

ÉRZÉKELŐK ÉS BEAVATKOZÓK II.

8. BLDC (PMS) MOTOROK



Dr. Soumelidis Alexandros

2020.04.01.



BME KÖZLEKEDÉSMÉRNÖKI ÉS JÁRMŰMÉRNÖKI KAR
32708-2/2017/INTFIN SZÁMÚ EMMI ÁLTAL TÁMOGATOTT TANANYAG

A DC motorok hátrányai

Az eddig tárgyalt állandó mágneses DC motorokra jellemző:

- A táplálás forgórész-tekercekre történő átvitele és a vezérlés kommutátor és kefék segítségével történik.
- A kommutátor és a kefék együttese lényegében egy mechanikai kapcsoló.

Ennek hátrányai:

- A mechanikai működés során súrlódás, kopás, elhasználódás áll elő, a motor karbantartást igényel.
- Induktív elemeket (tekerceket) tartalmazó körökben a kapcsolások nagy induktív feszültségeket állítanak elő, amely a kontaktusokon szikrázást idéz elő. A szikrázás
 - termikus hatása révén a kontaktusok elhasználódásához vezet,
 - elektromágneses zavarokat kelt, amely a környező elektronikus eszközökben zajt idéz elő.

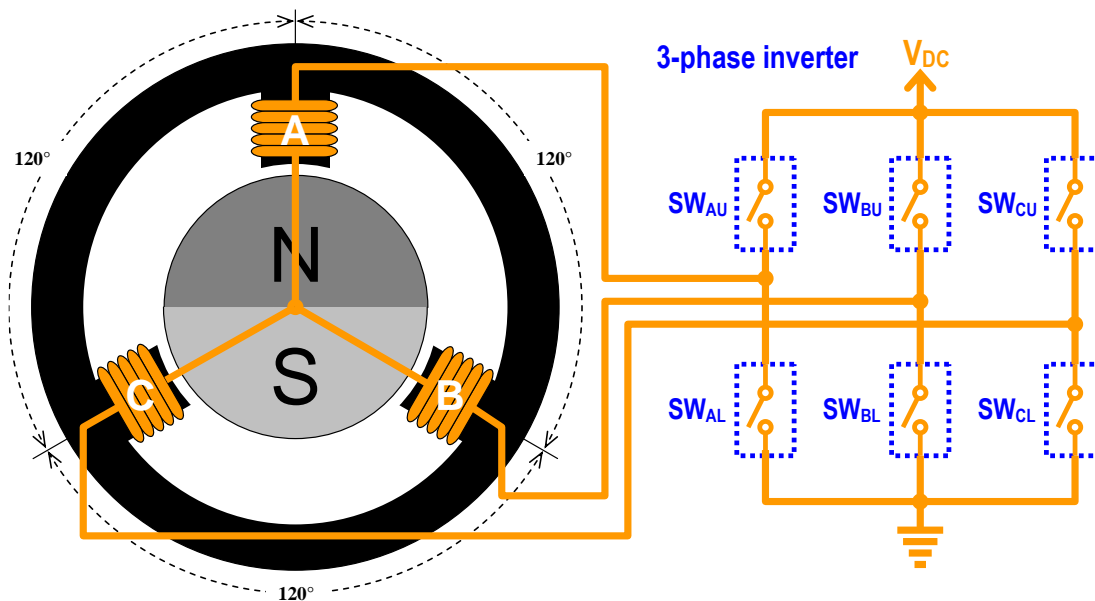


Brushless DC (BLDC) Motor

A problémák kiküszöbölése:

hagyjuk el a kommutátort és a keféket

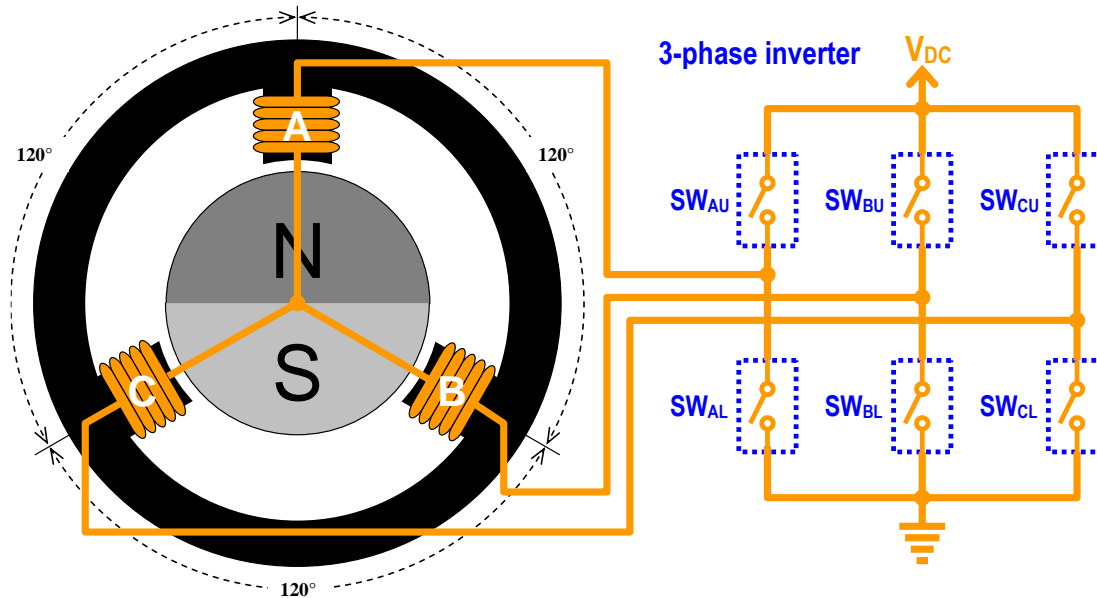
Kefe nélküli egyenáramú (BLDC - Brushless DC) motor



- Az állandó mágnes a forgórészbe kerül.
- A kommutátor helyét elektronikus kapcsolóhálózat veszi át.



Brushless DC (BLDC) Motor



Ez egy háromfázisú elrendezés:

- 3 körkörösen szimmetrikus állórész tekercselés csillag (vagy háromszög) kapcsolásba rendezve.
- 3-fázisú kapcsolóhálózat (közkeletű nevén inverter) - ez lényegében a H-híd háromágú változata.



Brushless DC (BLDC) Motor

A BLDC motor alakilag teljesen azonos az *állandó mágneses szinkronmotorral*, amelyet hagyományosan 3-fázisú szinuszos hálózatról táplálnak.

Ma a BLDC motorok egy vezérlési típusa az állandó mágneses szinkronmotor (**PMSM** - Permanent Magnet Synchronous Motor) vezérlés:

- a táplálás egyenfeszültségről történik,
- a szinuszos mező-kialakításról elektronikus kapcsolóhálózat gondoskodik (mezőorientált szabályozás – FOC – Field Oriented Control).

Megjegyzés: a mezőorientált szabályozás precíz megvalósítása speciális motor-kialakítást igényel, ezért a BLDC motorok körében megkülönböztetjük a PMS motorokat – precíziós alkalmazásokra gyártanak kifejezetten PMS motorokat.



Brushless DC (BLDC) Motor

BLDC motorok vezérlésére a legegyszerűbb (és igen gyakran alkalmazott) séma a **6-pontos vezérlés**.

A 6-pontos vezérlés lényege:

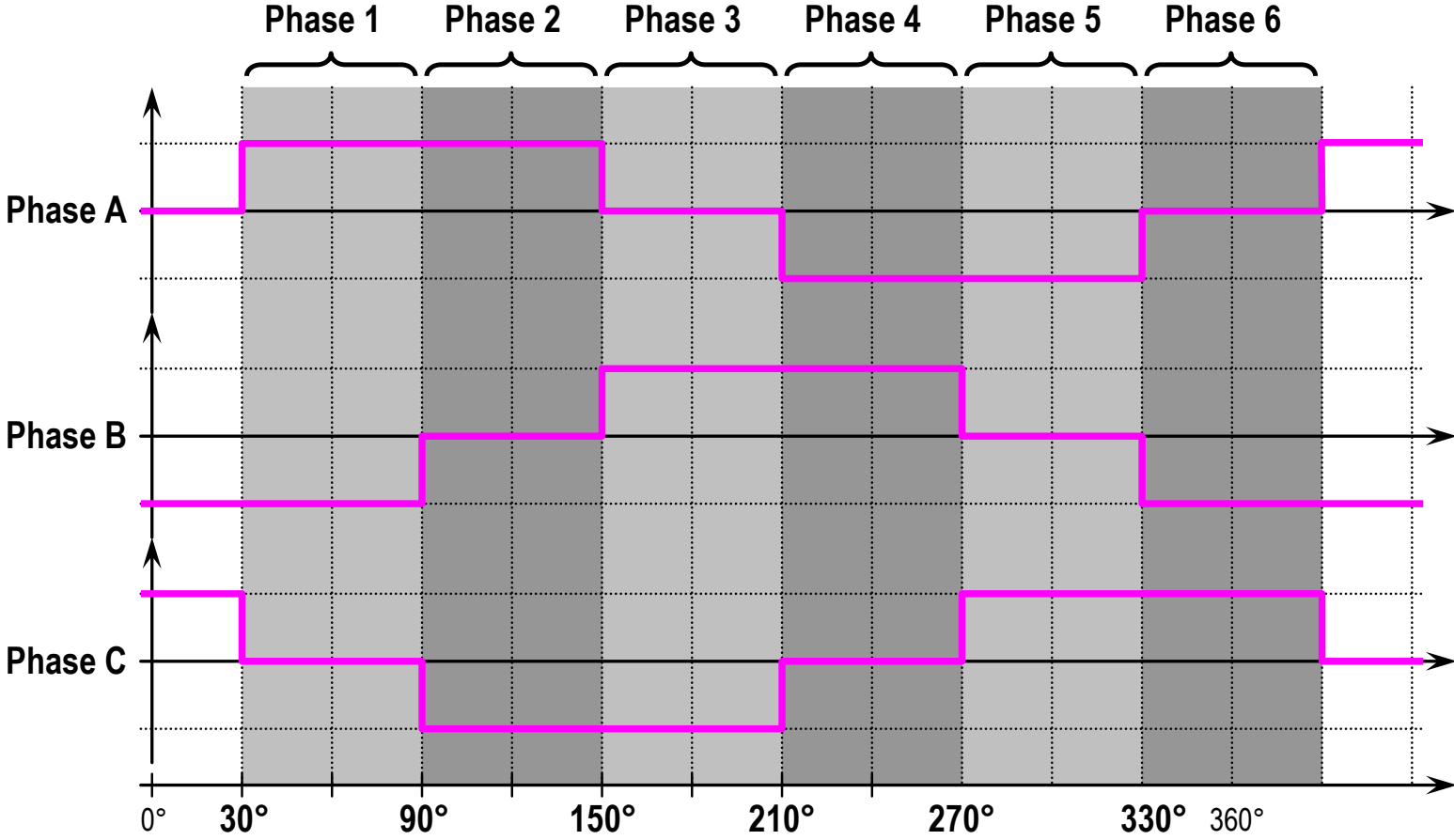
(csillagkapcsolásra vonatkoztatva)

- A motor forgórész egy teljes körbefordulása 6 fázisra osztható.
- Minden egyes fázishoz tartozik egy kapcsoló-kombináció, amelyben a három tekercs közül kettő – sorba kapcsolva) kap tápfeszültséget.
- A kapcsolási kombinációk révén 6 diszkrét irányba forduló forgó mágneses teret állítunk elő, amely az állandó mágneset tartalmazó forgórészt forgásba hozza.

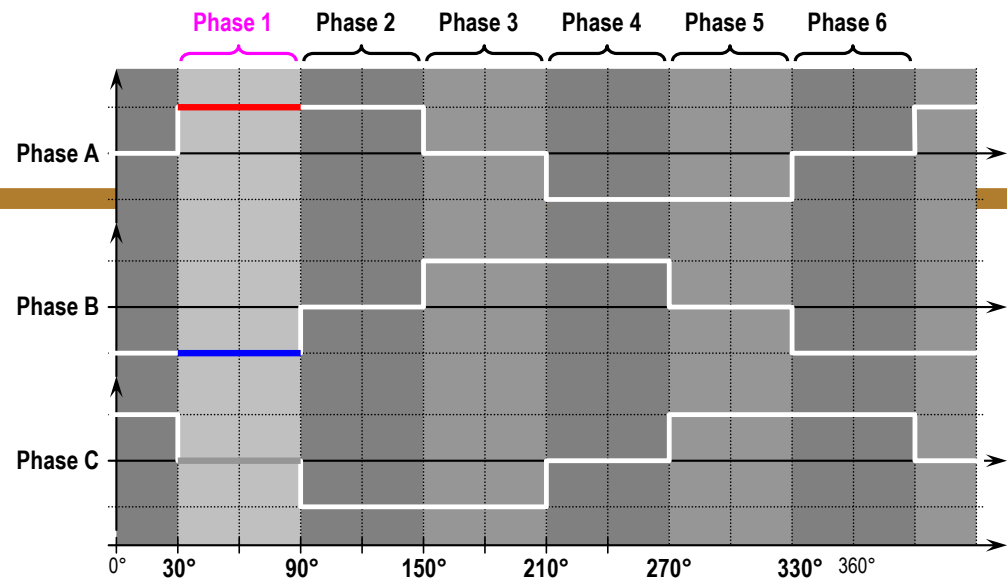
A következő ábrán a 6 vezérlési fázis látható, majd a következőkben a 6 fázis – a kezdeti ill. a végállapot 1-1 ábrán.



