DC bus Drive

- ▶ 다수의 Drive system에 적합한 에너지 공유 Solution
- ▶ Module 구성 : Front-end Unit(AFE, NFE), Inverter Unit(INU), Brake Chopper Unit(BCU)

Reliable. Robust. Proven.

- 모든 AC 드라이브가 Common DC bus를 공유하여 에너지를 **효율적으로 활용 및 분배**
- 비용 효율적 Solution이 요구되는 분야에 적용
- 다수의 Front-end unit을 병렬로 연결 가능
- 최적화된 Module design은 추가적인 Engineering 절감 및 공간절약을 통해 전반적으로 비용절감
- 전압강하에 대한 내성 향상
- Drive system의 고조파 왜곡 감소

Front-end Unit

- Active Front-end (AFE) : 198kW~1.2MW
- Non-regenerative Front-end (NFE) : 488kW~673kW

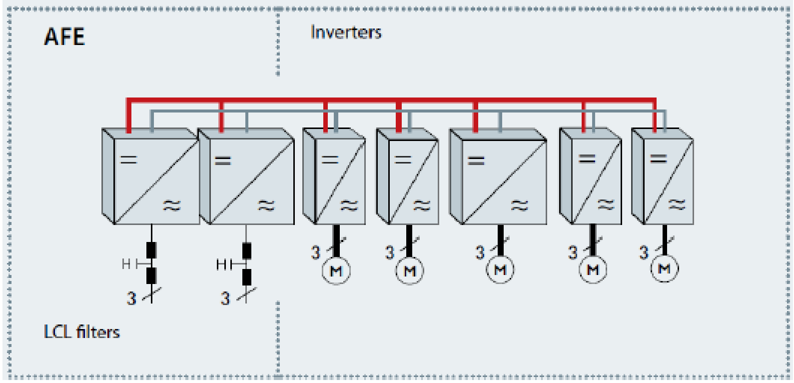
Inverter Unit

- Inverter Unit (INU) : 1.5kW~2.0MW

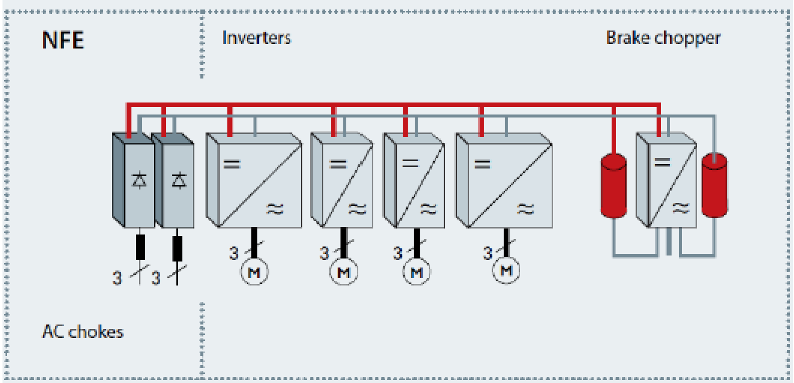
Brake Chopper Unit

- Brake Chopper Unit (BCU) : 5kW~2.5MW

A regenerative common DC bus system



A non-regenerative common DC bus system



Common DC bus Drive
NXA (AFE, Active Front-end Unit)

- ▶ 양방향(회생형) 출력변환을 위한 Common DC bus Drive 라인업의 Front-end module
- ▶ 전력계통에서 저고조파를 요구하는 Application 및 제동 출력이 높은 Process에 적합
- ▶ 과도한 제동 에너지를 주전원 계통으로 회생시켜 소비 에너지 비용 절감 효과

특징

- 회생형 저고조파 Converter module
- IGBT 기술 기반
- **AFE module H/W와 INU module H/W 동일**
- Switching 주파수 : 3.6KHz
- LCL filter 기본 적용
- 외장형 Pre-charging 회로 필요
- 별도 상위 전압 측정 불필요
- AFE module은 출력 증대를 위해 병렬구성 가능
  - 각각의 AFE는 독립적으로 운영되며, 부하에 의한 DC전압 변동에 따라 확실하게 부하 공유
  - 별도 추가 측정장비 및 AFE module에 추가 불필요
  - 이중화 가능
  - 용량이 다르더라도 병렬구성 가능
- Inverter와 동일한 Filed bus에 연결하여 제어 및 감시 가능