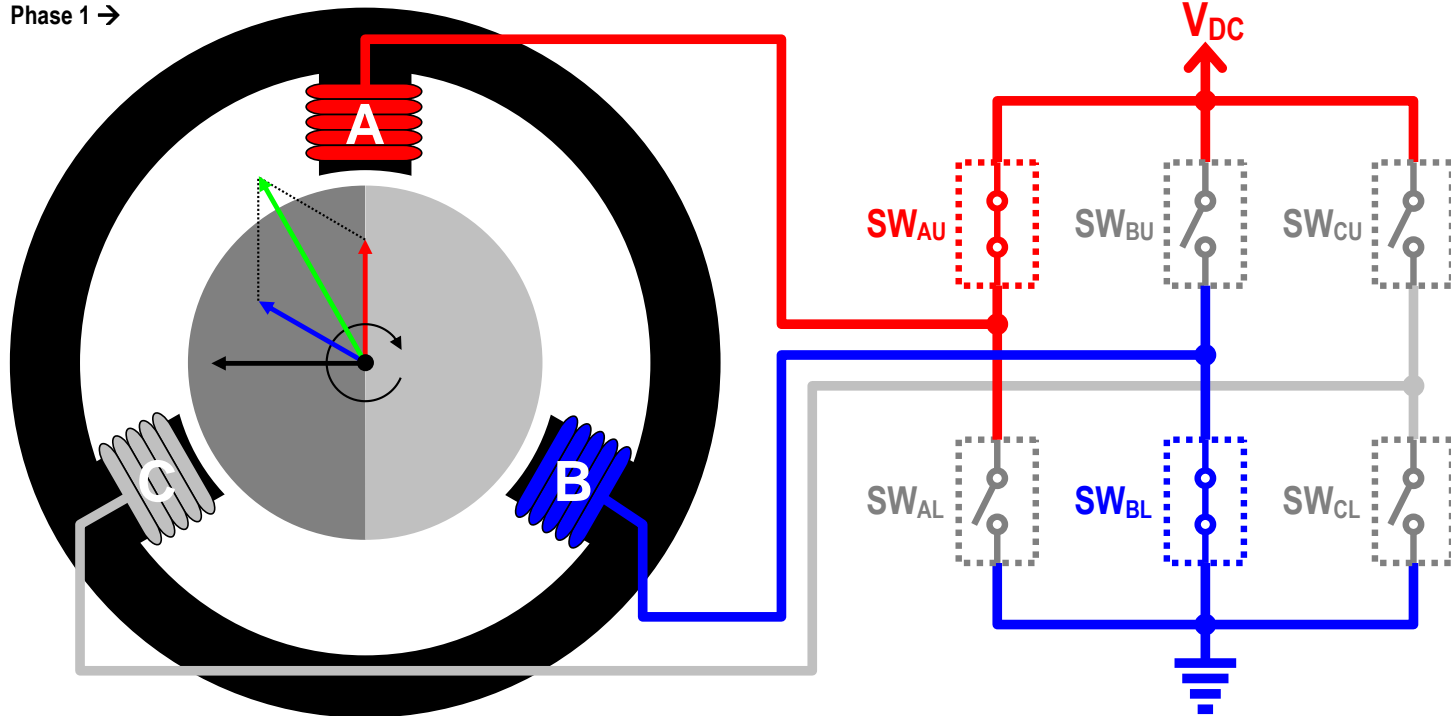
BLDC motor



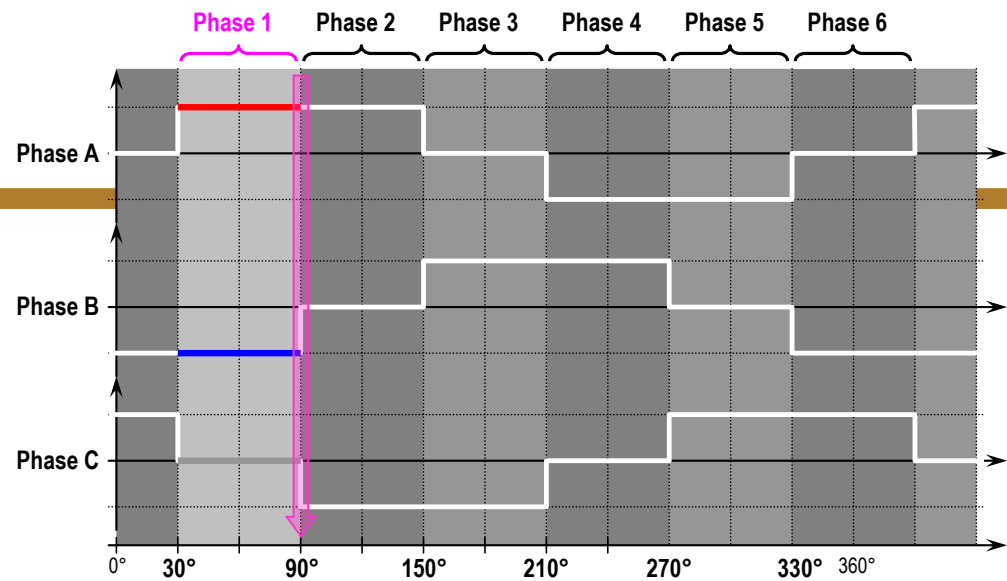
Phase 1 - start



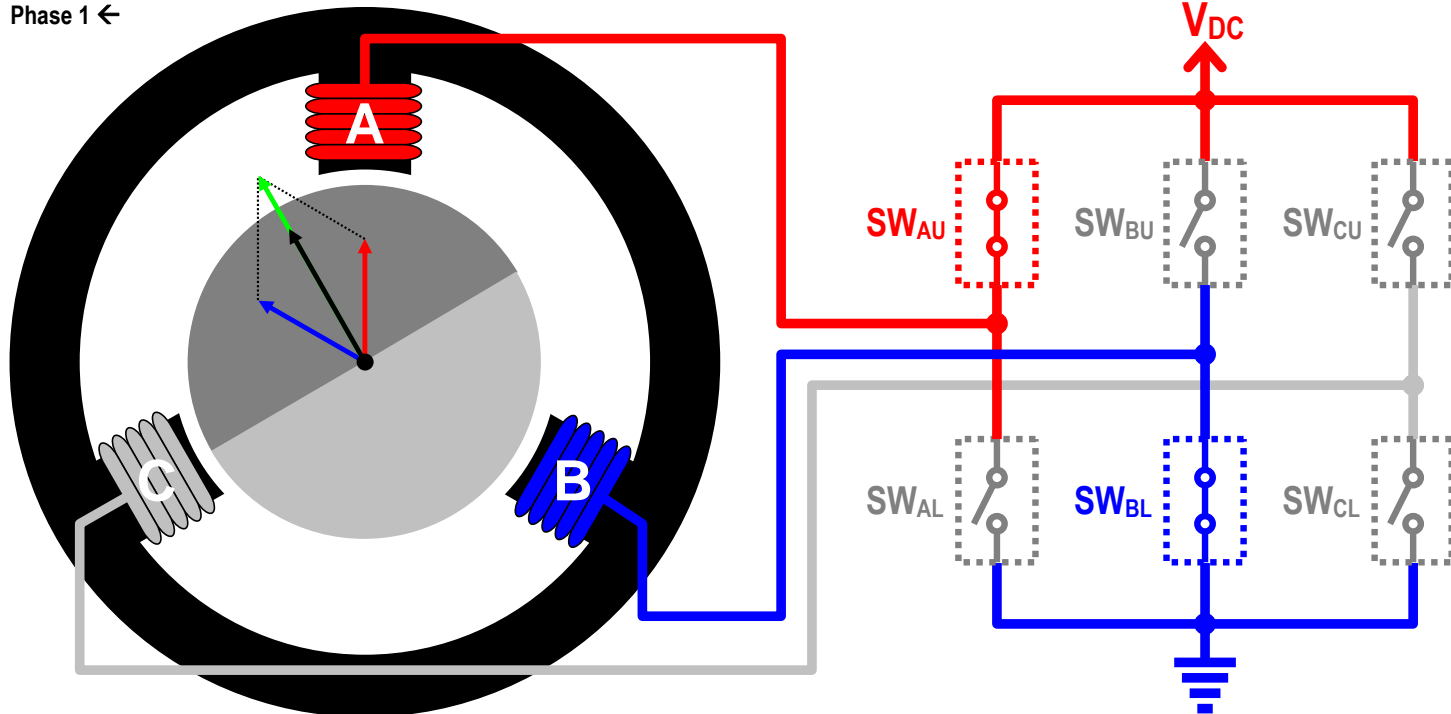
Phase 1 →



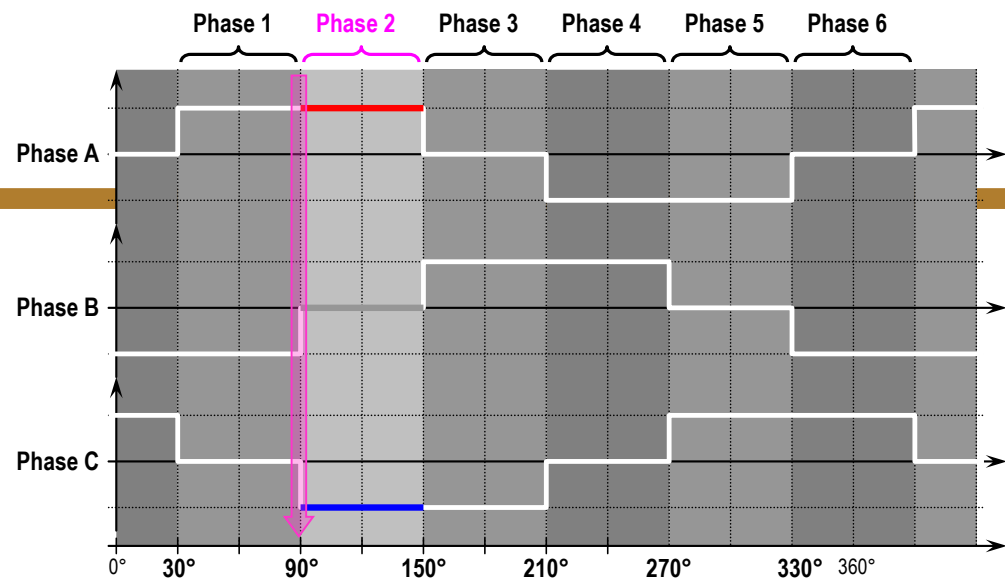
Phase 1 - end



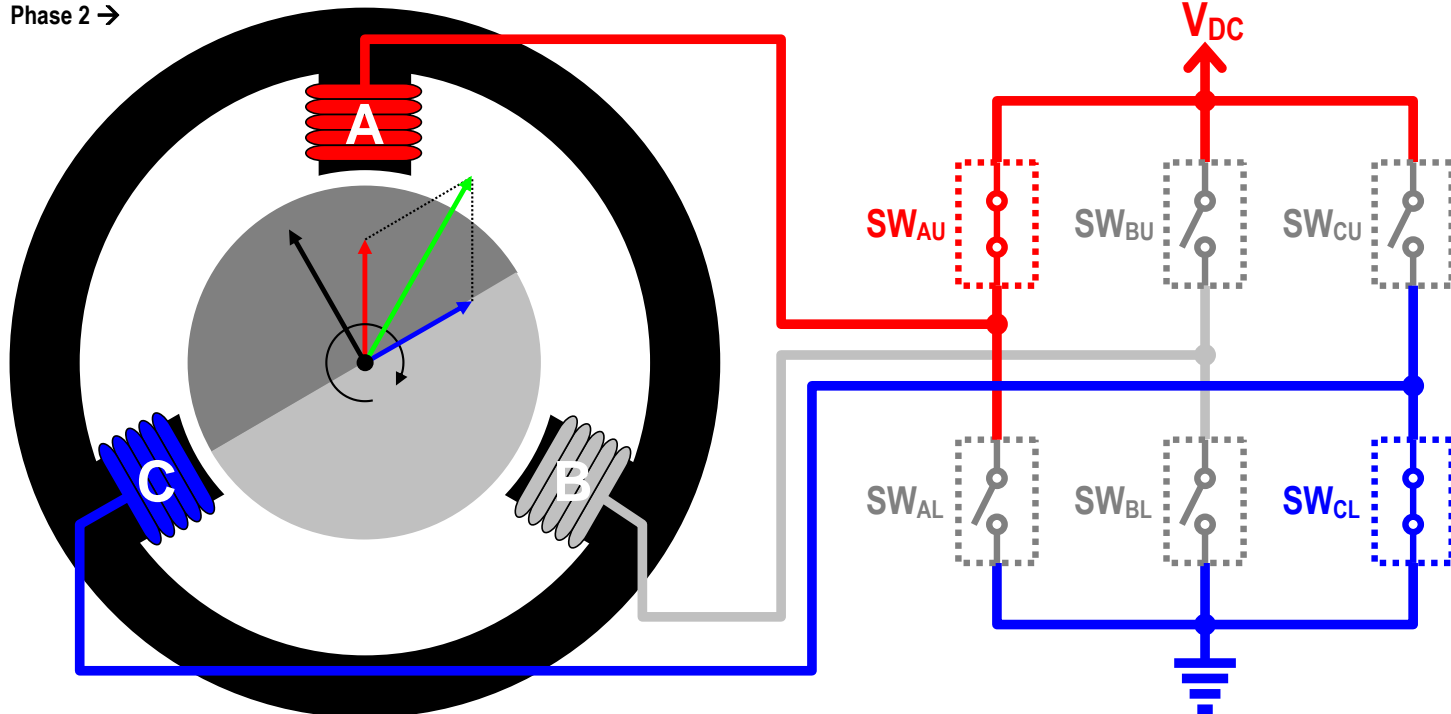
Phase 1 ←



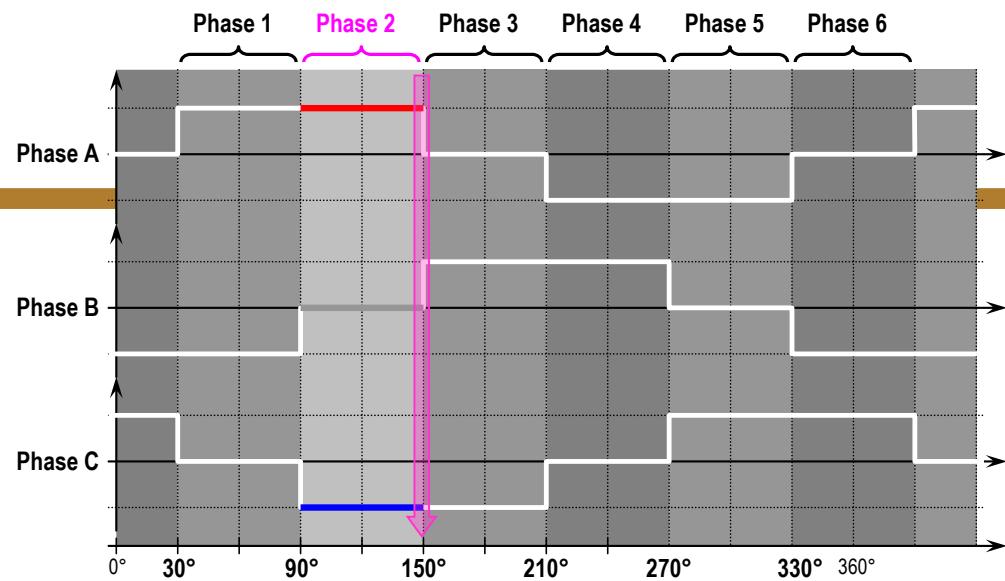
Phase 2 - start



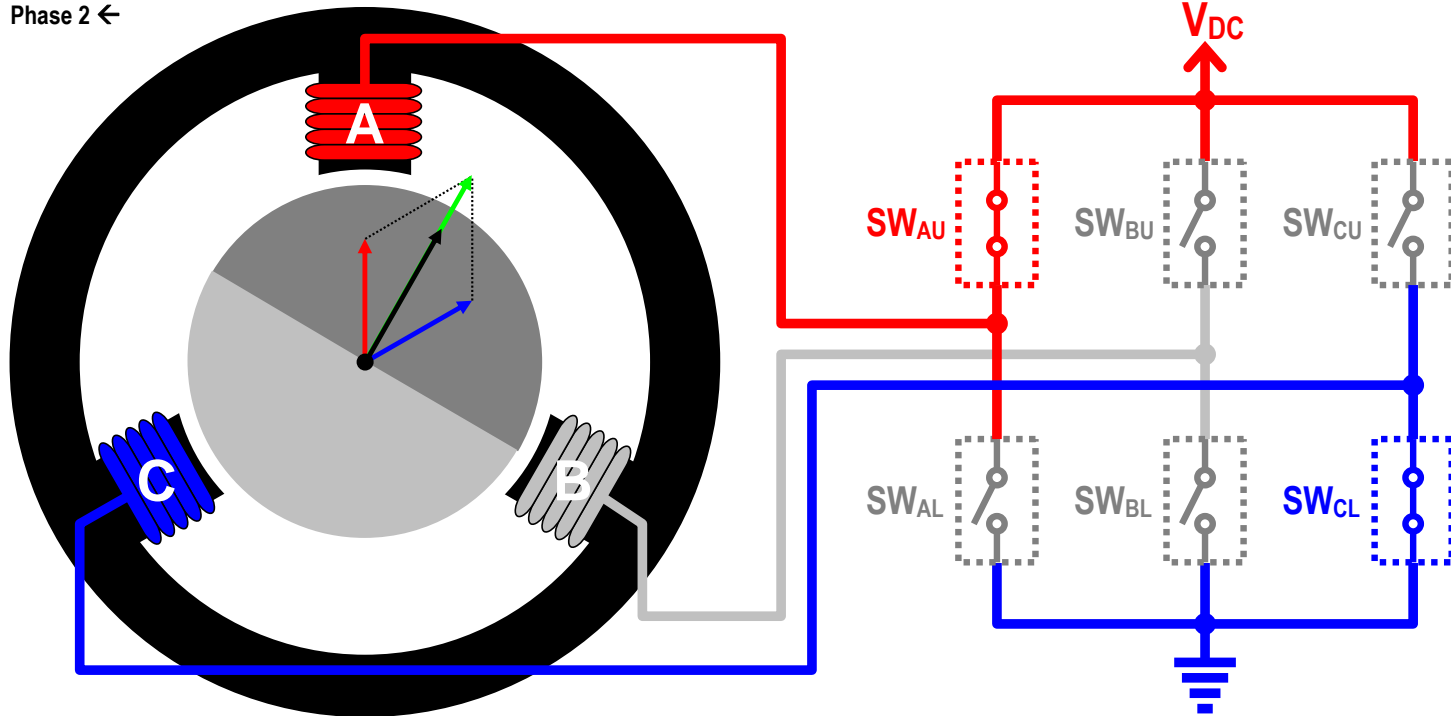
Phase 2 →



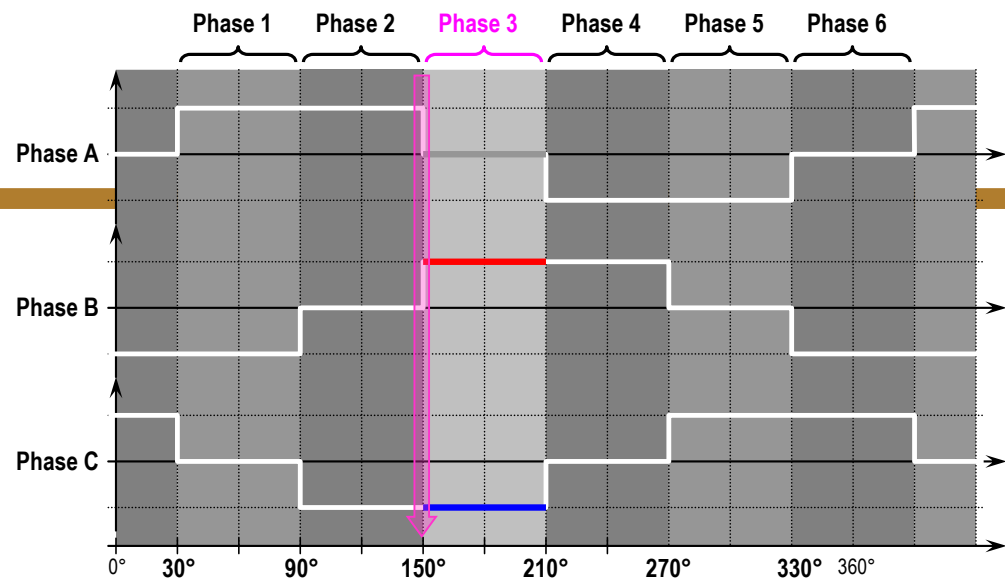
Phase 2 - end



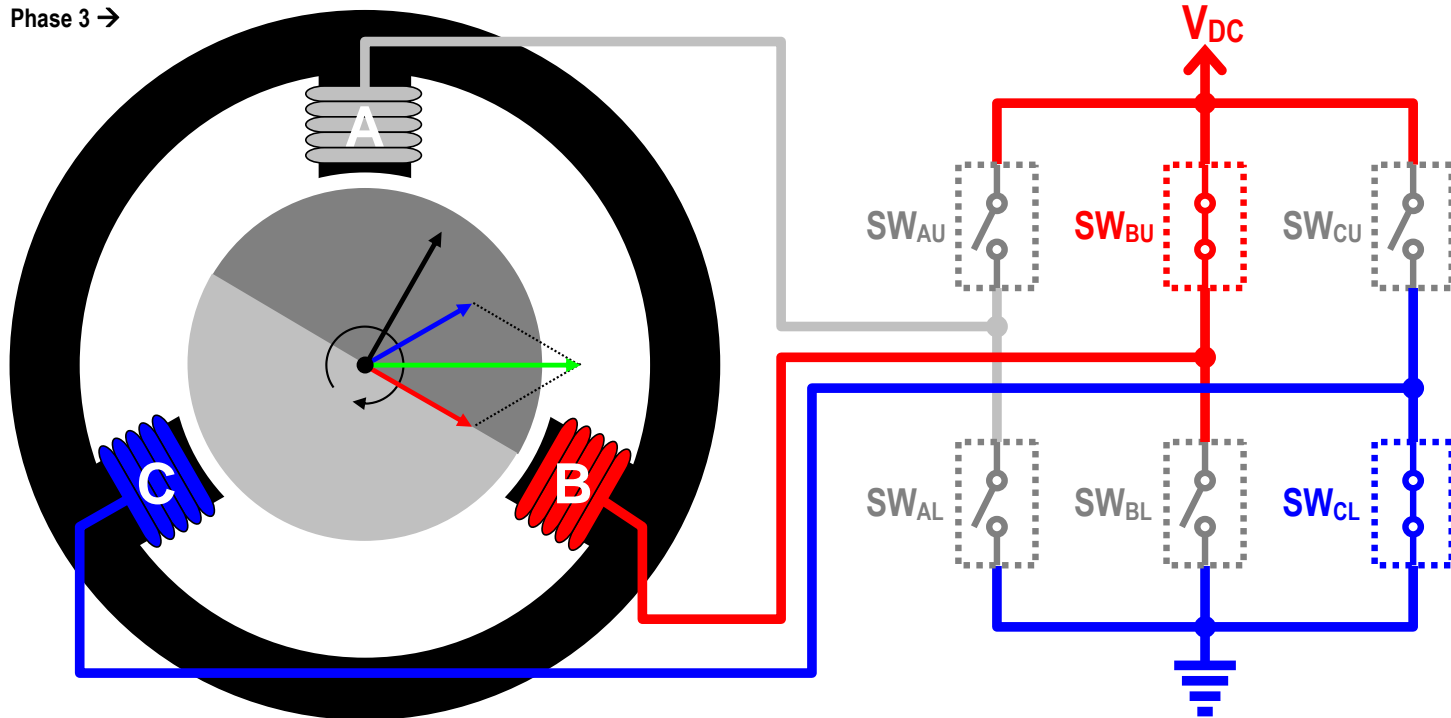
Phase 2 ←



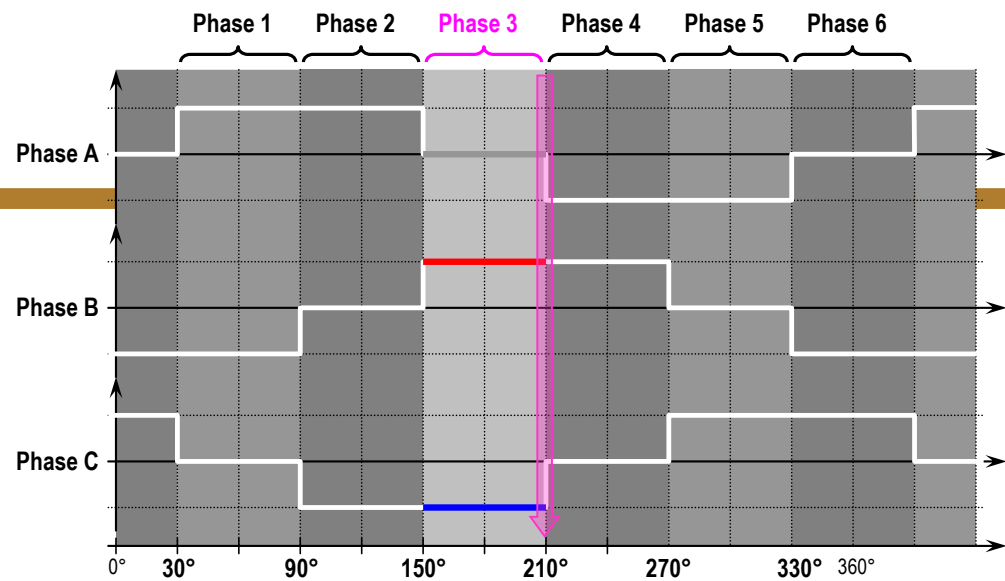
Phase 3 - start



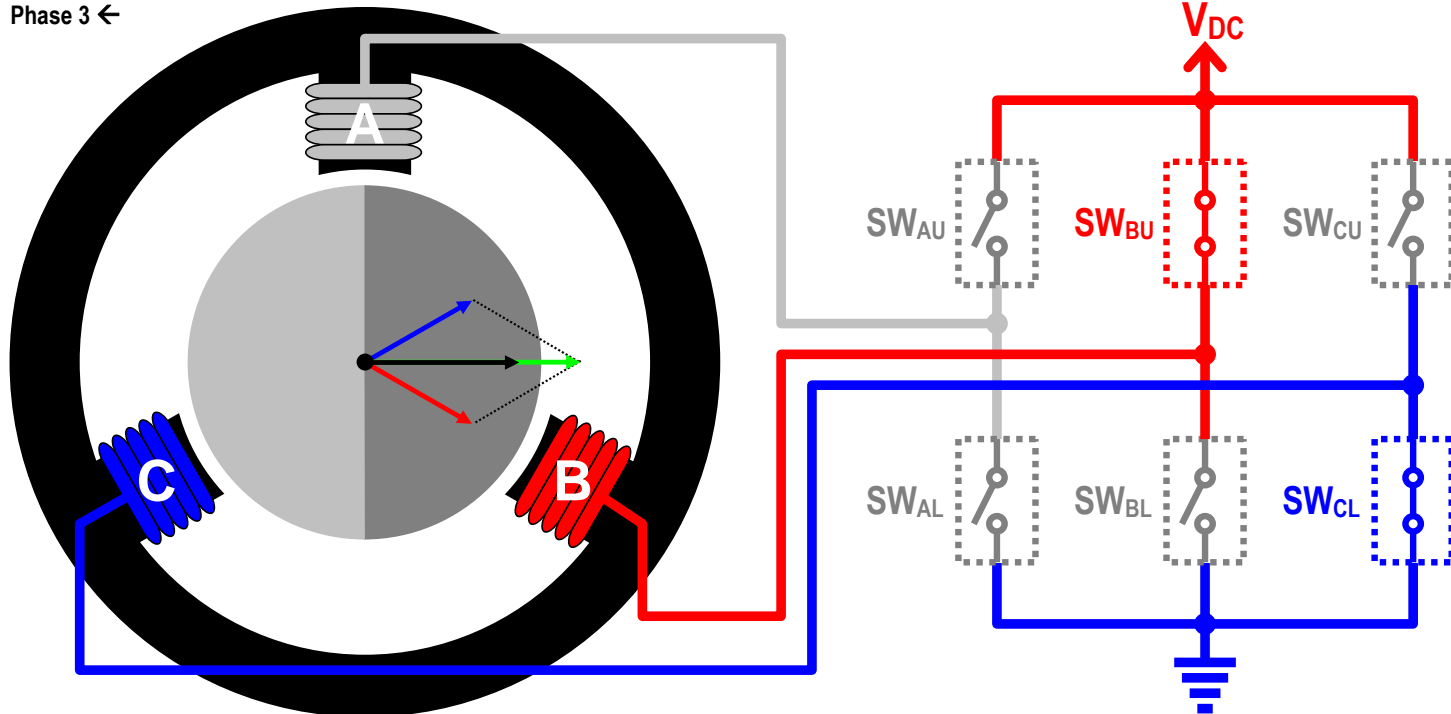
Phase 3 →



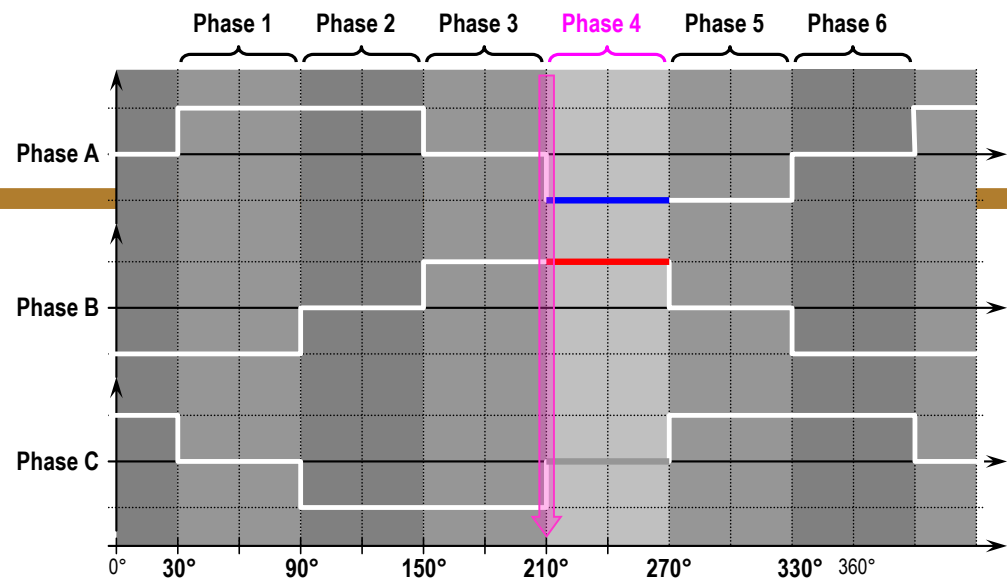
Phase 3 - end



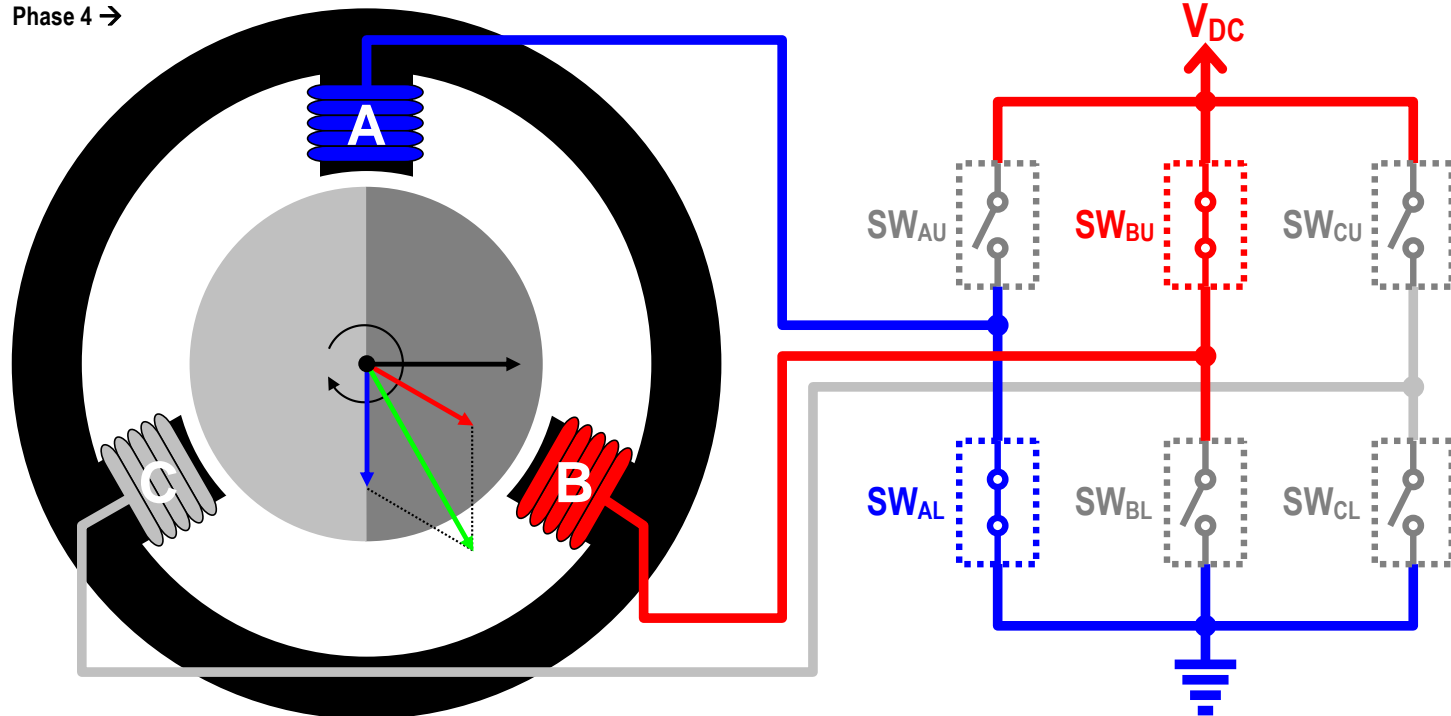
Phase 3 ←



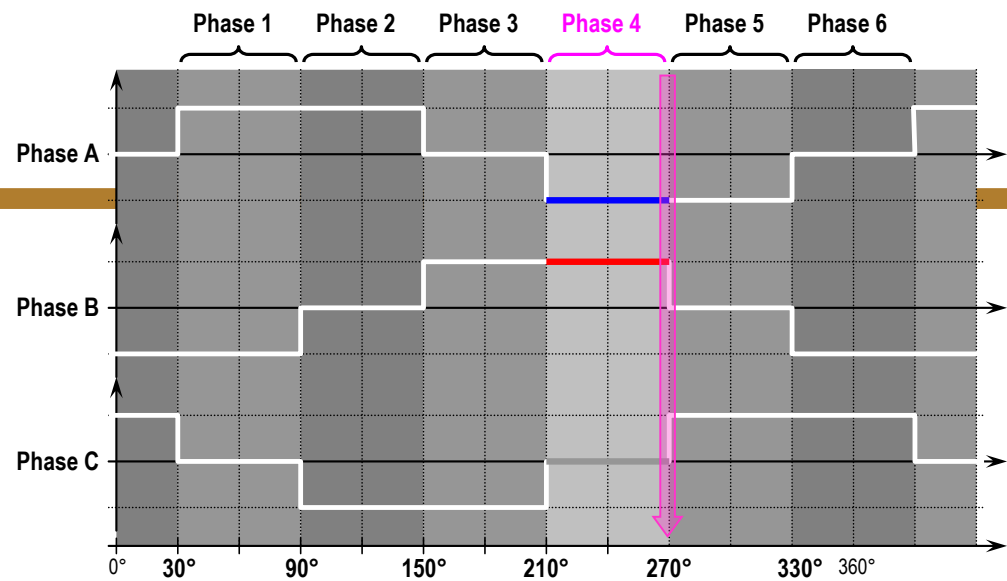
Phase 4 - start



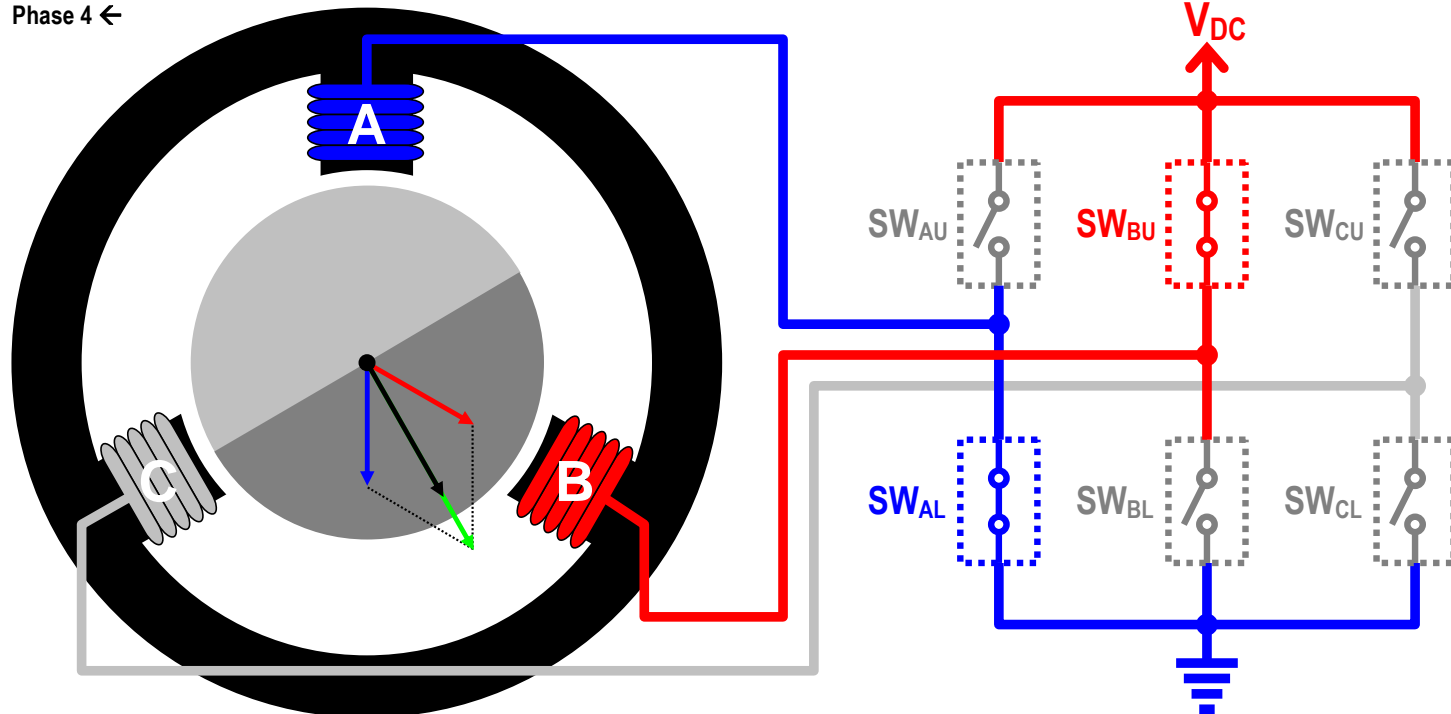
Phase 4 →



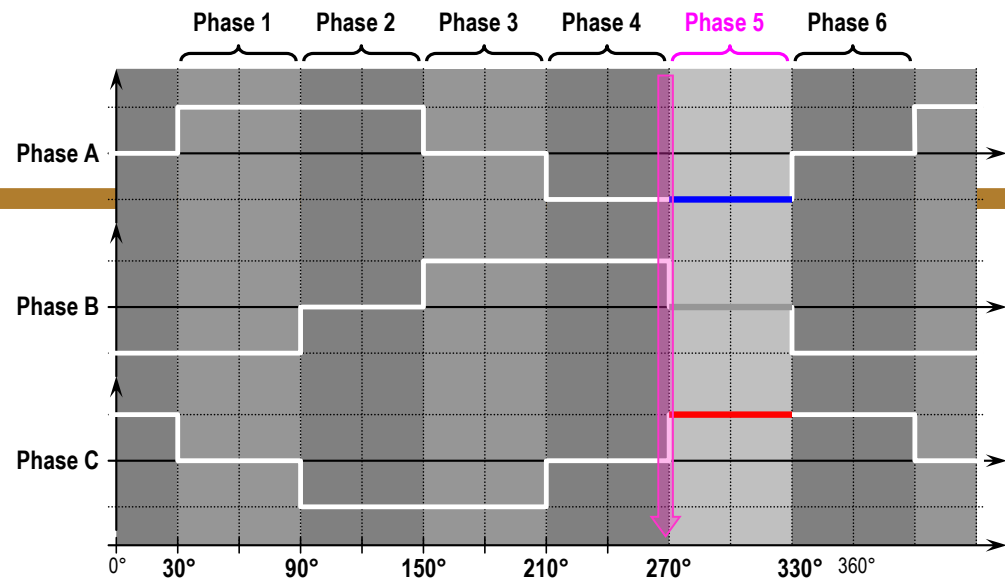
Phase 4 - end



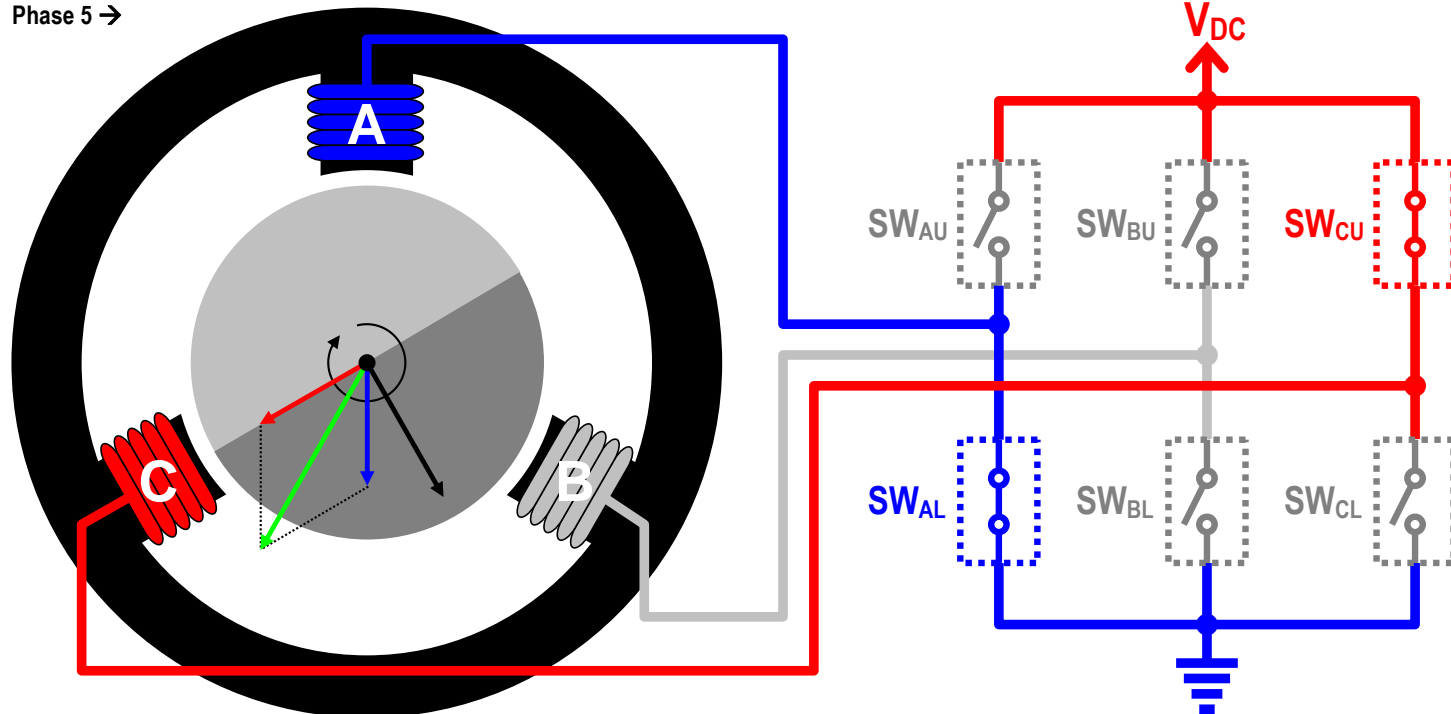
Phase 4 ←



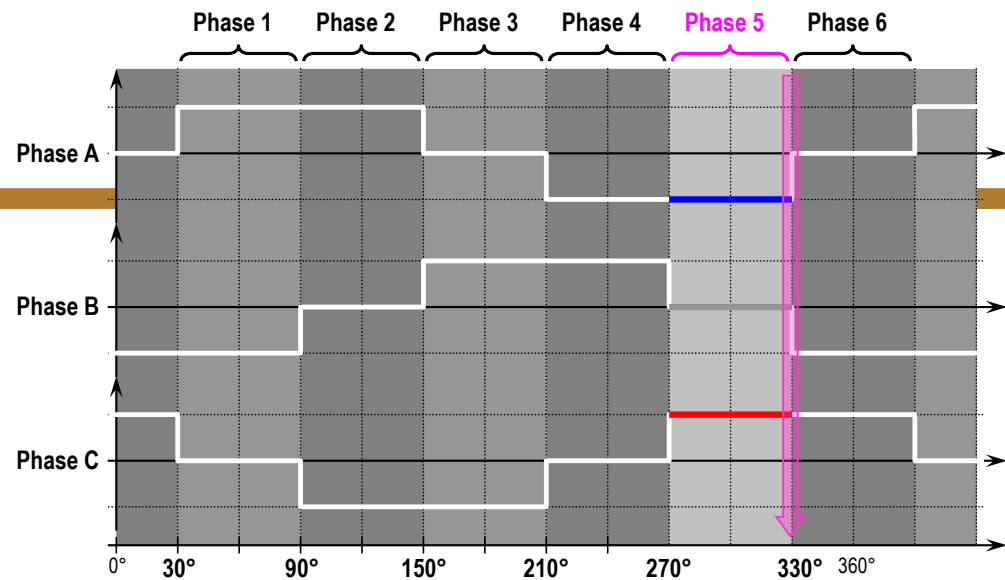
Phase 5 - start



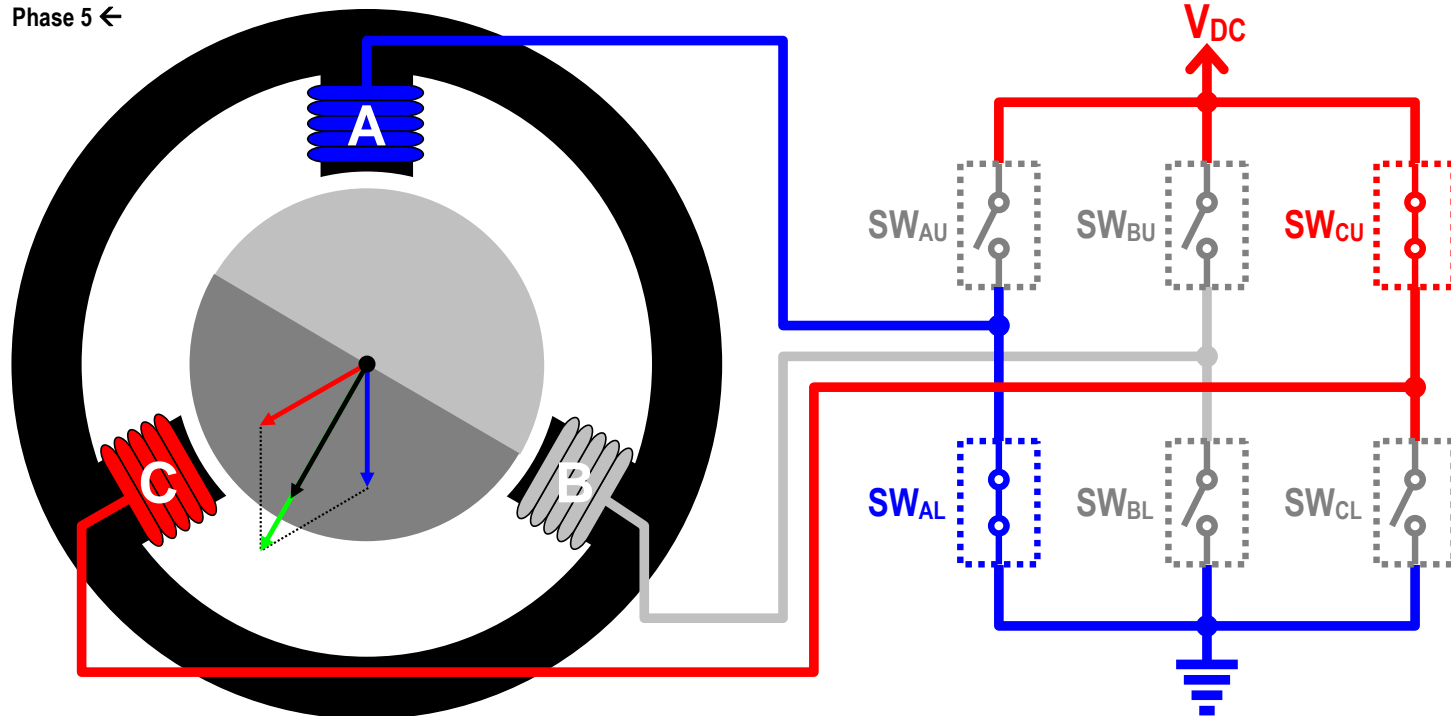
Phase 5 →



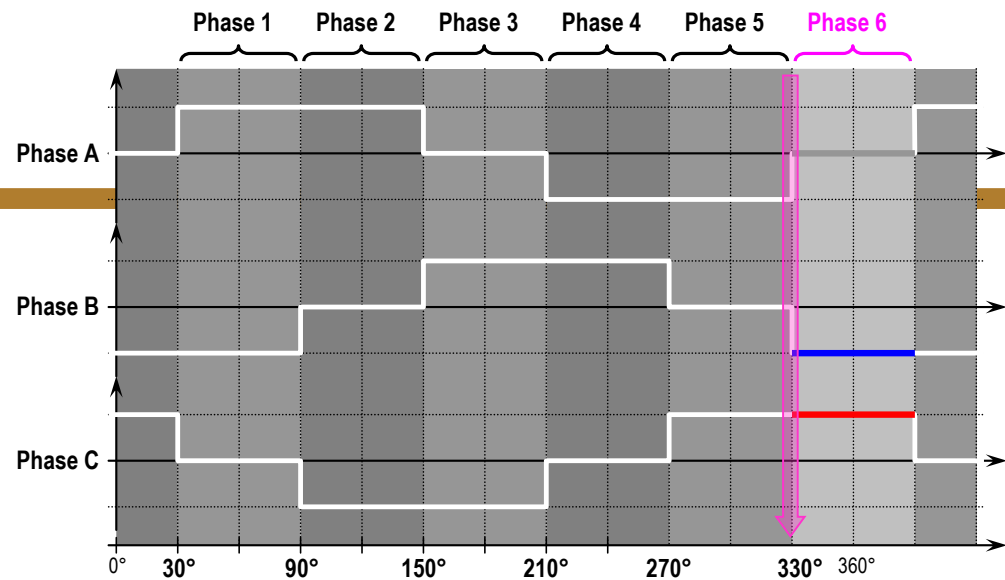
Phase 5 - end



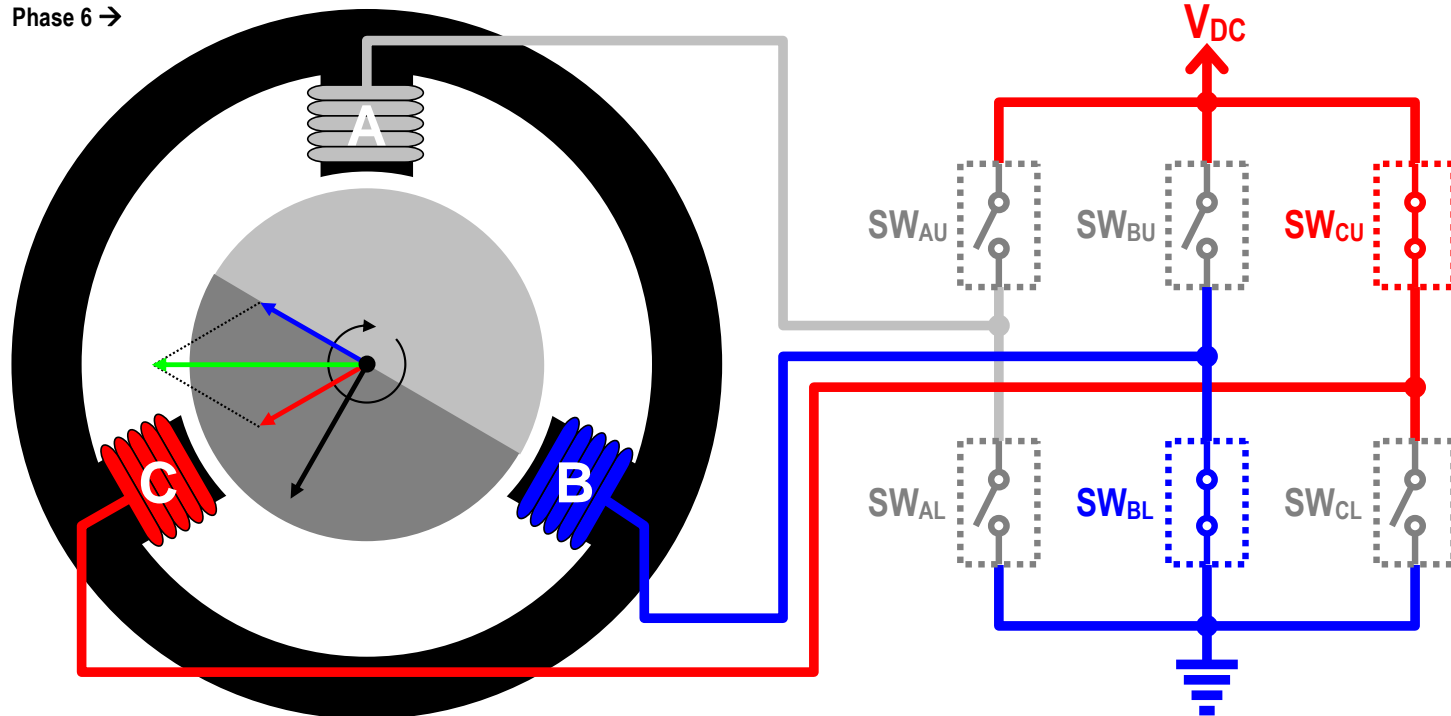
Phase 5 ←



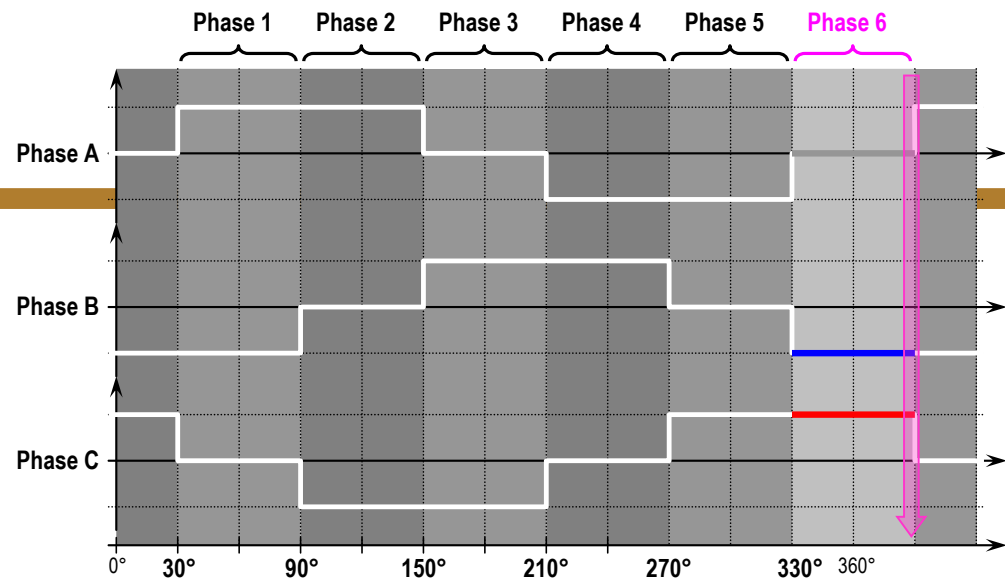
Phase 6 - start



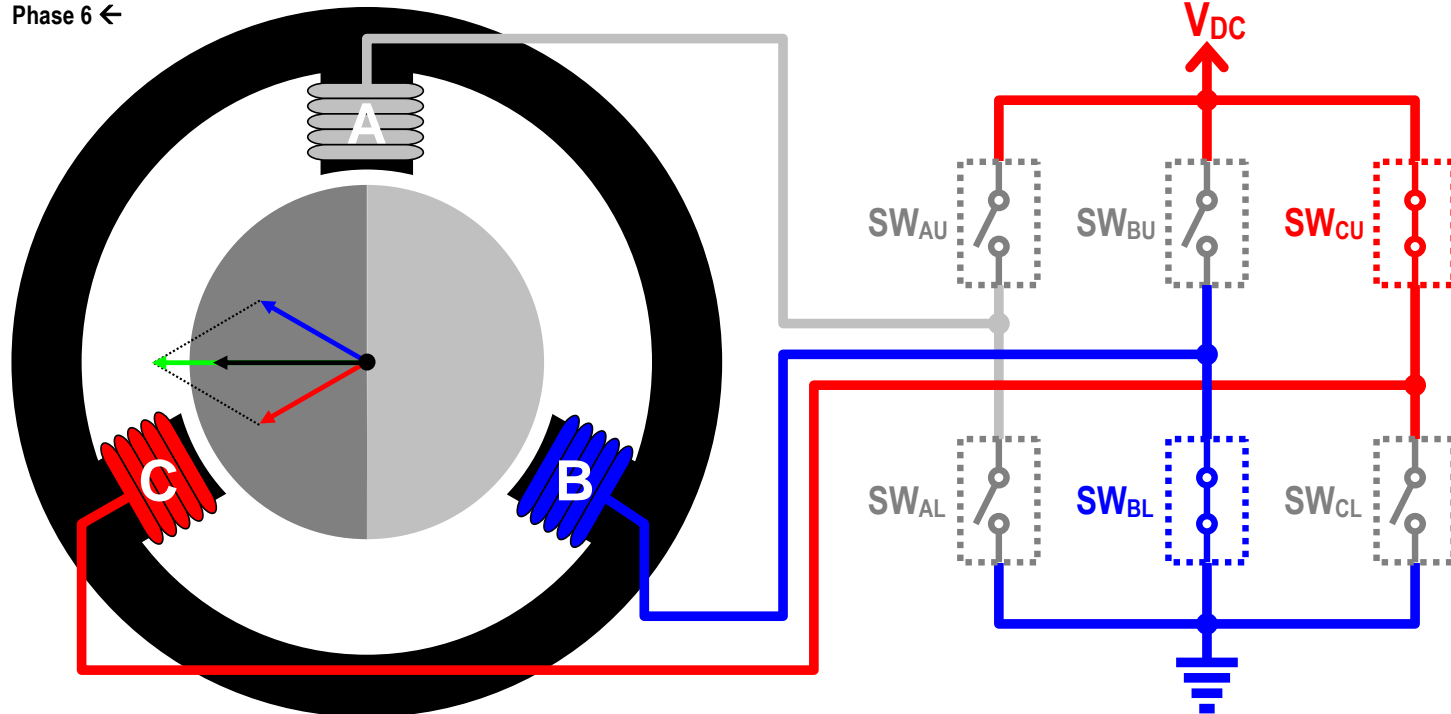
Phase 6 →



Phase 6 - end



Phase 6 ←



A BLDC motor vezérlése

Problémák a 6-pontos vezérléssel kapcsolatban:

Kommutáció: a kapcsolási állapotok közti váltás.

Mikor (hol) váltsunk a kapcsolási állapotok között?

Általában: kommutálás a forgórész meghatározott szöghelyzetében
→ szöghelyzet érzékelés (mérés, detektálás).

Követelmények:

- Folyamatos, egyenletes forgás.
- Maximális nyomaték biztosítása.
- Meghatározott fordulatszám biztosítása.
- Meghatározott nyomaték biztosítása.

Ez utóbbi két követelmény felveti a proporcionális vezérlés igényét:

- Ne csak a tápfeszültség be-kikapcsolása történjen, hanem ez a teljesítményigénnyel arányosan valósuljon meg –
impulzusszélesség moduláció (PWM) alkalmazása.



BLDC motor típusok

Szöghelyzet detektálás szemszögéből:

Szenzoros BLDC vezérlés

- Mágneses (Hall) érzékelők – kapcsolók – elhelyezése az állórész meghatározott pozícióiban: a forgórész mágneses tere kapcsolja be-ki őket,
- vagy
- Abszolút szöghelyzet mérés mágneses vagy optikai elven – rugalmasabb megoldás: programozható kommutáció.