장점

- 아주 적은 전류 고조파 THDi 〈 5% (정격부하 조건)
  - 변압기 과부하 설계 불필요
  - 입력 Cable 과부하 설계 불필요
- DC 전압 Boosting (기본값 : +10%)
  - 정격 직류 전압(1,35x U_N)보다 높게 전압을 승압 가능
  - 입력 전원 변동이 있더라도 안정적인 DC전압 공급
- 이중화
  - **AFE unit은 병렬 구성되어 독립적인 운전 지원**
  - Drive간 별도 System bus 통신 없이 이중화 출력 제공
- 무효전류 제어
  - 초기값 설정에 따라 0값 제어
  - 무효전류 명령 값을 사용하여 AFE unit 전류와 전압 용량의 무효전류 보상 가능

Common DC bus Drive

NXN (NFE, Non-regenerative Front-end Unit)

▶ 단방향(모터링) 출력변환을 위한 Common DC bus Drive 라인업의 비용 효율적 비회생형 Front-end module

▶ 일반적인 수준의 고조파 허용 및 주전원측 회생이 불필요한 경우에 적합

특징

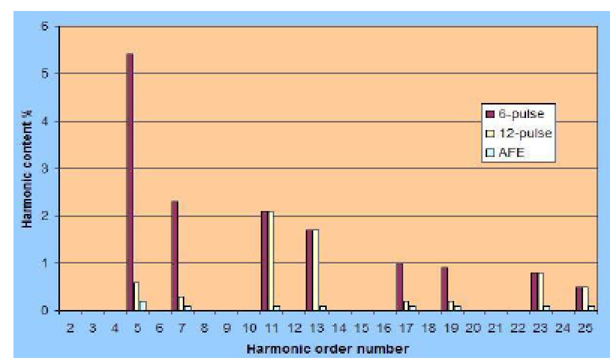
- Thyristor/Diode 구성품을 이용하여 Diode 정류기로 작동
- 전용 외장형 Reactor(Choke)가 입력단에 사용
- Common DC bus 충전 회로 내장으로 별도 Pre-charging **회로 불필요**
- Unit 간에 별도의 통신 없이 병렬 연결하여 사용전력 증대 가능
  - 각각의 NFE는 독립적으로 운영
  - 별도 추가 측정장비 및 NFE module에 추가 불필요
  - 이중화 가능

특 징	Front-end	
	AFE	NFE
기술	IGBT	Thyristor/Diode
Type	회생형	비 회생형
Switching 주파수	3.6KHz	입력전원 주파수
DC전압	1.35 x 1.1 x U_S	1.35 x U_S
THDi	〈 5%	〈 30%(6펄스), 〈 12%(12펄스)
Filter type	LCL	L
Pre-chatging	외장형	내부 포함
병렬구성 여부	가능	가능

〈 AFE와 NFE 특징 비교 〉

장점

- 비용 효과적인 Common DC bus Drive 라인업에서 단방향(전력 공급용) 전력 Converter module
  - 역기전력을 위해 별도 제동 Unit (BCU) 사용 가능
- 일반 드라이브 처럼 AC reactor(Choke)를 적용하여 THDi level 만족
  - 3권선 변압기를 통해 12펄스 System 구성 가능
- NFE unit은 용량만큼 Common DC bus를 Charging하므로 별도 Pre-charging 회로 불필요
  - Simple한 Drive system engineering
- **다른 Drive간 System bus 통신 없이 병렬구성 가능**
  - 출력 증대 및 이중화 가능



〈 AFE, NFE(6-pulse, 12-pulse) harmonics 〉

Common DC bus Drive
NXI (INU, Inverter Unit)

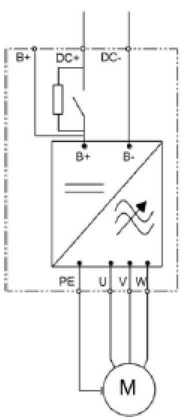
- 양방향 Inverter module
- FR4 ~ FR8은 Pre-charging 회로 내장
- FI9 ~ FI14는 활성화된 DC전압에 연결시
  별도의 외장형 Pre-charging switch 필요

Common DC bus Drive
NXB (BCU, Brake Chopper Unit)

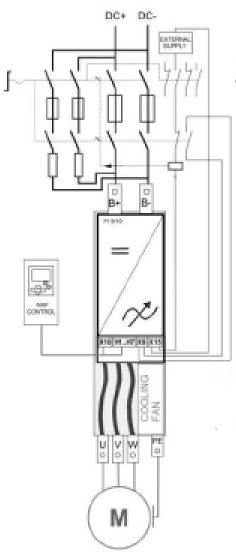
- BCU module H/W와 INU module H/W 동일
- 외장 제동저항 필요
- 2개의 제동저항이 연결되는 구조
- FR4 ~ FR8은 Pre-charging 회로 내장