Szenzor nélküli BLDC vezérlés

- Indukált feszültség (EMF) mérése, nullátmenet detektálás
 - Szinuszos karakterisztika
 - Négyszög karakterisztika
 - Trapéz karakterisztika



A kialakítás függvénye:

- Vasanyag alakja, légrések.
- Vasanyag mágneses tulajdonságai
- Tekercselés alakja, eloszlása

A PMS motor szinuszos karakterisztikájú.



BLDC motor típusok

Az elektromechanikai kialakítás szempontjából:

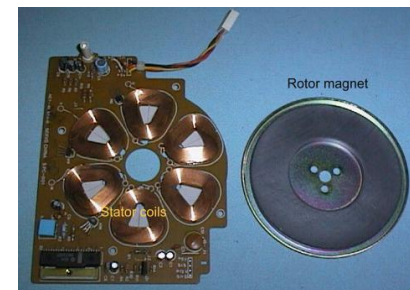
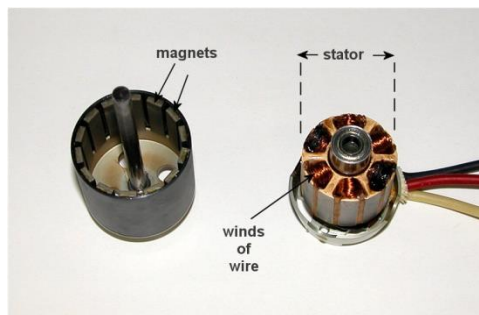
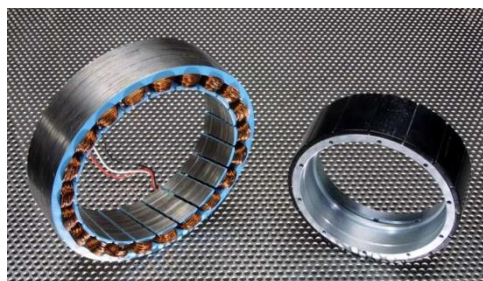
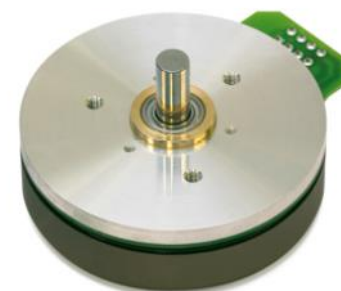
Belső forgórészes



Külső forgórészes



Tárcsamotorok



BLDC motor típusok

Pólus-szám (póluspárok száma) szerint:

2 - 4 - 6 - 8 - ... pólusú motorok -

- A 360°-os teljes fordulatot a póluspárok száma szerint osztják több szegmensre
- Egy szegmensen belül a motor úgy viselkedik, mintha egy teljes fordulatot tenne meg.

Villamos fordulat = Mechanikai fordulat / Póluspárok száma

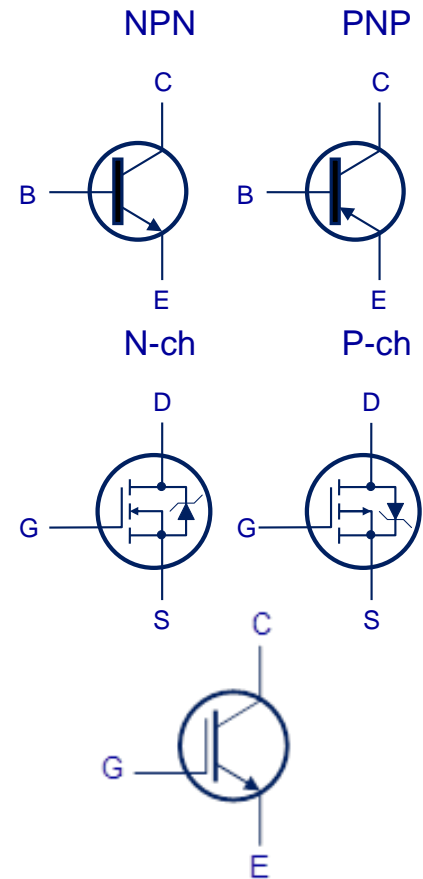
$$\varphi_{el} = \frac{\varphi_{mech}}{p}$$



BLDC motor meghajtás

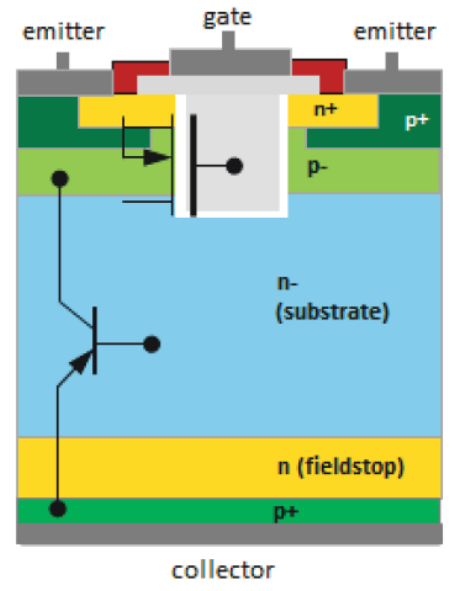
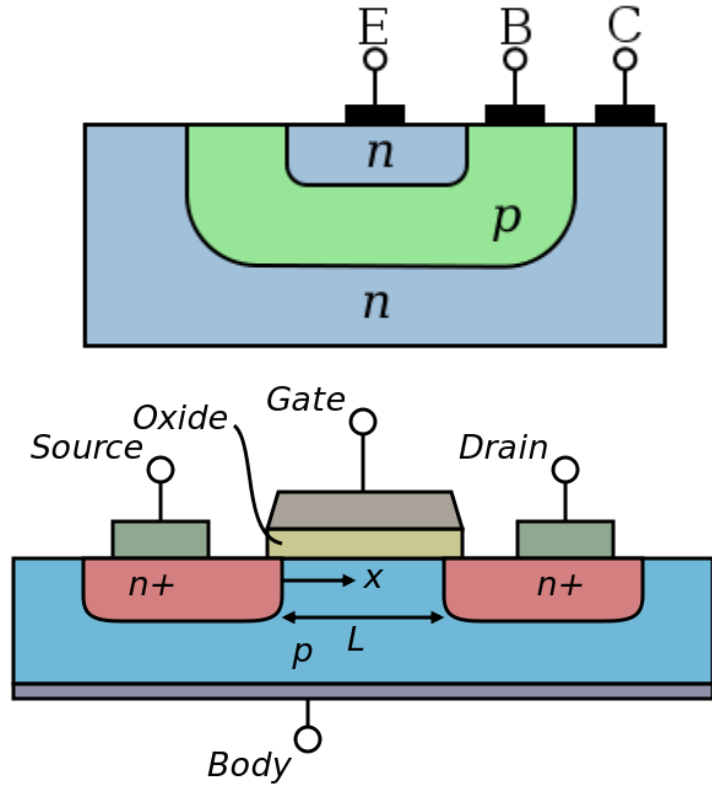
A kapcsolóhálózat - 3-fázisú H-híd - megvalósítása:

- Tranzisztor
- MOS-FET (Metal-Oxid-Semiconductor Field Effect Transistor)
- IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor)



BLDC motor meghajtás

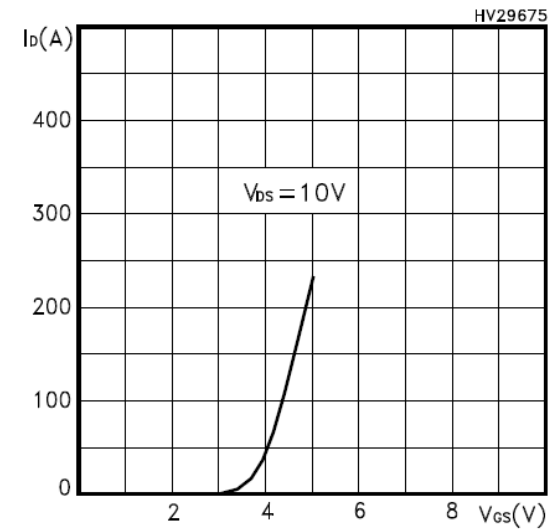
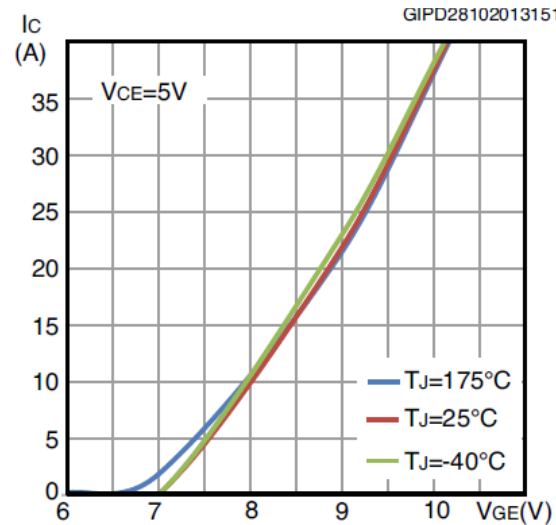
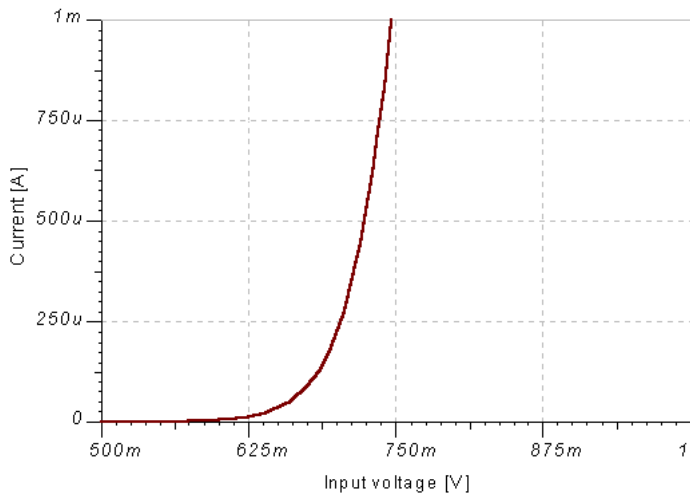
- Tranzisztor
- MOS-FET
- IGBT



BLDC motor meghajtás

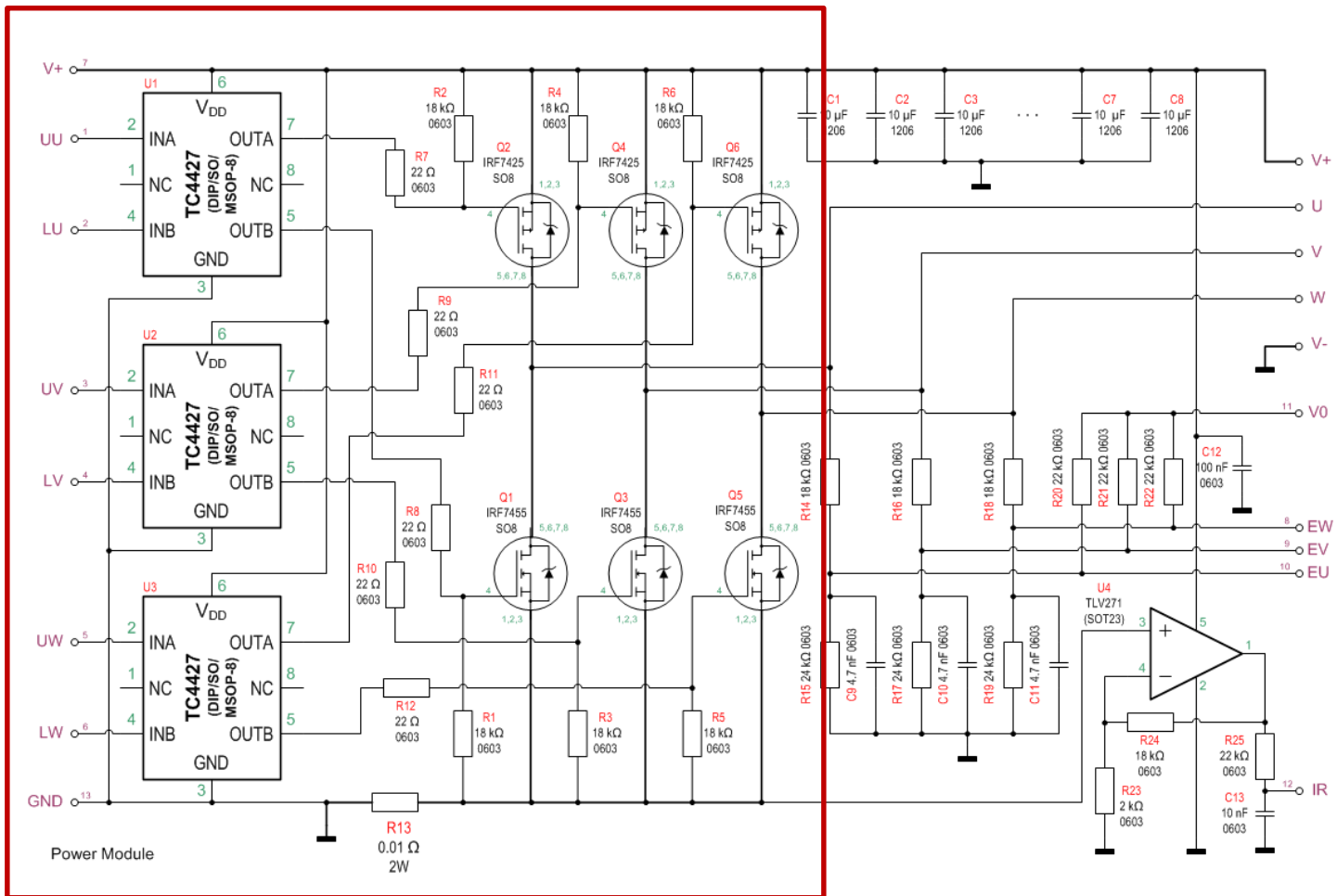
Transzfer karakterisztika: kétállapotú kapcsoló

- Vezető állapot: kis R
- Nem-vezető állapot: nagyon nagy R
- Tranzisztor
- MOS-FET
- IGBT



BLDC motor meghajtás

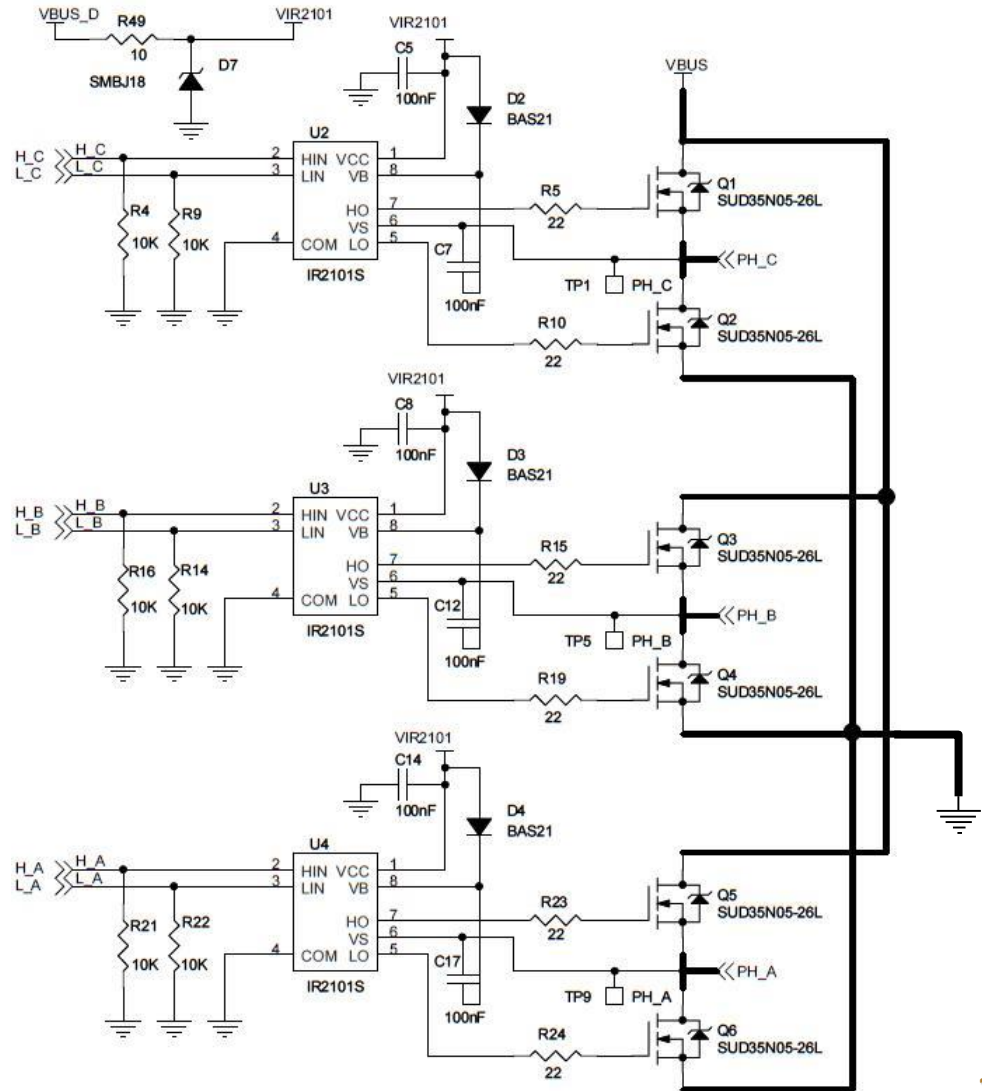
Példa: MOSFET alapú 3-fázisú H-híd N-P csatornás MOSFET kapcsolókkal



BLDC motor meghajtás

Példa:

MOSFET alapú 3-fázisú
H-híd N csatornás
MOSFET kapcsolókkal



BLDC motor meghajtás

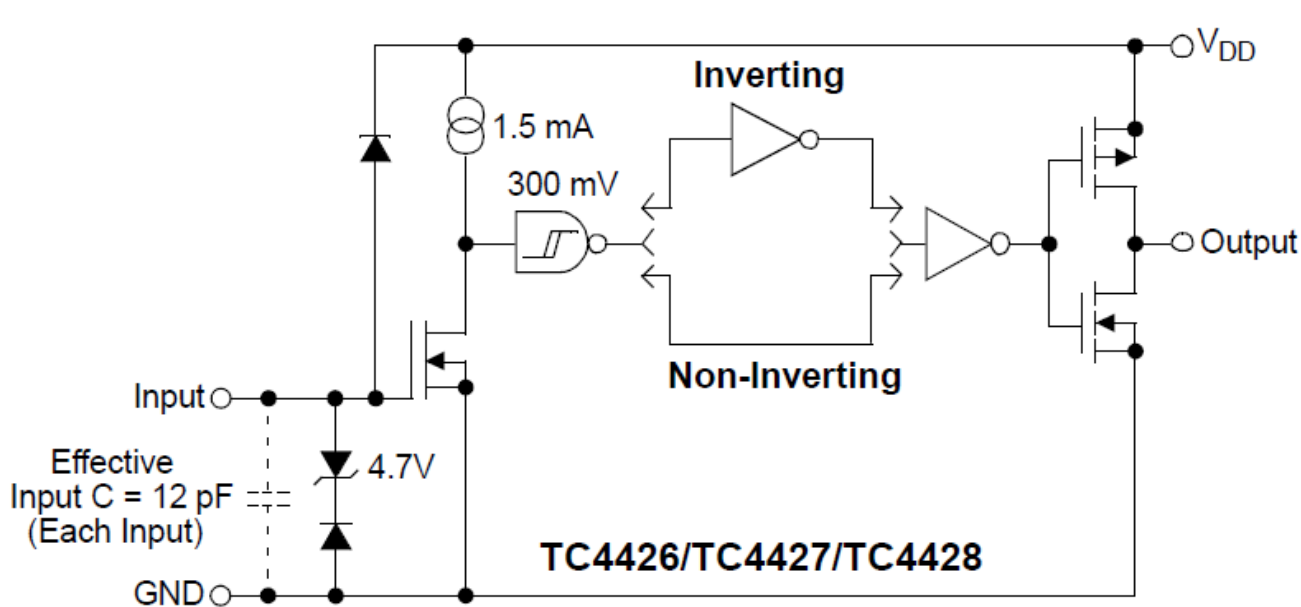
MOSFET alapú 3-fázisú H-híd:

- Földoldalon N, tápoldalon P csatornás MOSFET:
 - Kisfeszültségű alkalmazásokban
 - Egyszerű „földoldali” MOS meghajtók
 - Hátrány: a P-csatornás MOS-FET-ek általában rosszabb paraméterekkel rendelkeznek (bemeneti kapacitás, sebesség, nyitóirányú ellenállás)
- Föld- és tápoldalon N csatornás MOSFET:
 - Akár nagy feszültségek (pl. 600 V) alkalmazása
 - Speciális „tápoldali” MOS meghajtókat igényel
 - Alsó/felső kapcsolók azonos paraméterekkel rendelkeznek: szimmetria jobban biztosítható



BLDC motor meghajtás

Földoldali MOS meghajtó: példa Microchip TC4426-7-8



Features

- High Peak Output Current – 1.5A
- Wide Input Supply Voltage Operating Range:
 - 4.5V to 18V
- High Capacitive Load Drive Capability – 1000 pF in 25 ns (typ.)
- Short Delay Times – 40 ns (typ.)
- Matched Rise and Fall Times
- Low Supply Current:
 - With Logic '1' Input – 4 mA
 - With Logic '0' Input – 400 μ A
- Low Output Impedance – 7 Ω
- Latch-Up Protected: Will Withstand 0.5A Reverse Current
- Input Will Withstand Negative Inputs Up to 5V
- ESD Protected – 4 kV
- Pin-compatible with the TC426/TC427/TC428
- Space-saving 8-Pin MSOP and 8-Pin 6x5 DFN Packages

A földpotenciálhoz képest állítja elő a MOSFET Gate vezérléshez szükséges feszültségszinteket.

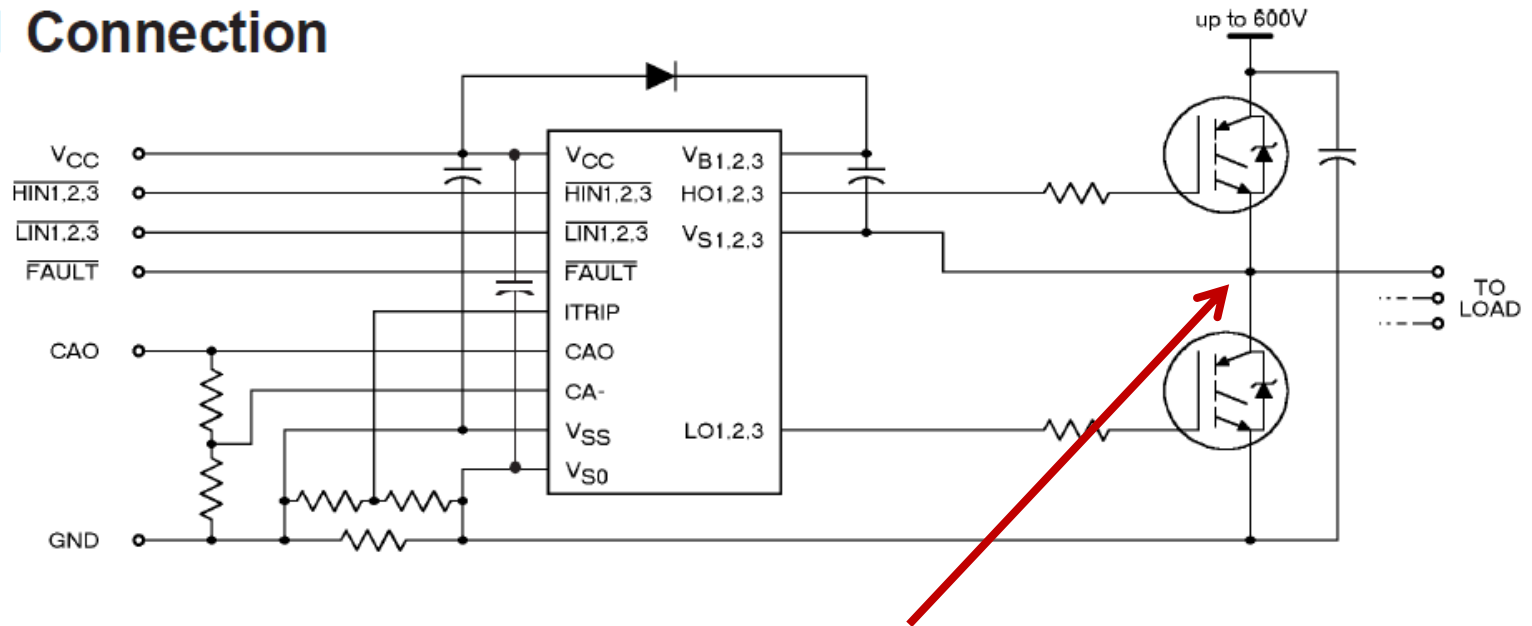


BLDC motor meghajtás

Föld- és tápoldali MOS meghajtó: példa IRF IR2130-2

Háromfázisú MOSFET / IGBT H-hídmeghajtó

Typical Connection



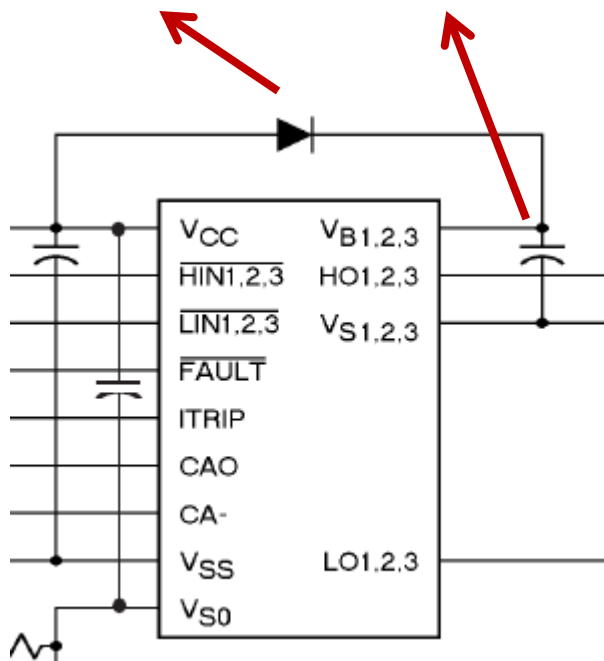
A tápoldali MOSFET/IGBT vezérlése a középső pont (motor csatlakozási pont) potenciáljához képest történik – megoldás: „boost” áramkör.



BLDC motor meghajtás

A boost-áramkör működése:

1 dióda, 1 kondenzátor



Ha V_S feszültség alacsony, V_B is elég alacsony lehet ahhoz, hogy a dióda kinyisson: a kondenzátor a diódán keresztül feltöltődik a $V_{CC}-V_S$ feszültségre.

V_S magas szintre kerülése viszi magával V_B szintet, a dióda lezár, a kondenzátor tartja a V_B -hez képest pozitív feszültséget.

V_B -t csak MOSFET G-je terheli, lassan változik.

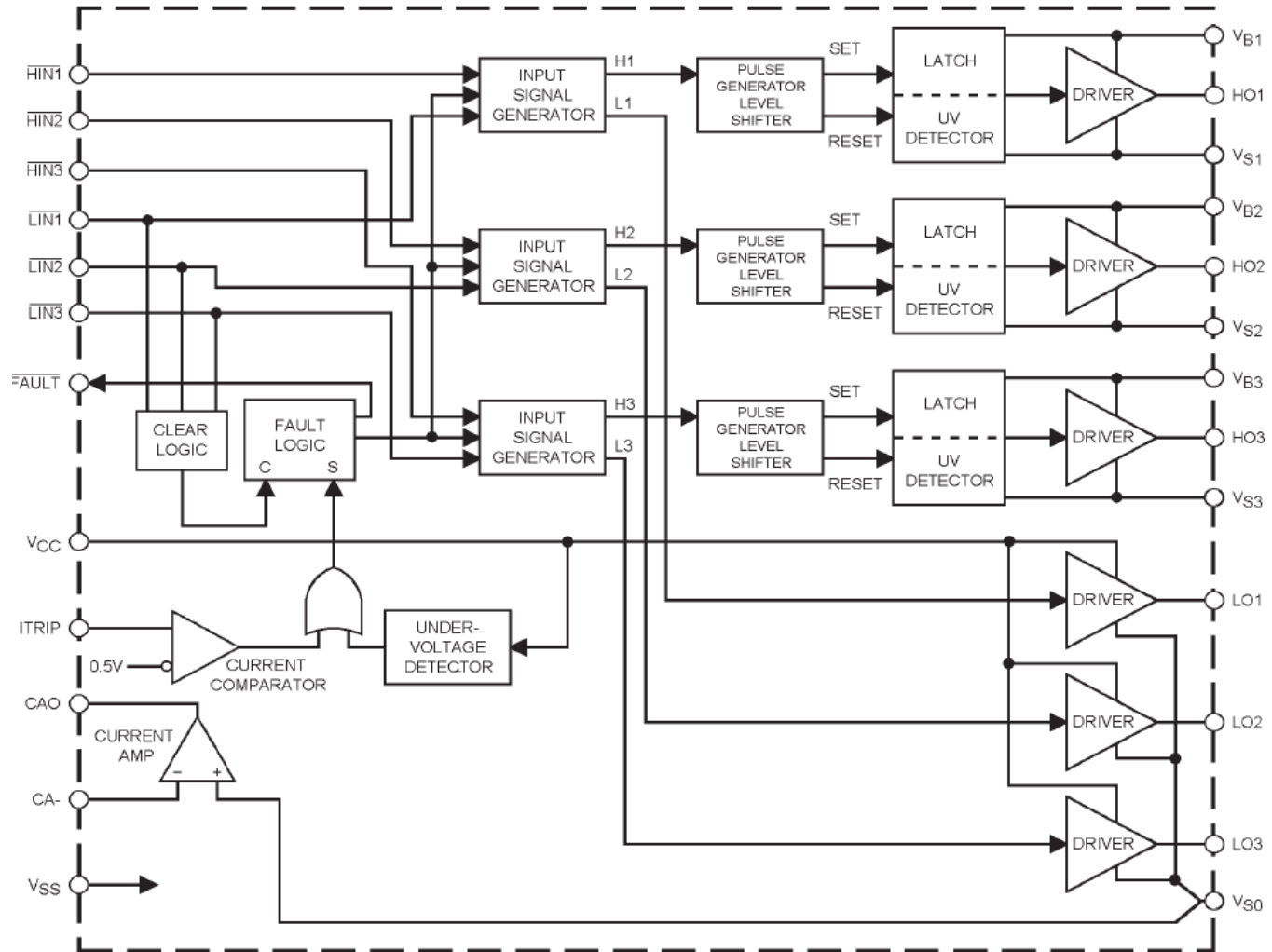
A működés feltétele: periodikus változás - ez a BLDC vezérlések esetén automatikusan adódik.



BLDC motor meghajtás

IRF2130/32
 3-fázisú
 MOSFET/IGBT
 H-híd meghajtó

1	VCC	VB1	28
2	HIN1	HO1	27
3	HIN2	VS1	26
4	HIN3		25
5	LIN1	VB2	24
6	LIN2	HO2	23
7	LIN3	VS2	22
8	FAULT	VB3	20
9	ITRIP	HO3	19
10	CA0	VS3	18
11	CA-		17
12	VSS	LO1	16
13	VS0	LO2	15
14	LO3		



BLDC motor vezérlés

A vezérlés összetevői:

- A kommutáció megvalósítása
- Teljesítmény-vezérlés: a kapocsfeszültség változtatása impulzusszélesség modulációval

A vezérlés feletti szinten megvalósítandó feladatok:

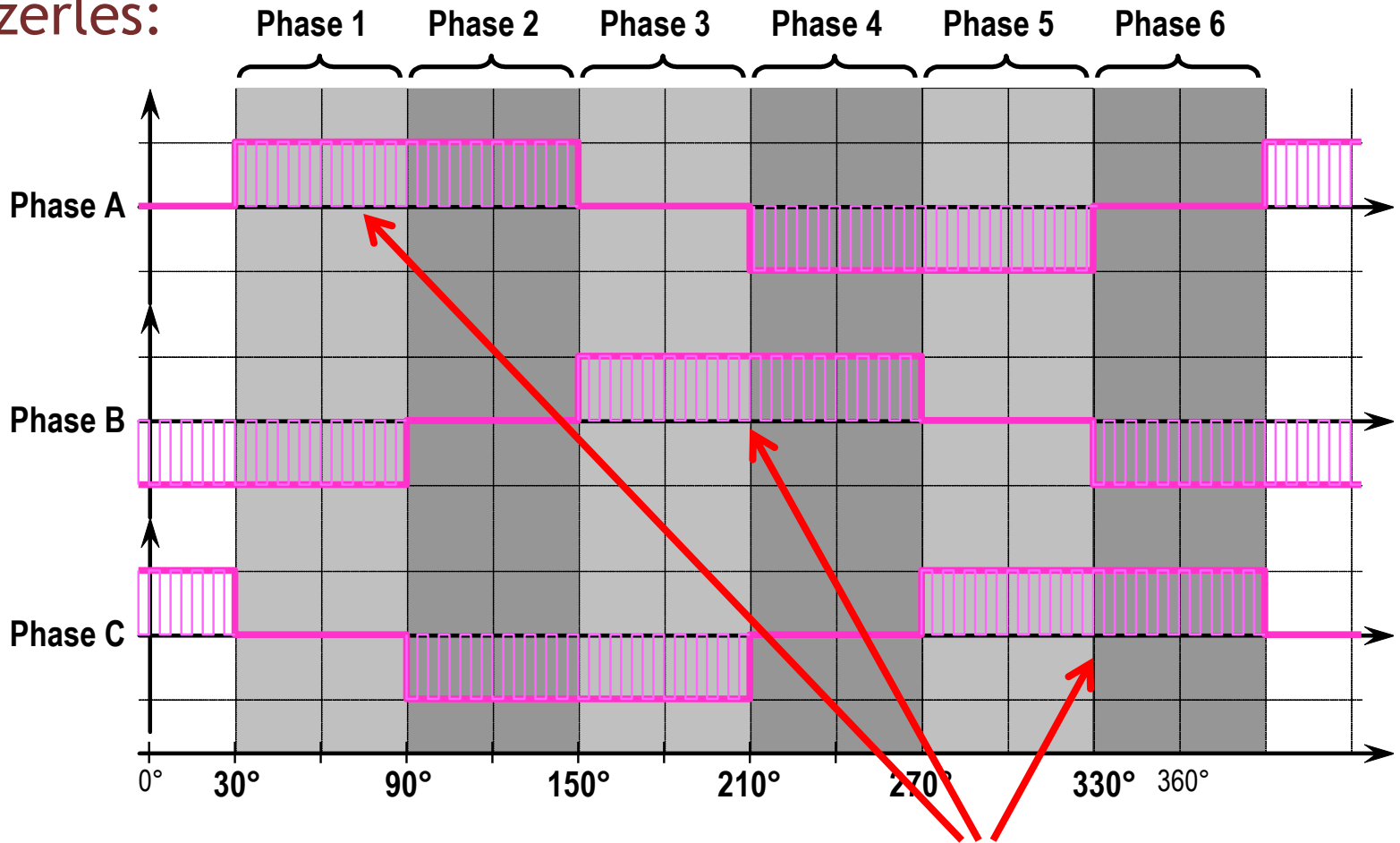
- Fordulatszám-szabályozás
- Nyomaték-szabályozás
- Pozíció- szabályozás

Megvalósítási módjuk: visszacsatolt szabályozás.



BLDC motor vezérlés

PWM vezérlés:



impulzusszélesség (kitöltési tényező) állítása révén

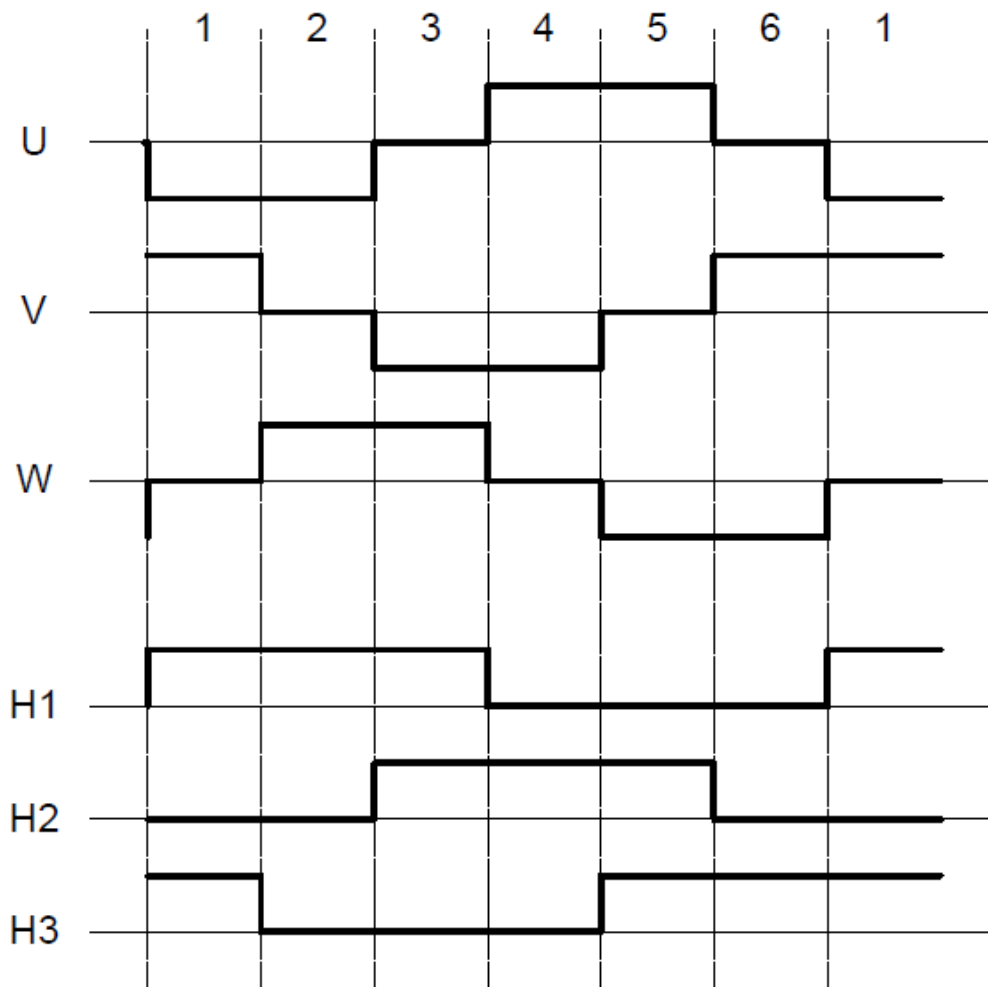


Szenzoros BLDC vezérlés

Hall-szenzorok

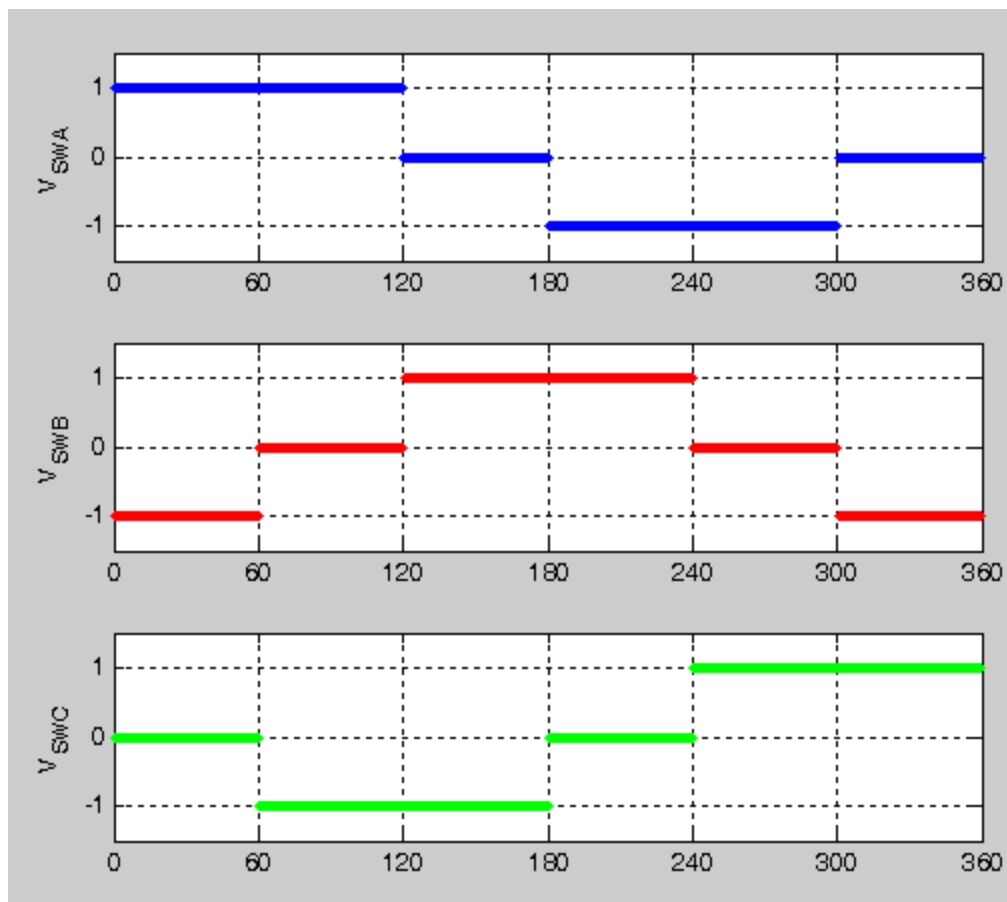
Kapcsoló
állapotok

Hall-szenzor
jelek: állapot-
átmenetek a
kommutálás
helyén



Szenzor nélküli BLDC vezérlés

Kapcsoló
állapotok

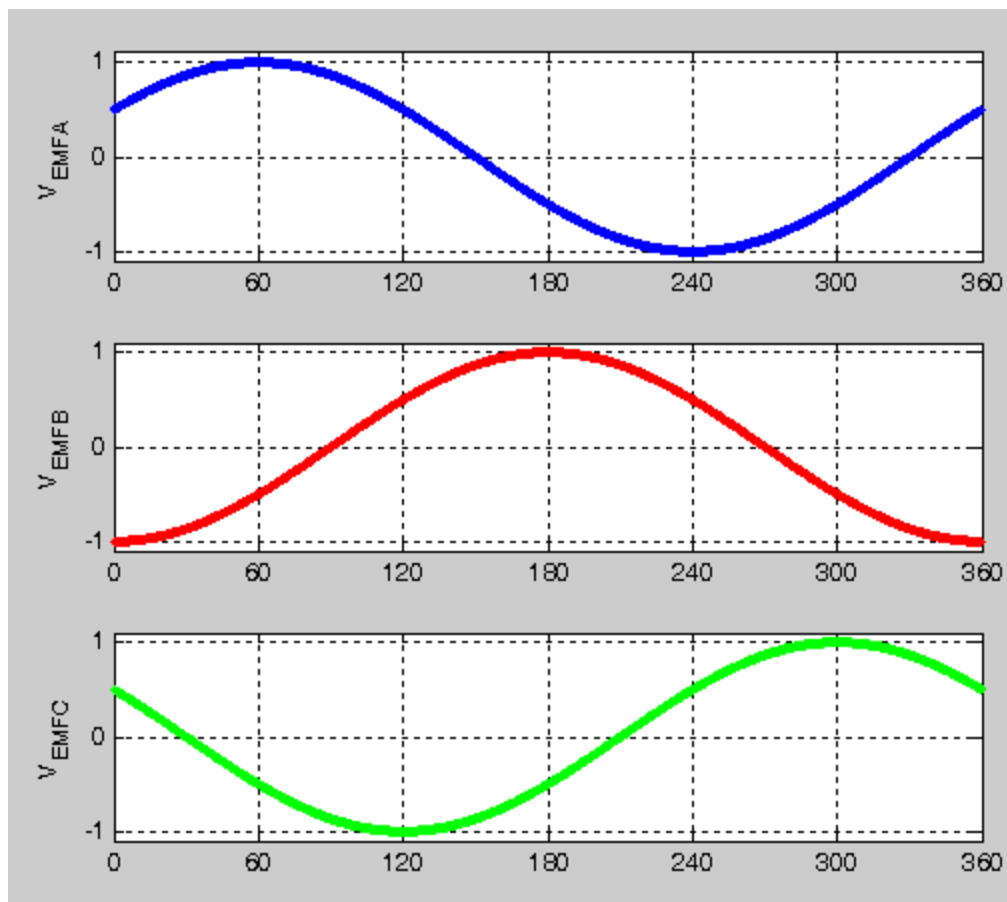


(0-val ábrázoltuk a nyitott kapcsoló melletti állapotot, ami nem feltétlenül jelent 0 potenciált)



Szenzor nélküli BLDC vezérlés

Indukált
feszültségek
fázisonként

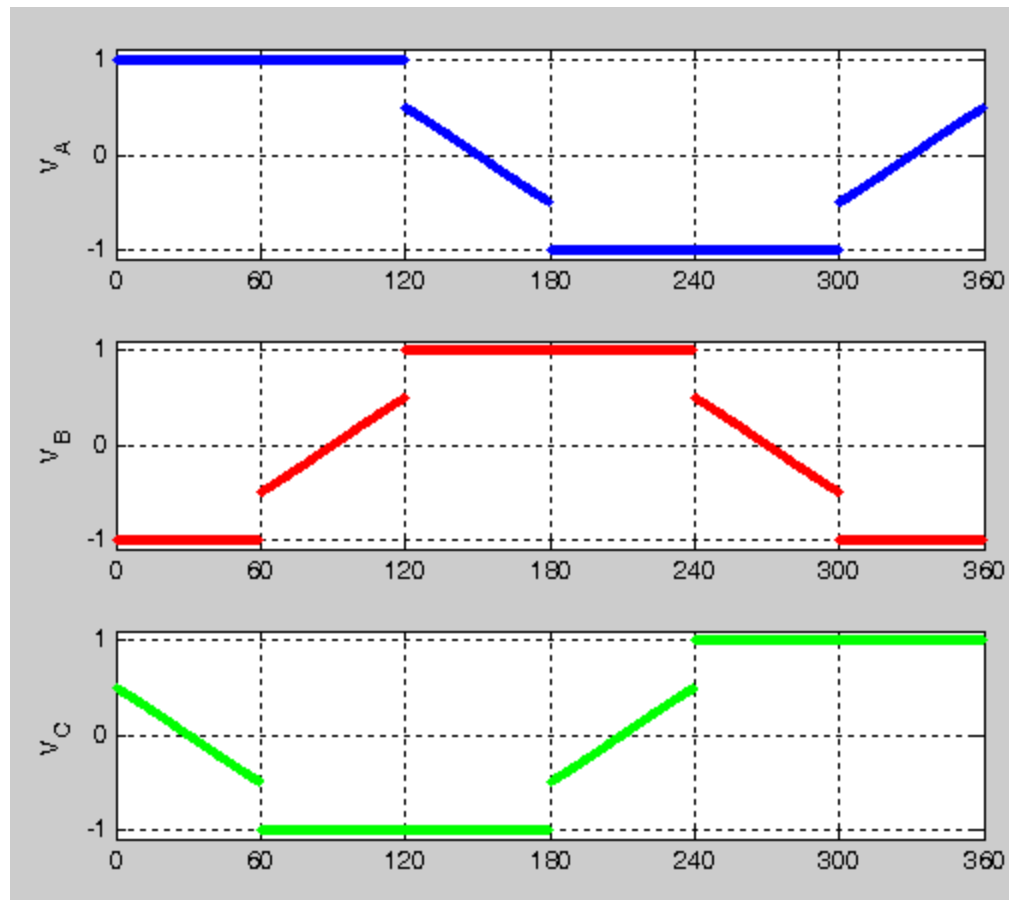


(szinuszos karakterisztikát feltételezve)