용량별 INU 연결구성(with Pre-charging 회로)

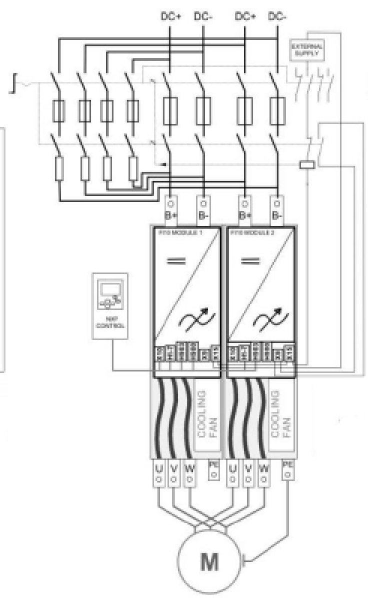
FR4 ~ 8



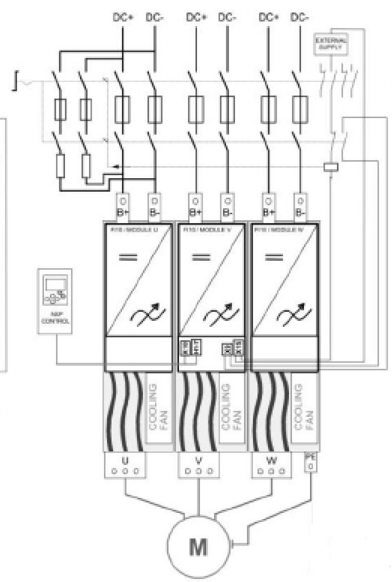
FI9 ~ 10



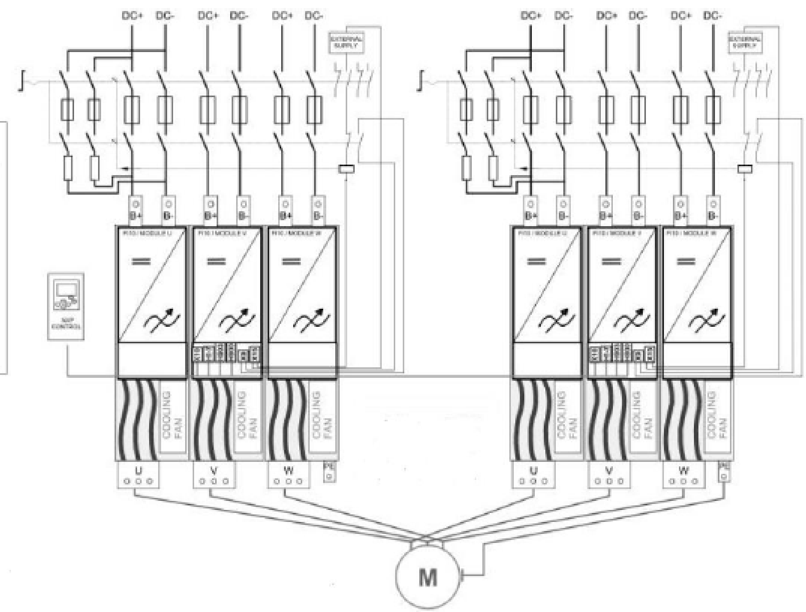
FI12



FI13



FI14



Single Drive

PosDrive NXP

NXP	0004	5	A	2	T	1	S	S	V	A1 A2 00 00 00+BM53

- **NXP** — **제품 분류**
  NXP = Single Drive Inverter
- **0004** — **정격전류** (nominal current I_L)
  0004 = 4A, **0520** = 520A etc.
- **5** — **정격 주전원 전압** (nominal main voltage)
  2 = 208-240 VAC **5** = 380-500 VAC **6** = 525-690 VAC
- **A** — **키패드**
  A = 표준 (숫자-문자 조합방식)
- **2** — **IP등급**
  5 = IP54, FR4-9 **2** = IP21, FR4-9 **0** = IP00, FR10-14
- **T** — **EMC emission level**
  C = Category C1 (EN61800-3) **H** = Category C2 (EN61800-3)
  L = Category C3 (EN61800-3) **T** = IT networks (EN61800-3)
- **1** — **내장형 Brake chopper**
  0 = Brake chopper 없음 **1** = Brake chopper 내장
- **S** — **Supply**
  S = 6펄스 **T** = 12펄스 **B** = Additional DC-Connection
- **S** — **S** = 표준 공냉식
  T = through-hole mounting FR4-FR9
- **V** — **Control 보드**
  S = 표준형 보드, FR4-8 **V** = As S, Varnish처리 보드
  F = 표준형 보드, FR9 **G** = As F, Varnish처리 보드
  A = 표준형 보드, FR10-12
  B = As A, 일체형 Control unit, Varnish처리 보드
  G = 분리형 Control unit, FR13-14, Varnish처리 보드
- **A1 A2 00 00 00** — **옵션 보드**; 각 슬롯은 다음과 같이 2개의 문자로 표시
  Ax = 기본 I/O 보드 **Bx** = 확장 I/O 보드
  Cx = fieldbus보드 **Dx** = 특수 보드