Szenzor nélküli BLDC vezérlés

Mért
indukált
feszültségek
(EMF)
fázisonként



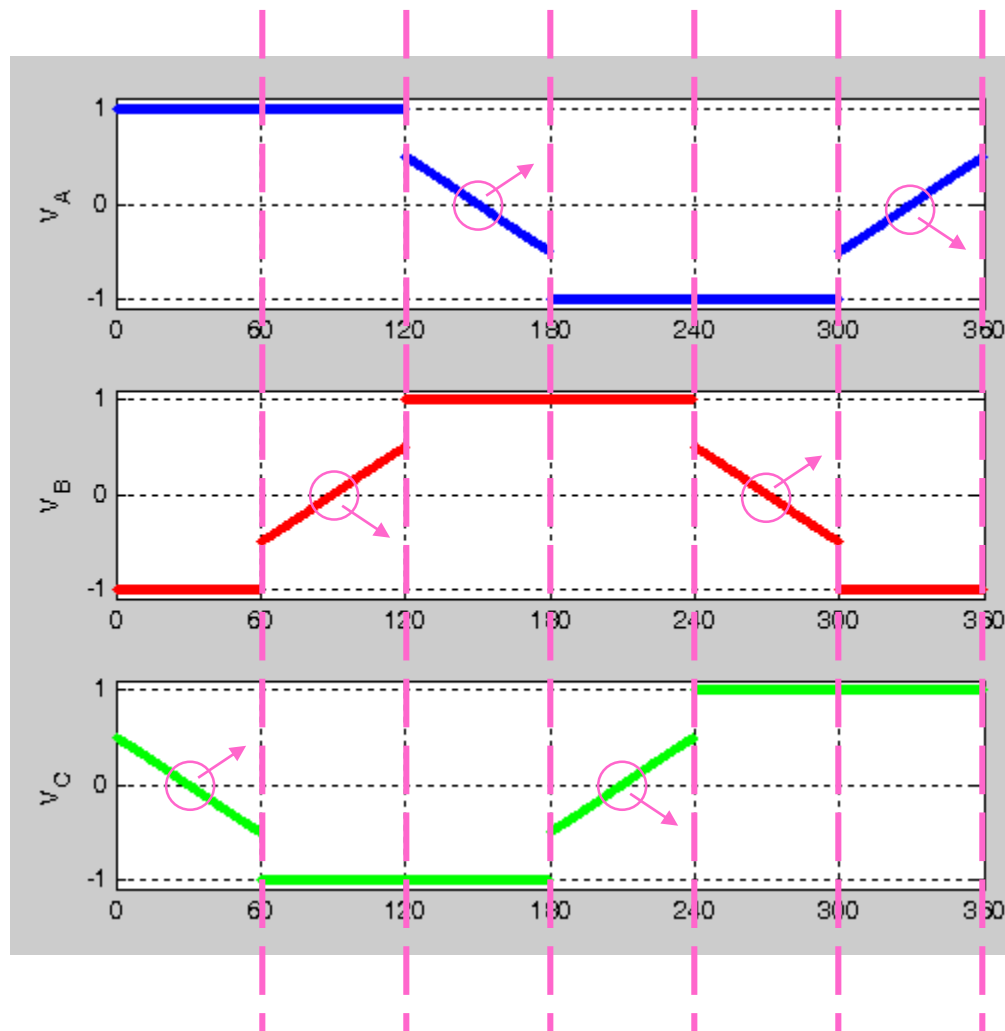
(szinuszos vagy trapézos karakterisztikát feltételezve)



Szenzor nélküli BLDC vezérlés

Nullátmenet
detektálás -
kommutáció

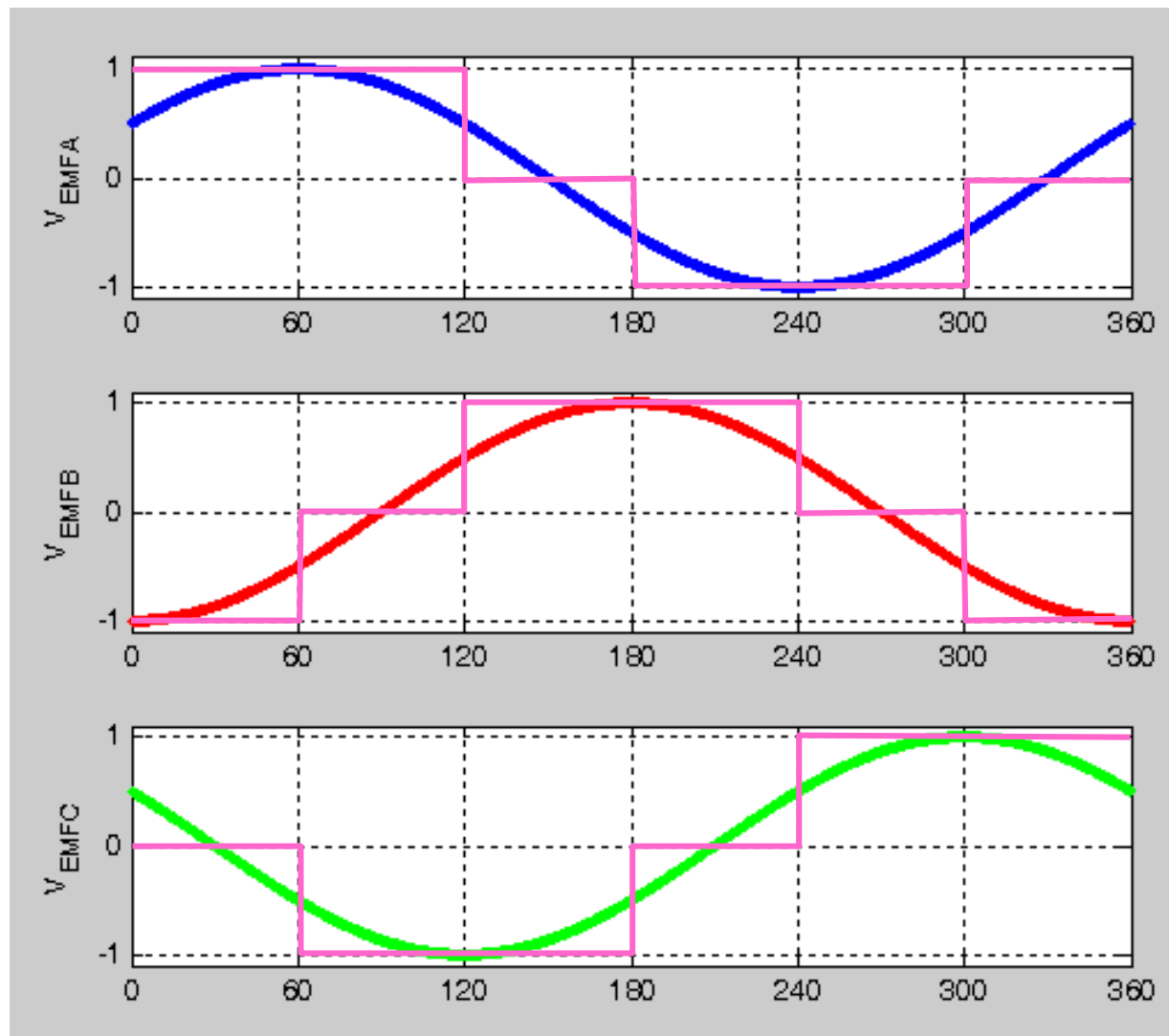
60° fázis-
eltolással



Szenzor nélküli BLDC vezérlés

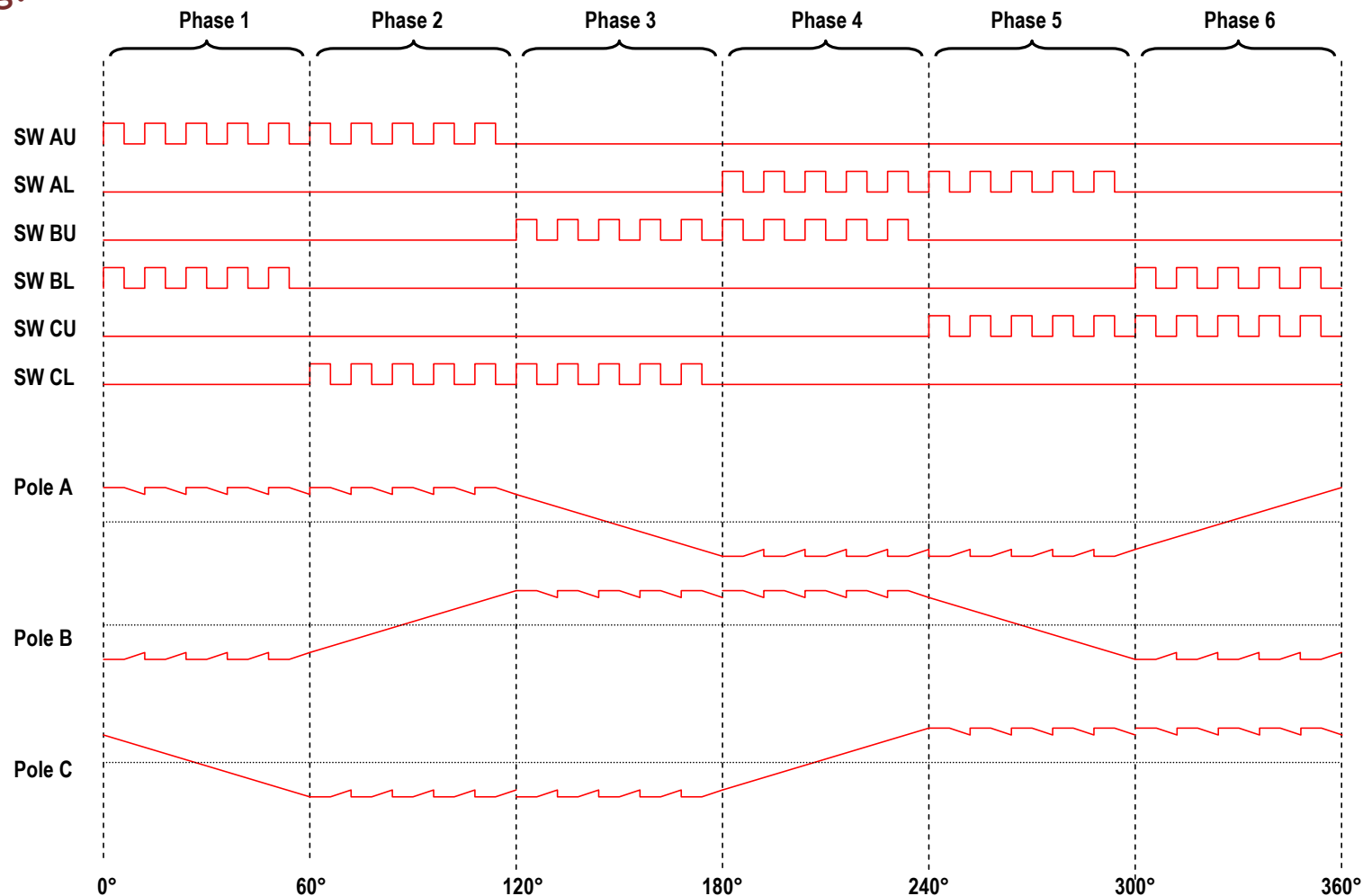
Kommutációs sorrend:
a kapcsoló állapotokat feszültség szintekkel ábrázolva - a vezérlés követi az EMF jelalakot

(a vezérlés egy egyszerű 3-fázisú szinusz jel approximációt követ)



Szenzor nélküli BLDC vezérlés

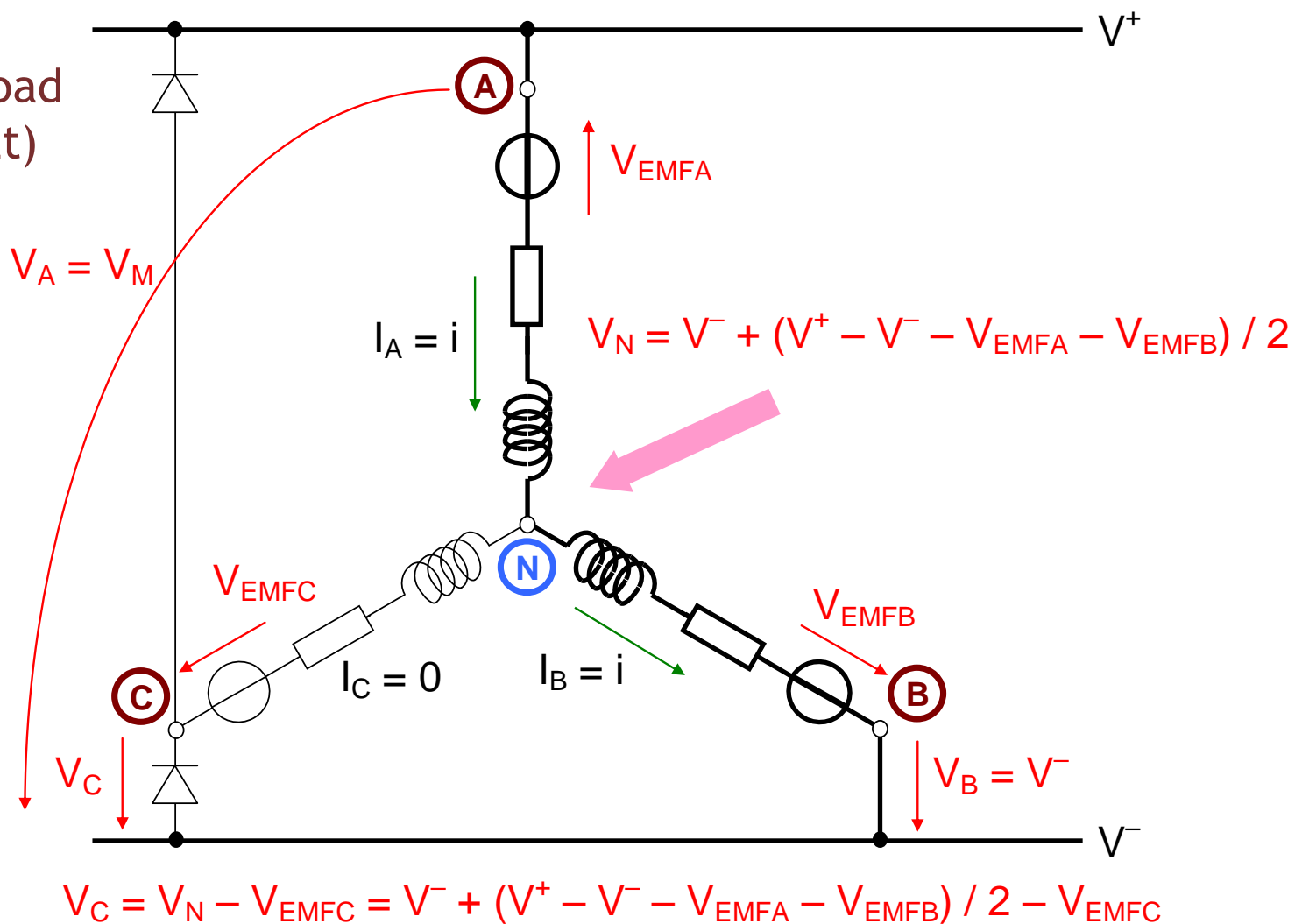
A valóságban a vezérlés PWM alapú kapcsolófeszültség szabályozással valósul meg:



Szenzor nélküli BLDC vezérlés

EMF mérés:
mindig a szabad
(nem vezérelt)
kimeneten

Példa: A és B
pólusok
vezérelve,
mérés a C
póluson.



Szenzor nélküli BLDC vezérlés

Problémák:

- A vezérlés megvalósításához szükség van az indukált feszültség (EMF) megfelelő szintjére, azaz a motornak el kell érnie valamilyen minimális fordulatszámot.
- A motor indításáról külön eljárás keretében kell gondoskodni, amikor a motor eléri a minimális fordulatszámot, lehet átállni a normál vezérlésre ill. szabályozásra.
- A motorindításnak fel kell készülnie különböző terhelési viszonyokra.
- Ha a motor üzem közben (pl. túlterhelés következtében) leáll, újra az indítási eljárást kell alkalmazni.



Szenzor nélküli BLDC vezérlés

Példa egy indítási szekvenciára:

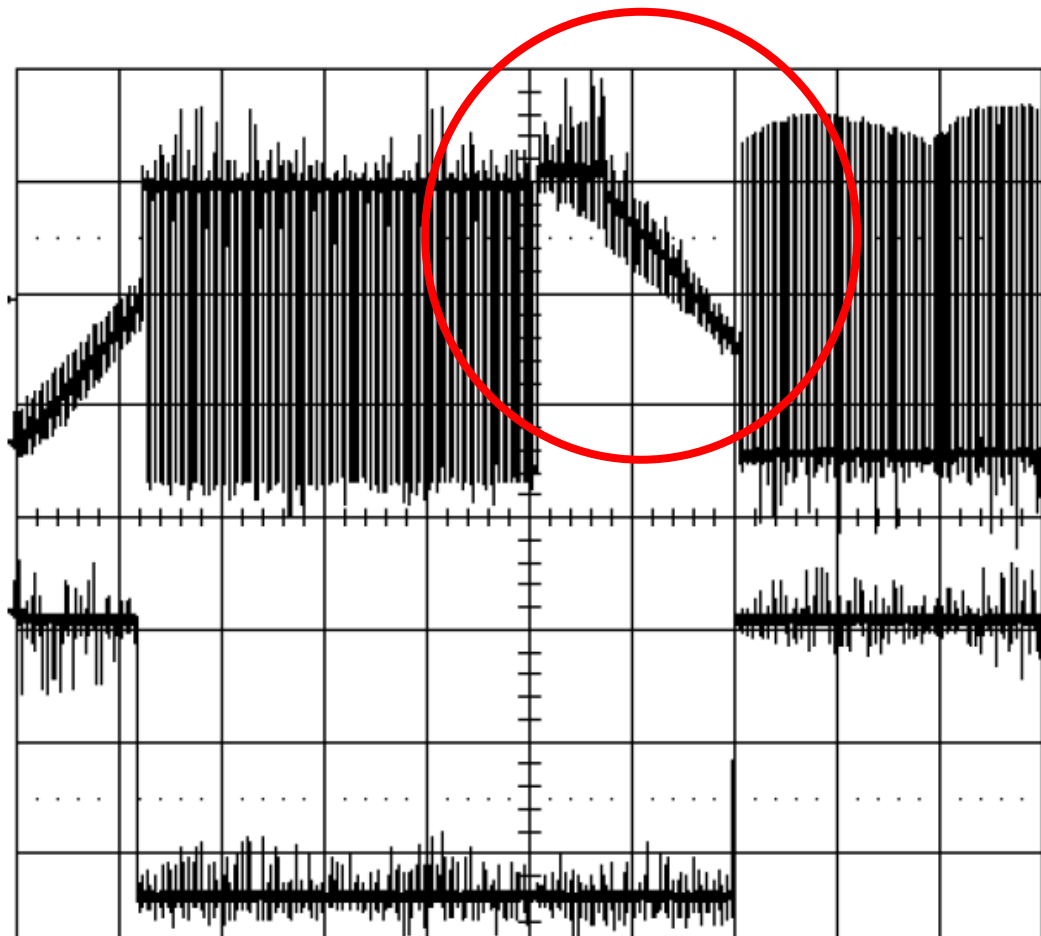
- A terhelésnek megfelelő PWM kitöltési tényezővel forgó mágneses teret állítunk elő növekedő fordulatszámmal.
- A mágneses tér forgás közben eléri azt a pozíciót, amelyben nyomatékot produkál a forgórészre, ekkor az elindul, és a mágneses térrel együtt forog.
- Ha a motor nem indul el, növeljük a kitöltési tényezőt, és újraindítjuk az eljárást.
- Ha a motor eléri a minimális fordulatszámot, azaz az EMF megfelelő szintű, normál működési módba kapcsolunk.



Szenzor nélküli BLDC vezérlés

Problémák:

- Zajos EMF mérések - a nullátmenetek meghatározása bizonytalan.
- Zajszűrés az EMF jeleken - növeli a komplexitást, késleltetés visz be, korlátozott hatékonyságú.



Szenzor nélküli BLDC vezérlés

Előnyei:

- A legkisebb költségű megoldás.
- Korlátok mellett rugalmas megoldás, a kommutációs stratégia könnyen változtatható (szoftverben valósul meg).

Alkalmazási területek:

- Kisebb igényű hajtások, pl. ventilátorok, szivattyúk.
- Háztartási készülékek.
- Hobby, modell, játék.



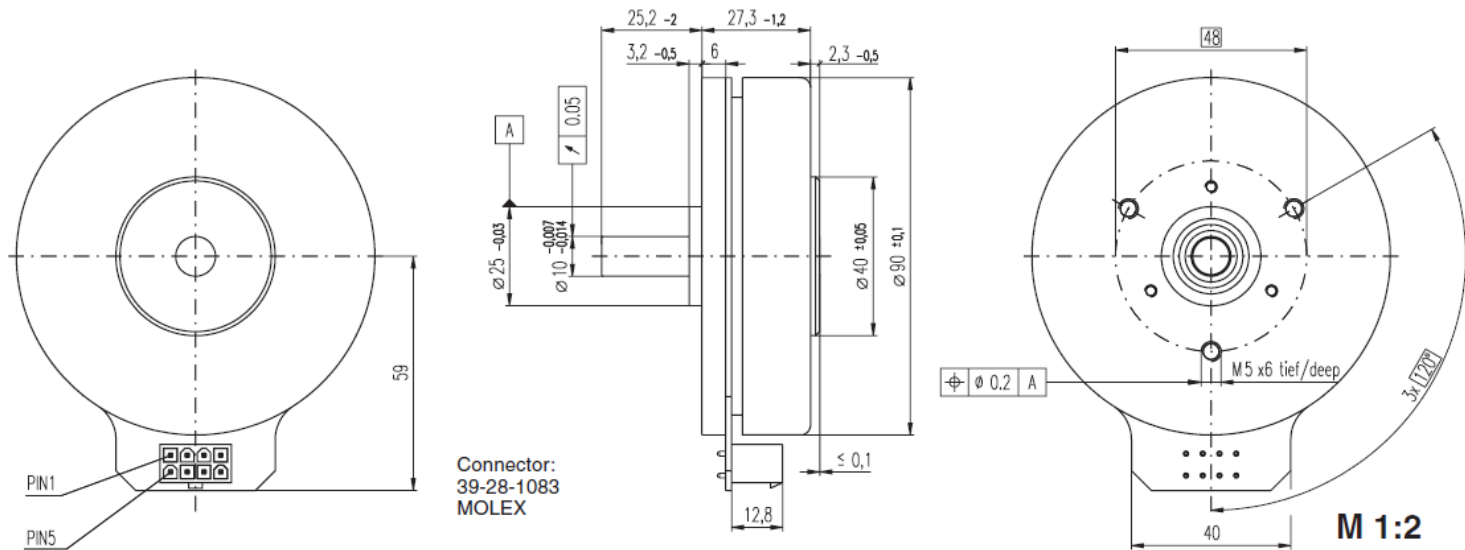
BLDC motor vezérlés

Helyesen kommutált BLDC motor:

gyakorlatilag úgy működik, mint az állandó mágneses DC motor

Példa:

EC 90 flat $\varnothing 90$ mm, brushless, 90 Watt



maxon flat motor

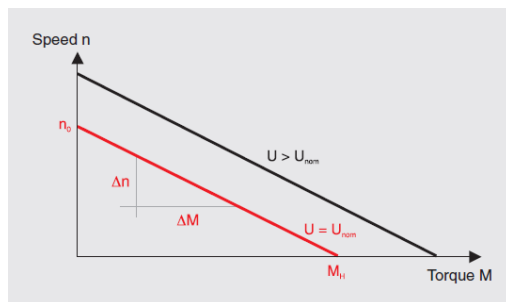


BLDC motor vezérlés

Specifikáció:

		with Hall sensors		
		323772	244879	
Motor Data (provisional)				
Values at nominal voltage				
1	Nominal voltage	V	24.0	48.0
2	No load speed	rpm	3190	2080
3	No load current	mA	539	130
4	Nominal speed	rpm	2650	1640
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	387	494
6	Nominal current (max. continuous current)	A	5.39	2.12
7	Stall torque	mNm	4670	4530
8	Starting current	A	66.2	20.9
9	Max. efficiency	%	83	85
Characteristics				
10	Terminal resistance phase to phase	Ω	0.363	2.30
11	Terminal inductance phase to phase	mH	0.264	2.50
12	Torque constant	mNm / A	70.5	217
13	Speed constant	rpm / V	135	44.0
14	Speed / torque gradient	rpm / mNm	0.697	0.466
15	Mechanical time constant	ms	22.3	14.9
16	Rotor inertia	gcm ²	3060	3060

k_m nyomaték-tényezővel jól jellemezhető



Specifications

Thermal data

17	Thermal resistance housing-ambient	1.89 K / W
18	Thermal resistance winding-housing	2.99 K / W
19	Thermal time constant windings	52.6 s
20	Thermal time constant motor	281 s
21	Ambient temperature	-40 ... +100°C
22	Max. permissible winding temperature	+125°C

Mechanical data (preloaded ball bearings)

23	Max. permissible speed	5000 rpm
24	Axial play at axial load < 15 N	0 mm
	> 15 N	0.14 mm
25	Radial play	preloaded
26	Max. axial load (dynamic)	12 N
27	Max. force for press fits (static) (static, shaft supported)	150 N
		8000 N
28	Max. radial loading, 7.5 mm from flange	30 N

Other specifications

29	Number of pole pairs	12
30	Number of phases	3
31	Weight of motor	648 g

Values listed in the table are nominal.

Connection

Pin 1	Hall sensor 1
Pin 2	Hall sensor 2
Pin 3	4.5 ... 24 VDC
Pin 4	Motor winding 3
Pin 5	Hall sensor 3
Pin 6	GND
Pin 7	Motor winding 1
Pin 8	Motor winding 2

BLDC motor vezérlés

Speciális vezérlési feltételek alkalmazásával a standard tulajdonságok befolyásolhatók:

- A kommutálási szöghelyzetek módosításával - a „mezőgyengítés” egyik formája - a nominálisnál nagyobb fordulatszám érhető el, illetve befolyásolható a motor nyomatéka, leadott teljesítménye.
- A motoráram (az egyes fázisokon folyó áram) szabályozásával befolyásolható a motor fordulatszám-nyomatéki jelleggörbéje.

Precízebb vezérlés/szabályozás: szinuszos PMS (állandó mágneses szinkron) motorok.



BLDC motor mérések

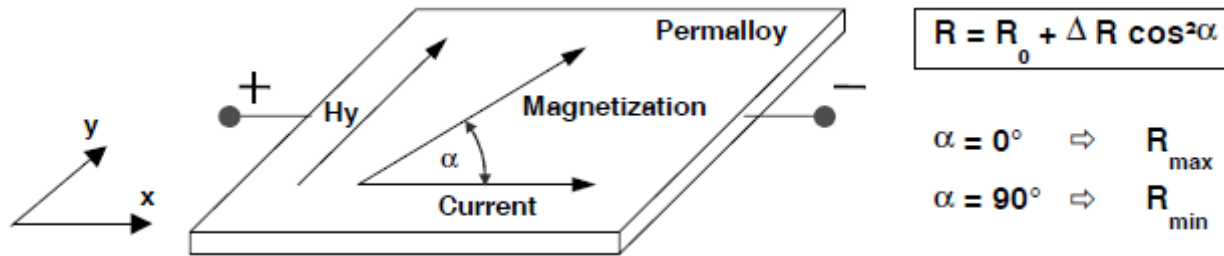
A kommutáció megvalósítása ill. a motor szabályozása céljából érzékelni kell a motor állapotára jellemző paramétereket. Jellemző mérés-típusok:

- Szöghelyzet mérés ill. detektálás.
- Indukált feszültség (EMF) mérése.
- Motoráram, fázisáramok mérése.
- Fordulatszám-mérés.
- Nyomatékmérés.



Hall-szenzorok

Mágneses tér-érzékelő szenzorok



Hall-effektus:

A mágneses térben az áramló elektronokra Lorentz erő hat, ez potenciálkülönbséget kelt, amely mérhető.

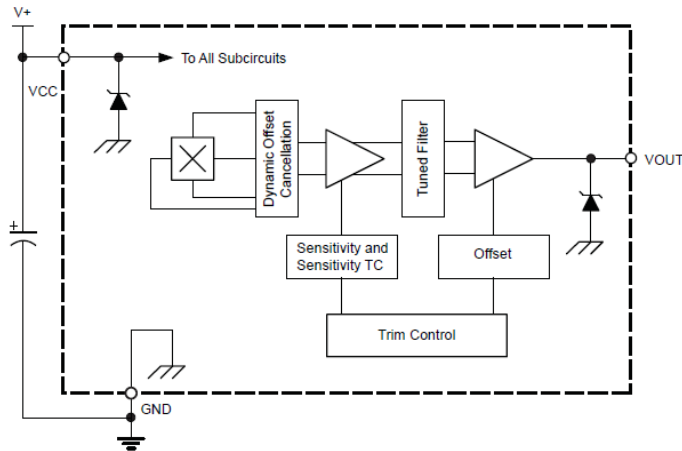
Magnetorezisztív hatás:

A mágneses tér megváltoztatja a permalloy anyag (egy vasötvözet) ellenállását.



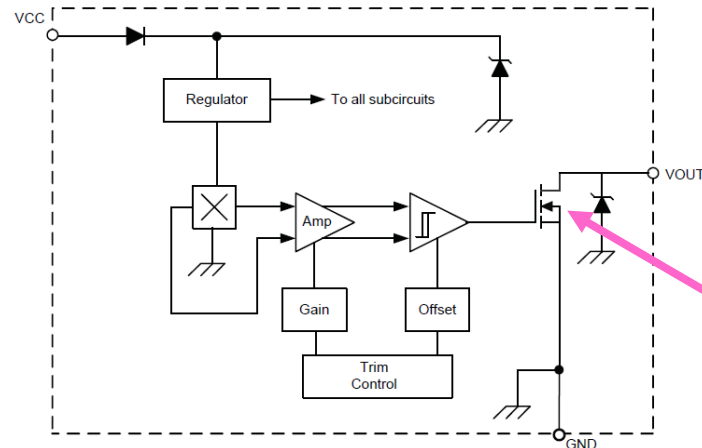
Hall-szenzorok

Analóg Hall-szenzorok és Hall-kapcsolók (latch-ek)



Allegro A1202-3

A mágneses térrel arányos feszültséget szolgáltatnak.

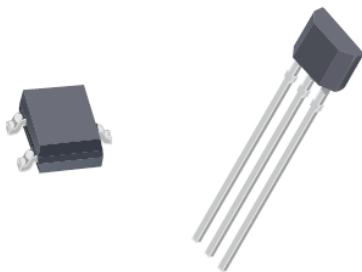


Allegro A1210-14

open-drain MOS kapcsoló a kimeneten

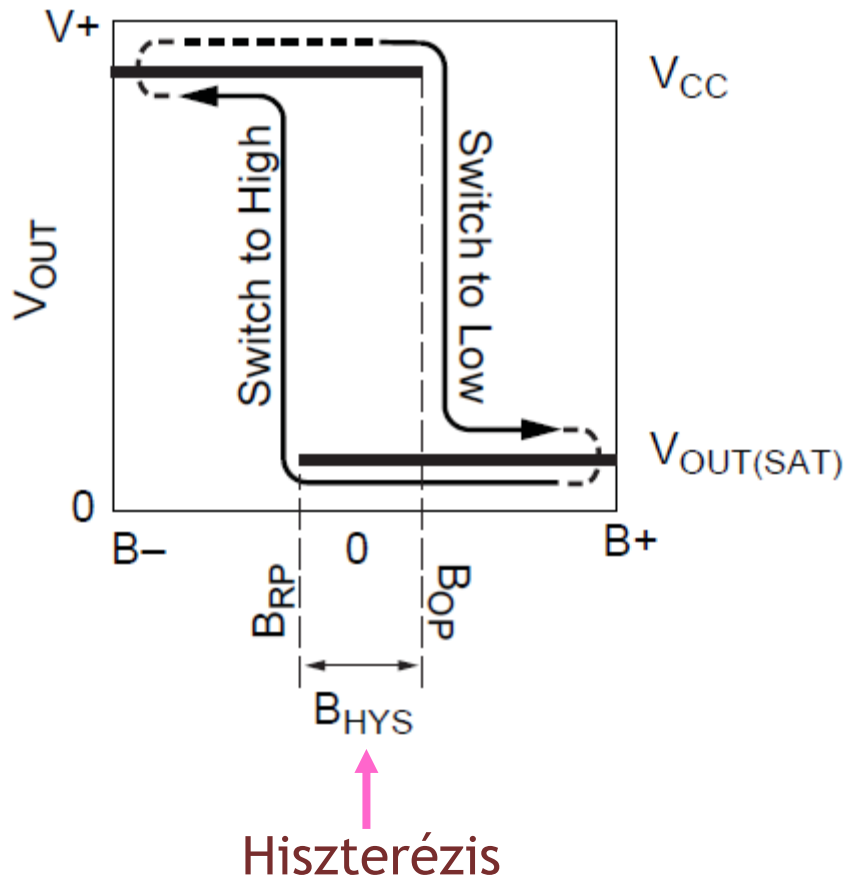
Egy mágneses térerő küszöbérték alatt ill. felett kapcsolnak be-ki.

Reteszselődés (latch tulajdonság): valamely állapotból csak egy ellentétes irányú nagyobb változás viszi ki.



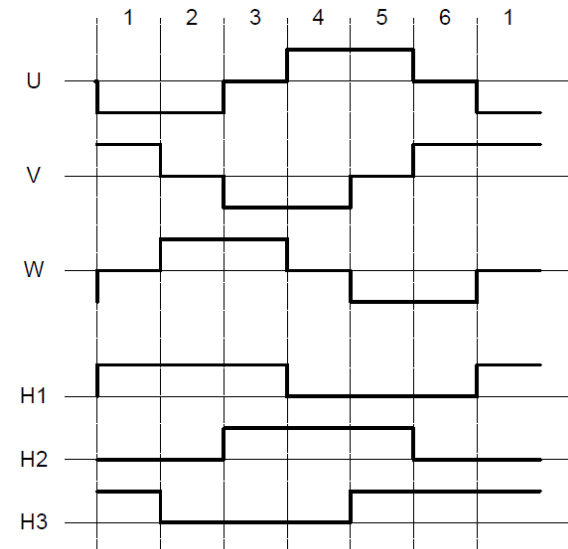
Hall-szenzorok

Hall-kapcsoló (latch)



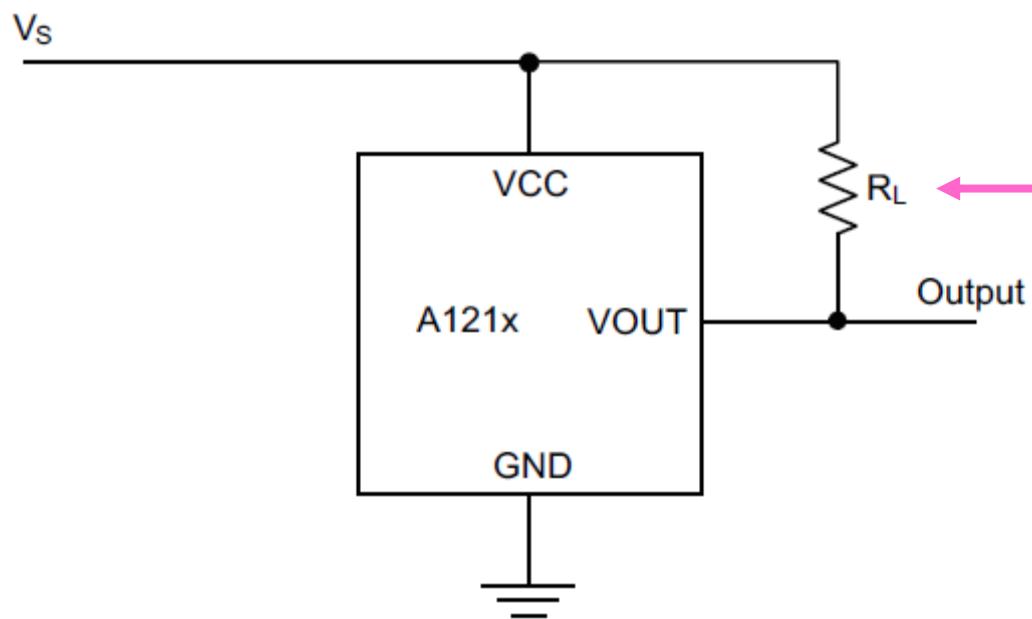
A reteszjelődés (latch tulajdonság) miatt nem impulzusszerű kimenetet ad, hanem állapotot jelez

Motorvezérlésnél ez előnyös: a teljes kommutálási fázis alatt fenntartható a jele.

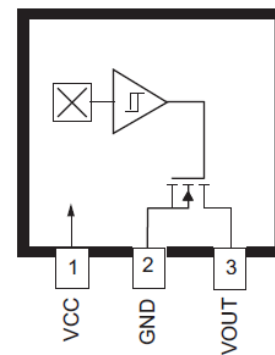
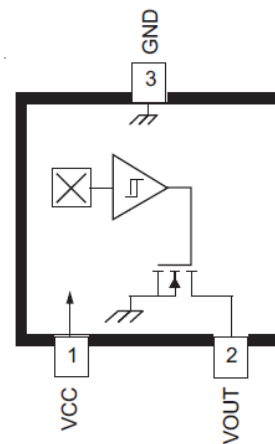
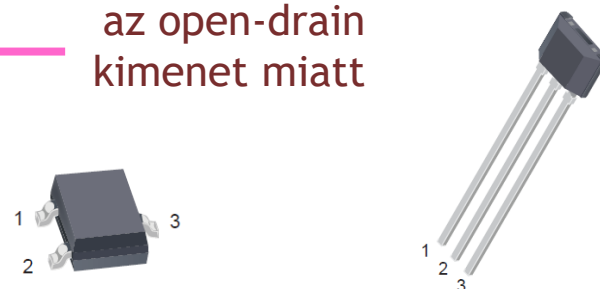


Hall-szenzorok

A Hall-kapcsoló alkalmazása:

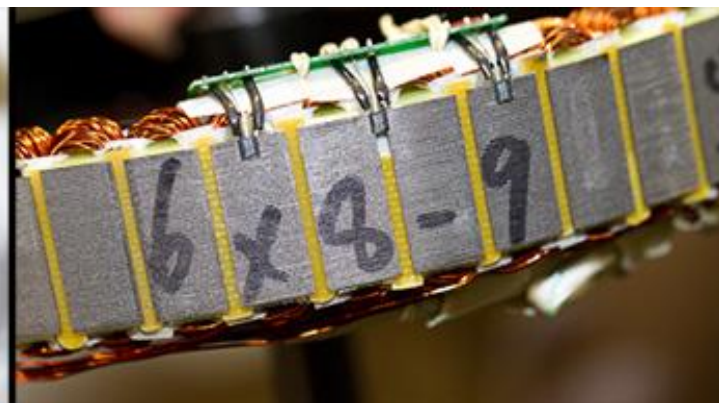
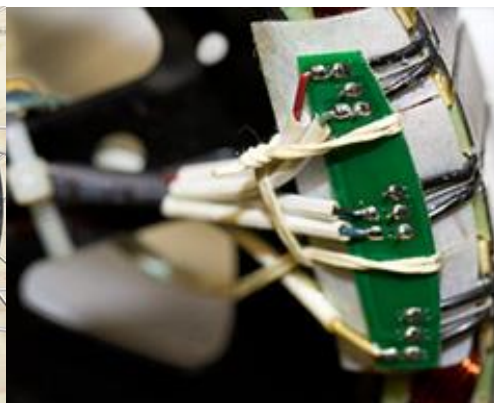
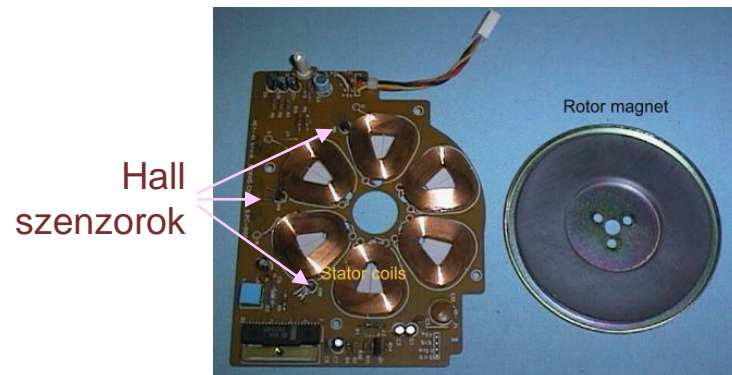


az open-drain kimenet miatt



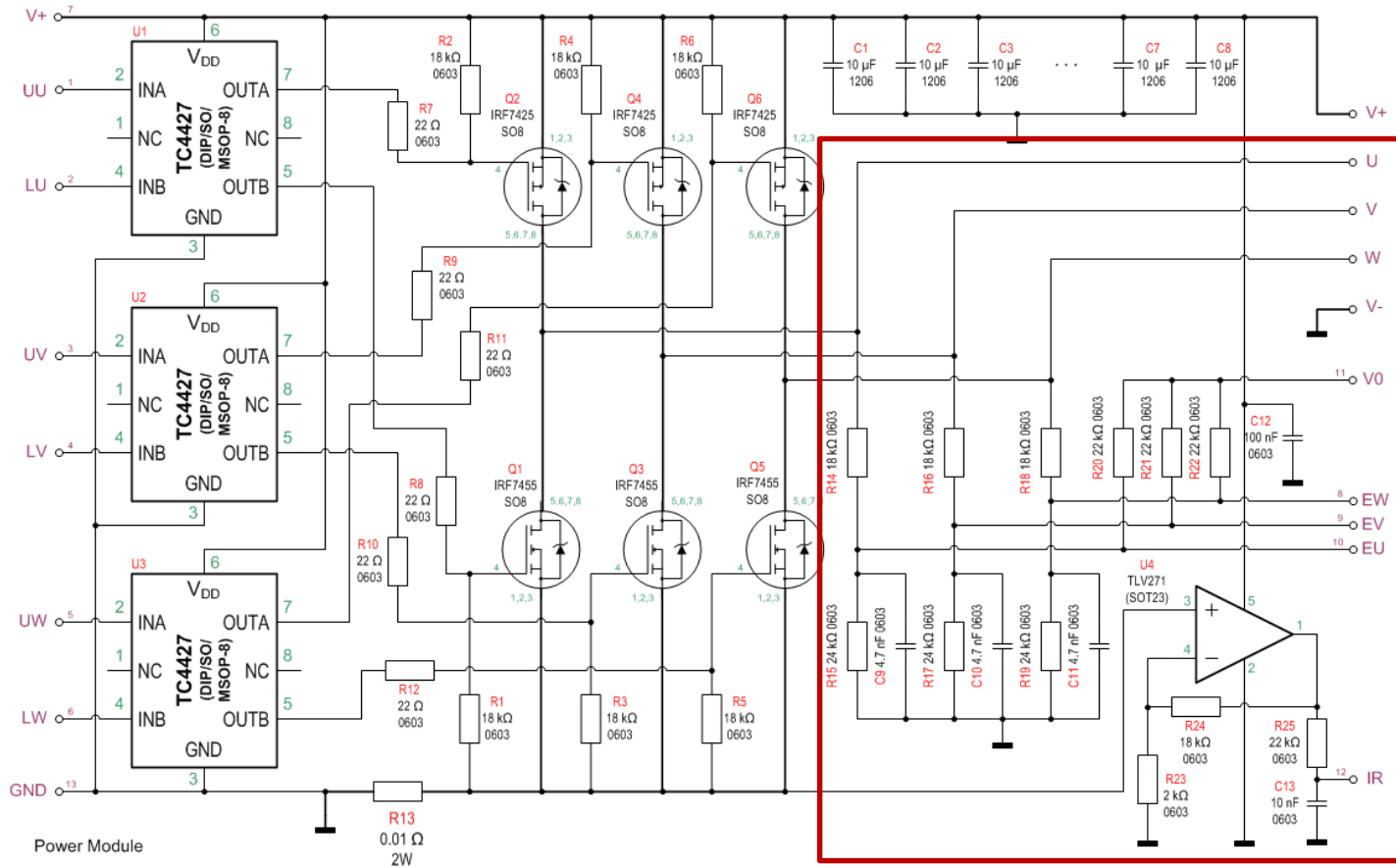
Hall-szenzorok

A Hall-kapcsolók alkalmazása szenzoros BLDC motorokban:



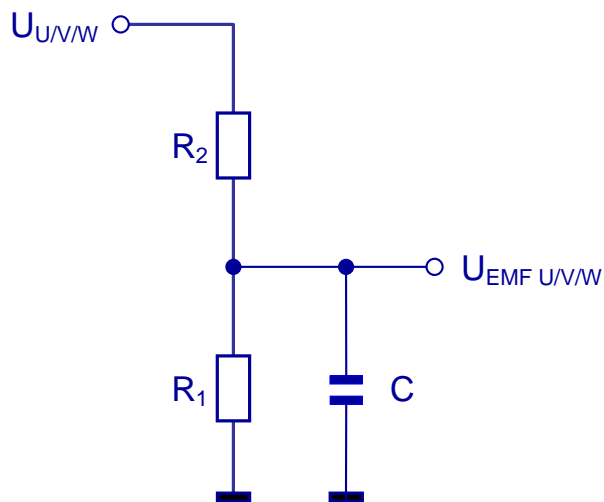
EMF mérés

Egyszerű ellenállás osztó hálózat:



EMF mérés

Ellenállás osztó hálózat:



RC szűrő: zajszűrés céljából

Miért kell osztani?

Az indukált feszültség elég magas lehet nagy fordulatszámok esetén, magasabb akár a tápfeszültségnél is.

Osztási arány:

$$A_{EMF} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Törésponti frekvencia:

$$f_c = \frac{R_1 + R_2}{2\pi R_1 R_2 C}$$



EMF mérés

Az EMF mérés megvalósítása:

1. AD konverterrel – fázisonként 1-1 ADC csatorna.
Nullátmenet meghatározása numerikusan.
Zajszűrés digitális szűréssel.
2. Nullátmenetek direkt meghatározása komparátorokkal
– 1-1 komparátor fázisonként.
Zajszűrés analóg és digitális módszerekkel: hiszterézis,
élszűrés alkalmazása.

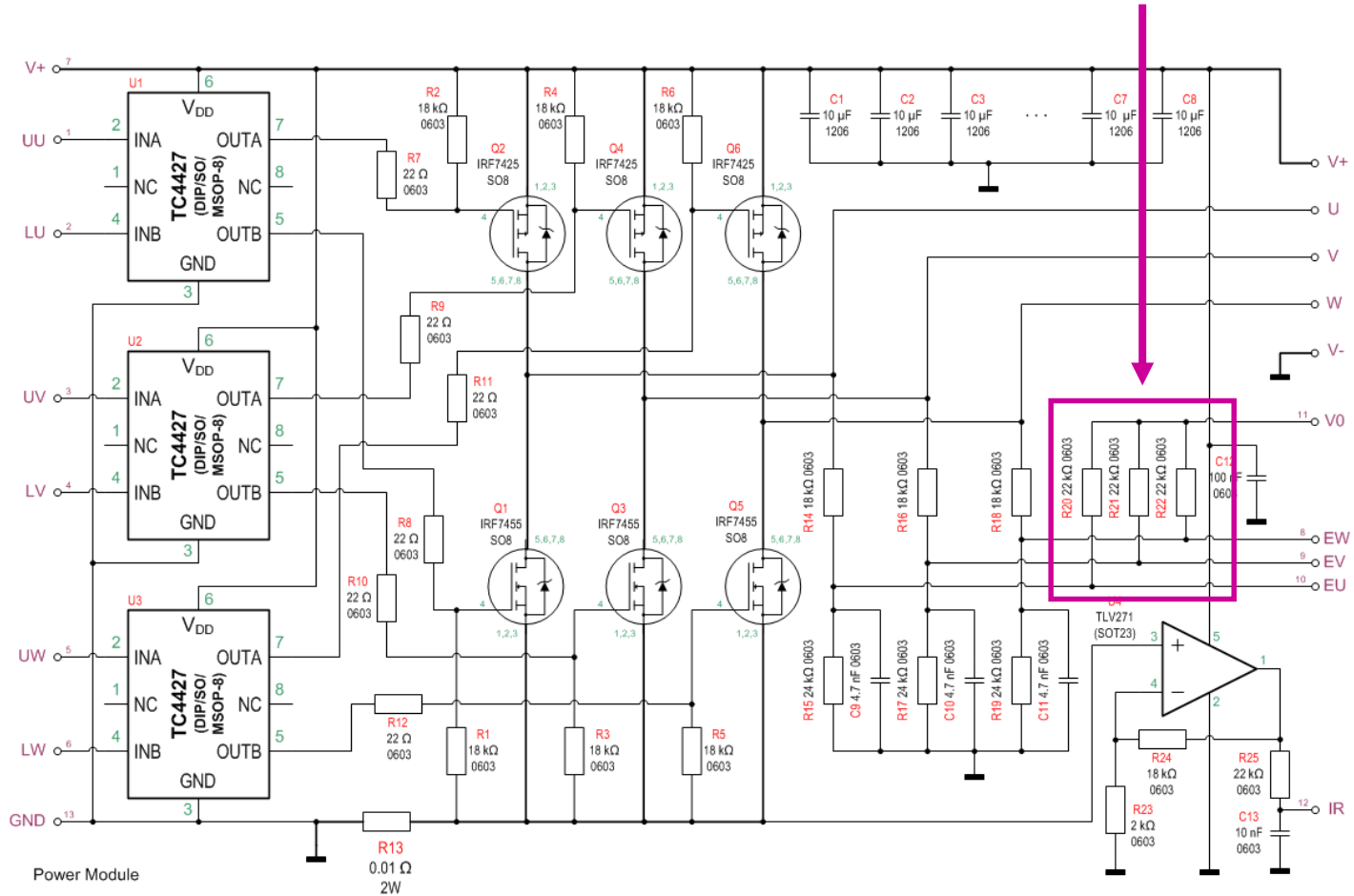
Az EMF mérés viszonyítási pontja:

- Földpont, vagy valamely tápfeszültség pont
- Virtuális csillagpont (mivel a csillagpont nem áll rendelkezésre).