Common DC bus Drive

PosDrive NXI 인버터 유닛 (INU)

NXI	0004	5	A	2	T	0	C	S	V	A1 A2 00 00 00+BM53

- **NXI** — **제품 분류**
  NXI = INU (Inverter)
- **0004** — **정격전류** (nominal current I_L)
  0004 = 4A, **0520** = 520A, etc.
- **5** — **정격공급전압** (nominal supply voltage)
  5 = 380-500 VAC / 465-800 VDC
  6 = 525-690 VAC / 640-1100 VDC
- **A** — **키패드**
  A = 표준 (숫자-문자 조합방식)
- **2** — **IP등급**
  5 = IP54, FR4-7 **2** = IP21, FR4-7 **0** = IP00, FR8, FI9-14
- **T** — **EMC emission level**
  T = IT networks (EN61800-3)
- **0** — **내장형 Brake chopper**
  0 = N/A (brake chopper 없음)
- **C** — **C** = INU - 내장형 charging circuit 포함, FR4-FR8
  I = INU - no charging circuit, FI9-FI14
- **S** — **S** = 표준형 공냉식 드라이브
  U = 표준형 공냉식 전력 유닛 - 메인 팬 별도전원공급 (FR8-FI14)
- **V** — **하드웨어 변경; 모듈유형 - S 보드**
  S = Direct connection, 표준형 보드, FR4-8
  V = Direct connection, Varnish처리 보드, FR4-8
  F = Fiber connection, 표준형 보드, FI9-14
  G = Fiber connection, Varnish처리 보드, FI9-14
  OPT-AF 옵션보드를 사용하는 경우
  N = IP54 control box, Fiber connection, 표준형 보드, FI9-14
  O = IP54 control box, Fiber connection, Varnish처리 보드, FI9-14
- **A1 A2 00 00 00** — **옵션 보드**; 각 슬롯은 다음과 같이 2개의 문자로 표시
  Ax = 기본 I/O 보드 **Bx** = 확장 I/O 보드
  Cx = fieldbus보드 **Dx** = 특수 보드

Common DC bus Drive
PosDrive NXA 액티브 프론트-엔드 (AFE)

NXA	0261	5	A	0	T	0	2	S	G	A1 A2 00 00 00+BM53

- **NXA** — **제품 분류**
  NXA = AFE (Active Front-End)
- **0261** — **정격전류** (nominal current I_L)
  0261 = 261A, **1030** = 1030A, etc.
- **5** — **정격공급전압** (nominal supply voltage)
  5 = 380-500 VAC / 465-800 VDC
  6 = 525-690 VAC / 640-1100 VDC
- **A** — **키패드**
  A = 표준 (숫자-문자 조합방식)
- **0** — **IP등급**
  0 = IP00, FI9-13
- **T** — **EMC emission level**
  T = IT networks (EN61800-3)
- **0** — **내장형 Brake chopper**
  0 = N/A (brake chopper 없음)
- **2** — **납품시 포함 사항**
  2 = AFE 모듈
- **S** — **S** = 표준형 공냉식 드라이브
  U = 표준형 공냉식 전력 유닛 - 메인 팬 별도전원공급
- **G** — **하드웨어 변경; 모듈유형 - S 보드**
  F = Fiber connection, 표준형 보드, FI9-FI13
  G = Fiber connection, Varnish처리 보드, FI9-I13
- **A1 A2 00 00 00** — **옵션 보드;** 각 슬롯은 다음과 같이 2개의 문자로 표시
  Ax = 기본 I/O 보드 **Bx** = 확장 I/O 보드
  Cx = fieldbus보드 **Dx** = 특수 보드

Common DC bus Drive
PosDrive NXA LCL 필터

VACON	LCL	0261	5	B	0	R	0	1	1	T

- **LCL** — **제품 분류**
  LCL = AFE용 LCL필터
- **0261** — **정격전류** (nominal current)
  0261 = 261A, **1300** = 1300A, etc.

0261	5
0460	5
1300	5
0170	6
0325	6
1030	6

- **5** — **전압등급** (nominal supply voltage)
  5 = 380-500 VAC **6** = 525-690 VAC
- **B** — **Version (하드웨어)**
  A = DC/DC power supply가 없는 DC 팬
  B = 내장형 DC/DC power supply를 갖춘 DC 팬
- **0** — **IP등급**
  0 = IP00, FI9-13
- **R** — **Reserve**
- **0** — **Reserve**
- **1** — **Reserve**
- **1** — **냉각 팬 type**
  1 = DC 팬
- **T** — **제조업체**
  T = Trafotek

Common DC bus Drive

PosDrive NXN 비회생식 프론트-엔드 (NFE)

NXN	0650	6	X	0	T	0	S	S	V	00 00 00 00 00+BM53

- **NXN** — **제품 분류**
  NXN = NFE (Non-Regenerative Front-End)
- **0650** — **정격전류** (nominal current I_L)
  0650 = 650A only
- **6** — **정격공급전압** (nominal supply voltage)
  6 = 380-690 VAC / 513-931 VDC
- **X** — **키패드**
  X = 표준 (숫자-문자 조합방식)
- **0** — **IP등급**
  0 = IP00, FI9
- **T** — **EMC emission level**
  T = IT networks (EN61800-3)
- **0** — **내장형 Brake chopper**
  0 = N/A (brake chopper 없음)
- **S** — **납품시 포함 사항**
  N = NFE 모듈 **S** = NFE 모듈 + AC choke
- **S** — **S** = 표준형 공냉식 드라이브
  U = 표준형 공냉식 전력 유닛 - 메인 팬 별도전원공급
- **V** — **하드웨어 변경; 모듈유형 - S 보드**
  V = Direct connection, Varnish처리 보드
- **00 / 00 / 00 / 00 / 00** — **옵션 보드;** 각 슬롯은 다음과 같이 2개의 문자로 표시
  옵션 보드 불가

Common DC bus Drive

PosDrive NXB 제동 초퍼 유닛 (BCU)

NXB	0004	5	A	2	T	0	8	S	V	A1 A2 00 00 00+BM53

- **NXB** — **제품 분류**
  NXB = BCU (Brake Chopper Unit)
- **0004** — **정격전류** (nominal current I_L)
  0004 = 4A, **0520** = 520A, etc.
- **5** — **정격공급전압** (nominal supply voltage)
  5 = 380-500 VAC / 465-800 VDC
  6 = 525-690 VAC / 640-1100 VDC
- **A** — **키패드**
  A = 표준 (숫자-문자 조합방식)
- **2** — **IP등급**
  5 = IP54, FR4-7 **2** = IP21, FR4-7 **0** = IP00, FR8, FI9-13
- **T** — **EMC emission level**
  T = IT networks (EN61800-3)
- **0** — **내장형 Brake chopper**
  0 = N/A (brake chopper 없음)
- **8** — **8** = BCU - 내장형 charging circuit 포함, FR4-FR8
  no charging circuit, FI9-FI13
- **S** — **S** = 표준형 공냉식 드라이브
  U = 표준형 공냉식 전력 유닛 - 메인 팬 별도전원공급
- **V** — **하드웨어 변경; 모듈유형 - S 보드**
  S = Direct connection, 표준형 보드, FR4-8
  V = Direct connection, Varnish처리 보드, FR4-8
  F = Fiber connection, 표준형 보드, FI9-13
  G = Fiber connection, Varnish처리 보드, FI9-13
- **A1 / A2 / 00 / 00 / 00** — **옵션 보드;** 각 슬롯은 다음과 같이 2개의 문자로 표시
  Ax = 기본 I/O 보드 **Bx** = 확장 I/O 보드
  Cx = fieldbus보드 **Dx** = 특수 보드

EMC 선정표

PosDrive NXP EMC	병원	주거지역	상업	경공업 지역	중공업	해양
C (Category C1)	O					
H (Category C2)	R	R	R	O	O	
L (Category C3)				R	R	
T (Category C4)					R (IT)	R (IT)

O : Option, R : Requirement

17. 전기사업법 시행규칙 전압체계(제2조)

표 6 | 전기사업법 시행규칙 전압체계(제2조)

(적용 시점 : 2021. 1. 1)

표준전압	개정 전	개정 후
저압	DC 750V 이하	DC 1500V 이하
	AC 600V 이하	AC 1000V 이하
고압	DC 750V 초과 7000V 이하	DC 1500V 초과 7000V 이하
	AC 600V 초과 7000V 이하	AC 1000V 초과 7000V 이하
특고압	7000V 초과	7000V 초과