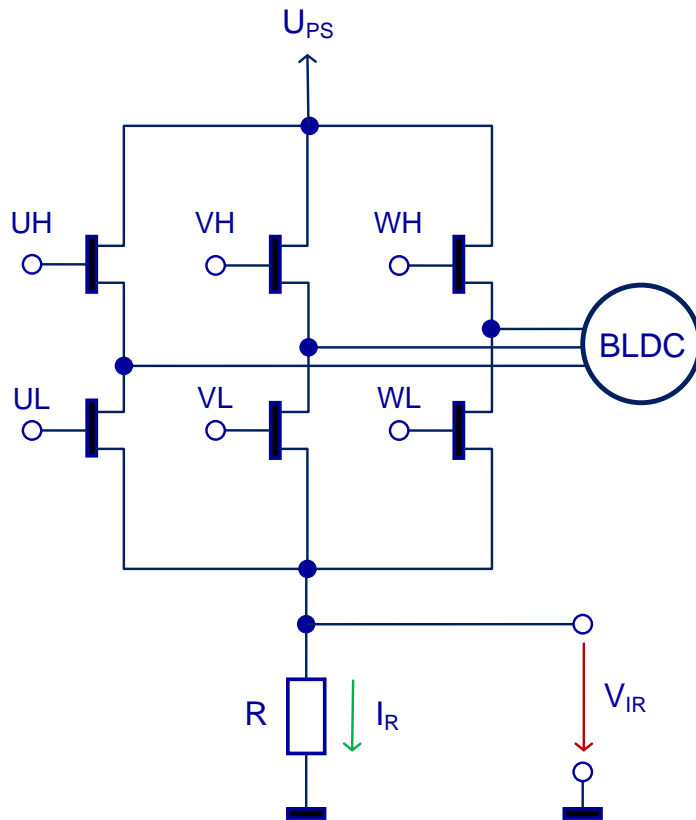
EMF mérés

Virtuális csillagpont



Motoráram mérés

Földponthoz viszonyított árammérés: motoráram

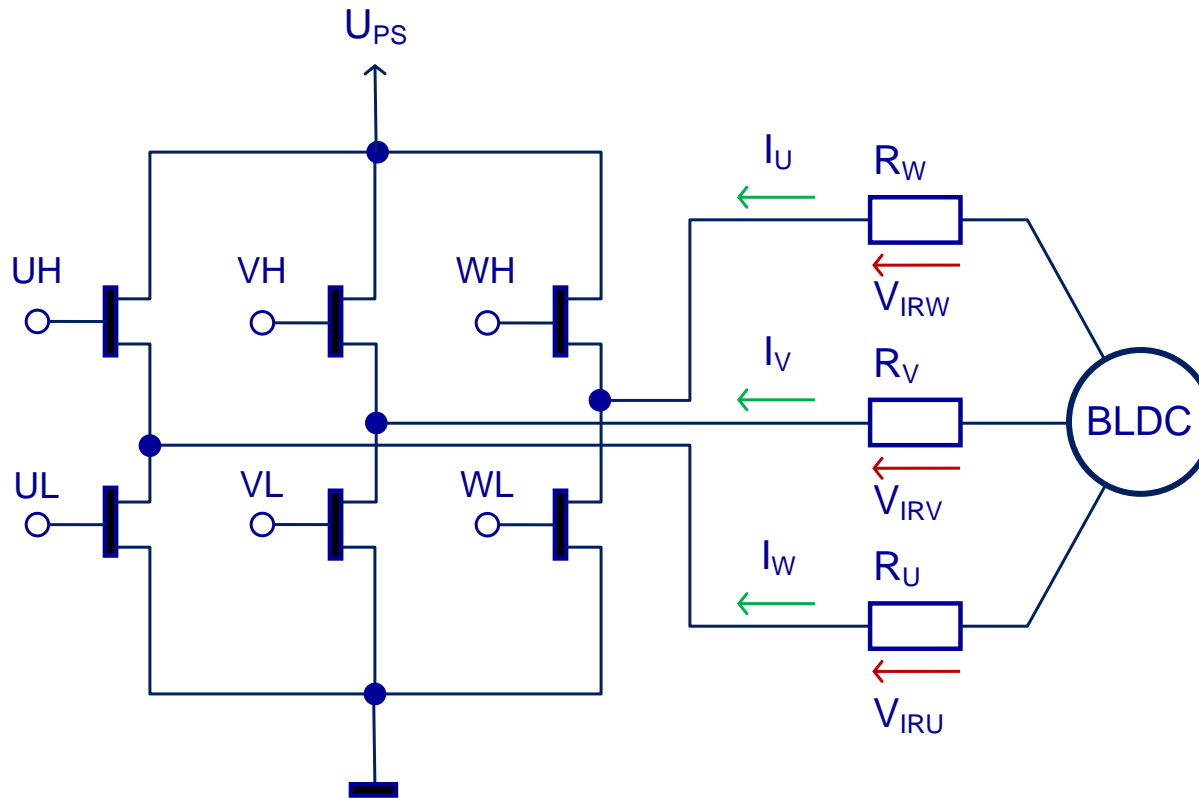


A fázisok áramai összeadódnak.



Motoráram mérés

Földfüggetlen árammérés: fázisáramok



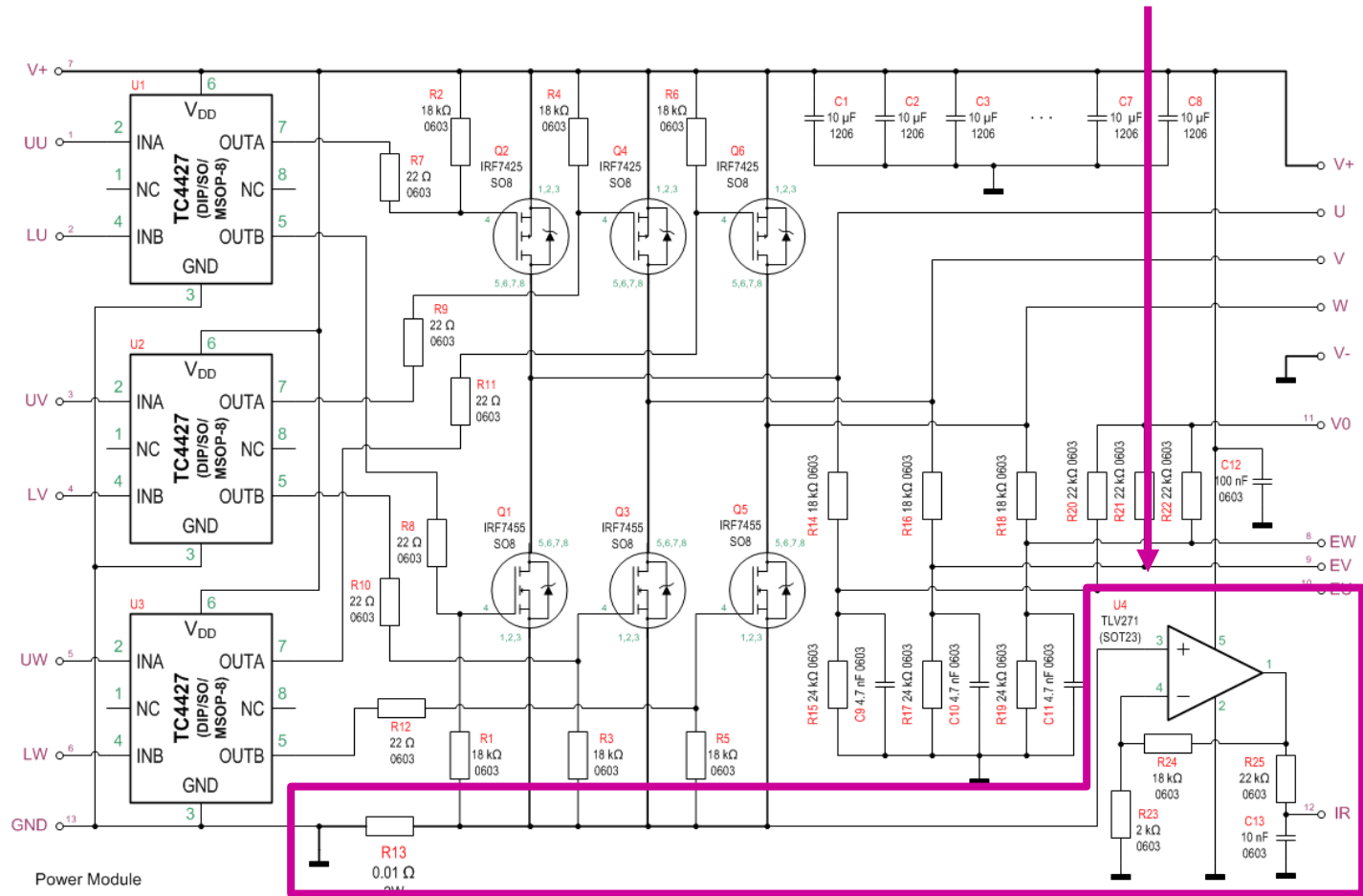
A fázisonkénti független árammérés.

Lehetőséget ad fázisáramok független szabályozására.



Motoráram mérés

Példa földponthoz viszonyított árammérésre



Motoráram mérés

Árammérés megvalósítása:

- Kis értékű soros ellenálláson eső feszültség mérése
 - Földhöz viszonyított mérés: neminvertáló erősítő kapcsolással - kis offsettel, és hőmérsékleti drifttel rendelkező műveleti erősítővel
 - Földfüggetlen mérés: áramérzékelő (Current Sense) erősítővel
 - Földfüggetlen mérés: galvanikusan leválasztott erősítő és AD konverter alkalmazásával.
- Mágneses elvű (Hall-elemes) áramérzékelő
 - Földhöz viszonyított vagy földfüggetlen mérés



Motoráram mérés

Földponthoz viszonyított árammérés kis értékű ellenállással

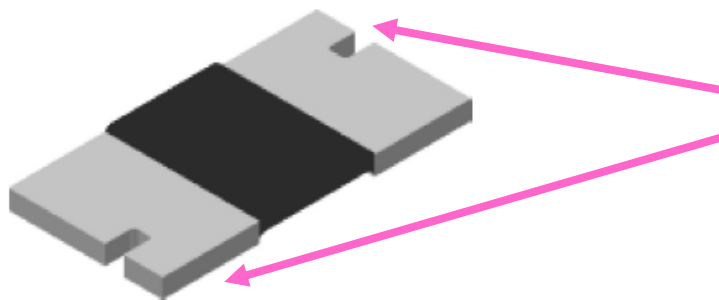
- Nagyon kis értékű ellenállás alkalmazása: kis disszipáció (hővesztesség), kismértékű melegedés, nem tolódnak el a potenciálviszonyok - 1-100 m Ω tipikus értékek.
- Pontos, kis toleranciájú ellenállás alkalmazása - 1% - 0.1% - ez utóbbiak igen drágák.
- Nagyon kis (mV nagyságrendű) feszültségek mérését kell megoldani: az erősítő offset-je és hőmérsékleti drift-je kritikus - 0-driftű műveleti erősítők; eléggé költségesek.
- Kis zajú mérőelemek alkalmazása, illetve zajszűrés megvalósítása elengedhetetlen.



Motoráram mérés

Áramfigyelő ellenállások

Vishay Dale WSK sorozat



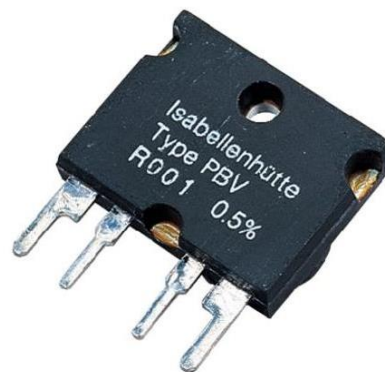
0.001Ω - 0.1 Ω 1-3W max disszipációval

„Kelvin” csatlakozások: kis áramú mérőcsatlakozások, hogy a mérés ne befolyásolja mért áramot - nagy impedanciájú mérőeszköz csatlakozik rájuk.



Vitriohm
RWN sorozat

3 W
disszipáció



Isabellenhütte
PBW sorozat

10 W disszipáció

Kelvin
csatlakozással



Motoráram mérés

0-driftű műveleti erősítők

Kapcsolóüzemű (chopper-es) műveleti erősítők

Működési elv (leegyszerűsítve): a + és - bemeneteket kapcsolók segítségével felváltva cserélgetik az erősítő bemeneti körében - az offset kiátlagolódik.

Előnyeik:

- Gyakorlatilag 0 offset ($0.5\mu\text{V}$) és drift ($0.03\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$).

Hátrányaik:

- A kapcsolásból eredő zaj megjelenik a kimeneten.
- Korlátozott határfrekvencia - 3-5 MHz Gain Bandwidth Product



Motoráram mérés

0-driftű műveleti erősítők Linear Technology LTC2050



LTC2050/LTC2050HV
Zero-Drift
Operational Amplifiers
in SOT-23

FEATURES

- Maximum Offset Voltage of 3 μ V
- Maximum Offset Voltage Drift of 30nV/°C
- Noise: 1.5 μ V_{p-p} (0.01Hz to 10Hz Typ)
- Voltage Gain: 140dB (Typ)
- PSRR: 130dB (Typ)
- CMRR: 130dB (Typ)
- Supply Current: 0.8mA (Typ)
- Supply Operation: 2.7V to 6V (LTC2050)
2.7V to \pm 5.5V (LTC2050HV)
- Extended Common Mode Input Range
- Output Swings Rail-to-Rail
- Input Overload Recovery Time: 2ms (Typ)
- Operating Temperature Range: -40°C to 125°C
- Low Profile (1mm) SOT-23 (ThinSOT)[™] Package

APPLICATIONS

- Thermocouple Amplifiers
- Electronic Scales
- Medical Instrumentation
- Strain Gauge Amplifiers
- High Resolution Data Acquisition
- DC Accurate RC Active Filters
- Low Side Current Sense

DESCRIPTION

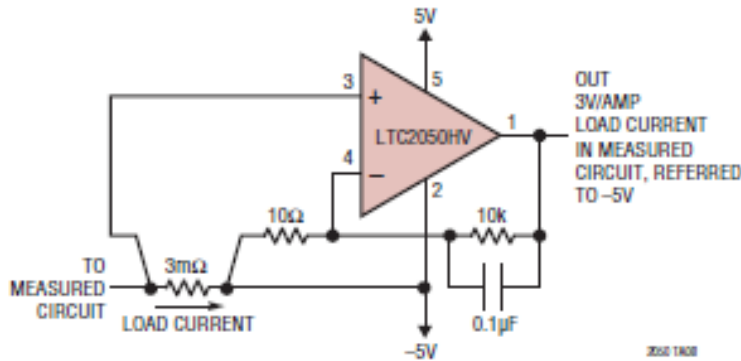
The LTC[®]2050 and LTC2050HV are zero-drift operational amplifiers available in the 5- or 6-lead SOT-23 and SO-8 packages. The LTC2050 operates from a single 2.7V to 6V supply. The LTC2050HV operates on supplies from 2.7V to \pm 5.5V. The current consumption is 800 μ A and the versions in the 6-lead SOT-23 and SO-8 packages offer power shutdown (active low).

The LTC2050, despite its miniature size, features uncompromising DC performance. The typical input offset voltage and offset drift are 0.5 μ V and 10nV/°C. The almost zero DC offset and drift are supported with a power supply rejection ratio (PSRR) and common mode rejection ratio (CMRR) of more than 130dB.

The input common mode voltage ranges from the negative supply up to typically 1V from the positive supply. The LTC2050 also has an enhanced output stage capable of driving loads as low as 2k Ω to both supply rails. The open-loop gain is typically 140dB. The LTC2050 also features a 1.5 μ V_{p-p} DC to 10Hz noise and a 3MHz gain bandwidth product.

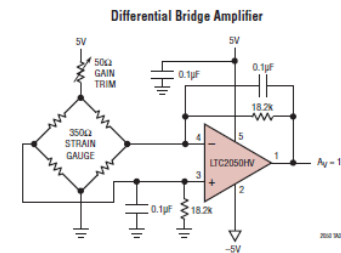
LTC, LT, LTC, LTM, Linear Technology and the Linear logo are registered trademarks of Linear Technology Corporation. ThinSOT is a trademark of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners. Protected by U.S. Patents, including 5481178.

Low Side Power Supply Current Sensing



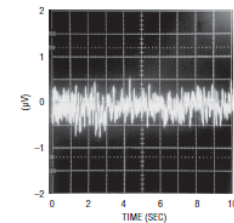
2050 TA08

TYPICAL APPLICATION



2050 TA01

Input Referred Noise 0.1Hz to 10Hz



205006



1

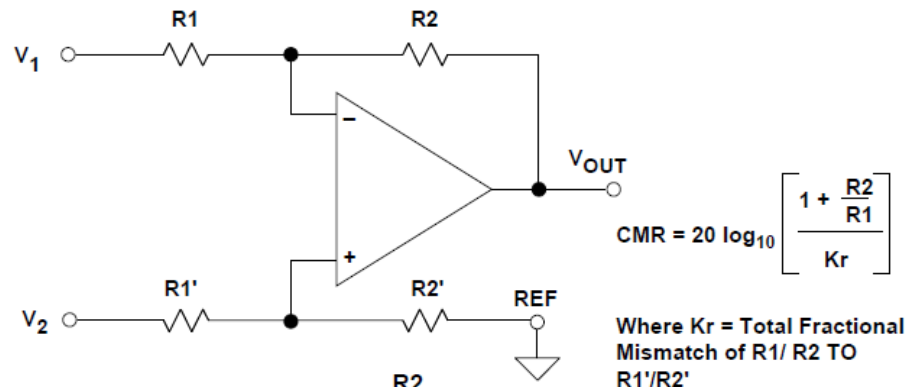


Motoráram mérés

Áramérzékelő (Current Sense) műveleti erősítők

Földfüggetlen használatra (is) készülnek

Működési elv (leegyszerűsítve): a + és - bemenetekkel sorosan kapcsolt nagy ellenállások nagy közös modulusú elnyomást (CMR) biztosítanak.



■ $V_{OUT} = (V_2 - V_1) \frac{R2}{R1}$

■ $\frac{R2}{R1} = \frac{R2'}{R1'}$ CRITICAL FOR HIGH CMR



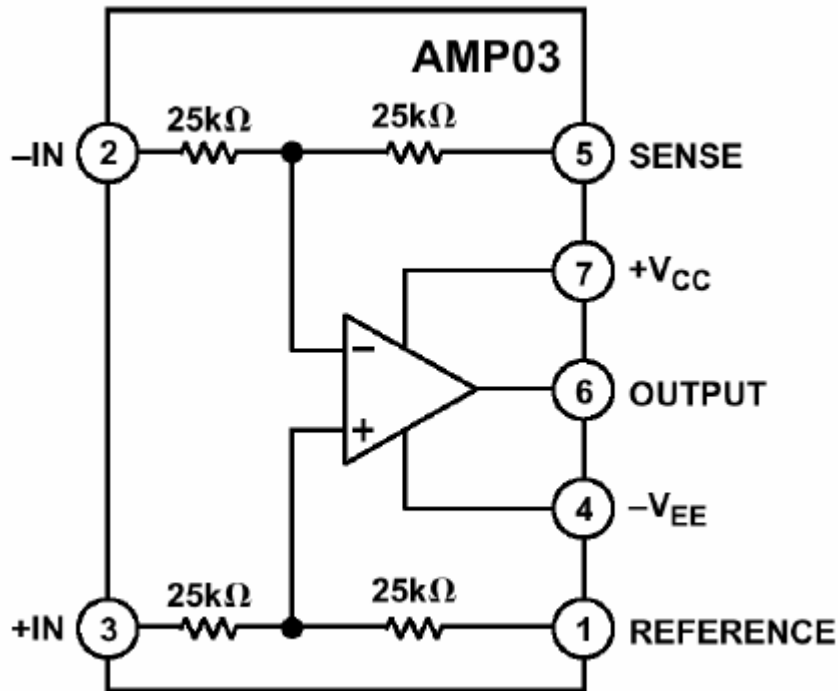
■ 0.1% TOTAL MISMATCH YIELDS $\approx 66\text{dB}$ CMR FOR $R1 = R2$



Motoráram mérés

Áramérzékelő (Current Sense) műveleti erősítők

Analog Devices AMP03 precíziós Current Sense differencia-erősítő



„Klasszikus” típus

Erősítés: 1

Tápfeszültség: $\pm 6 - \pm 18V$

Bemeneti feszültség-

tartomány: min $\pm 20V$

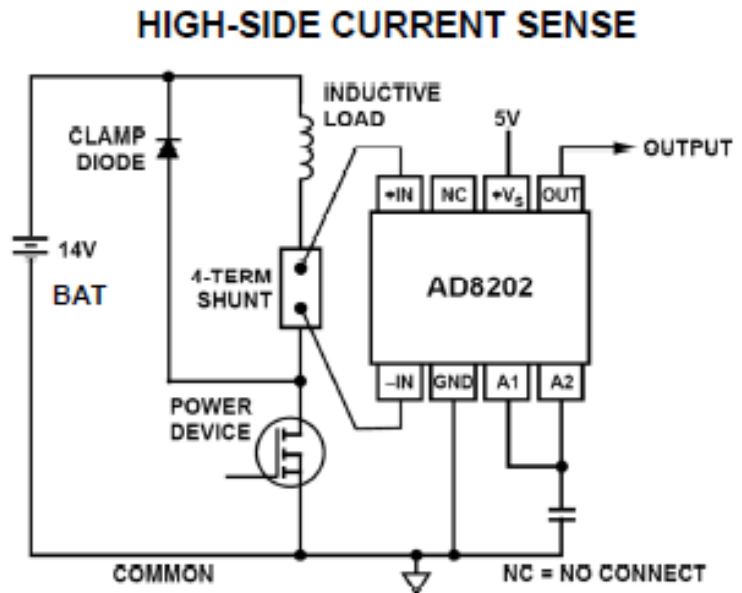
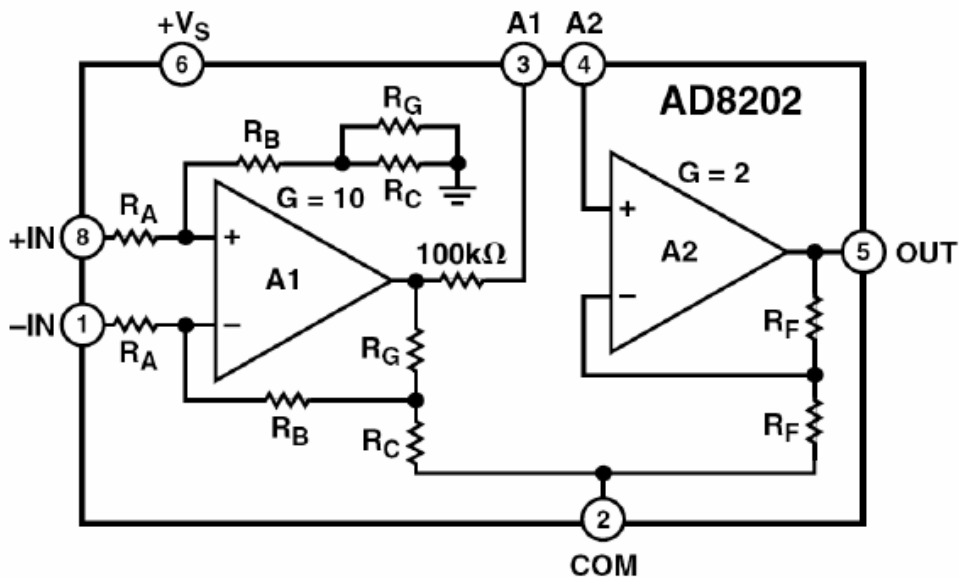
CMR: tipikusan 95 dB



Motoráram mérés

Áramérzékelő (Current Sense) erősítők

Analog Devices AD8202 automotív alkalmazásokra optimalizált Current Sense differencia-erősítő



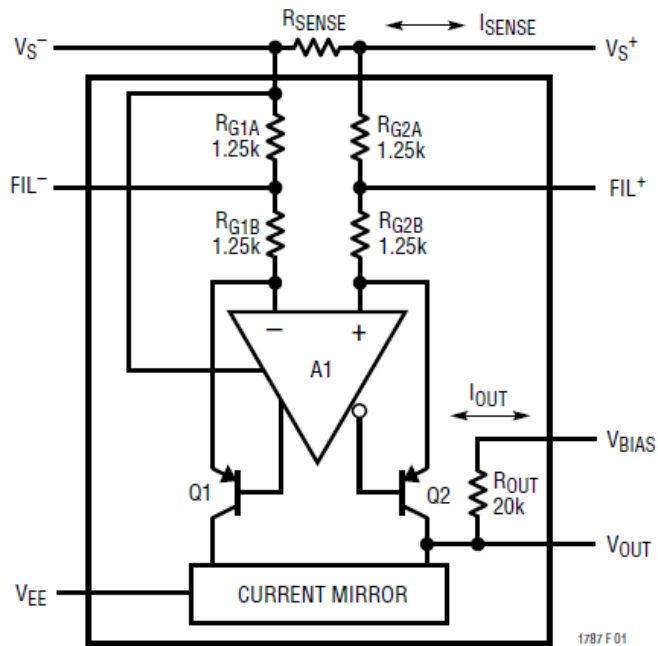
80 dB CMR -6V-18V tartományban - miközben a tápfeszültség 5V.



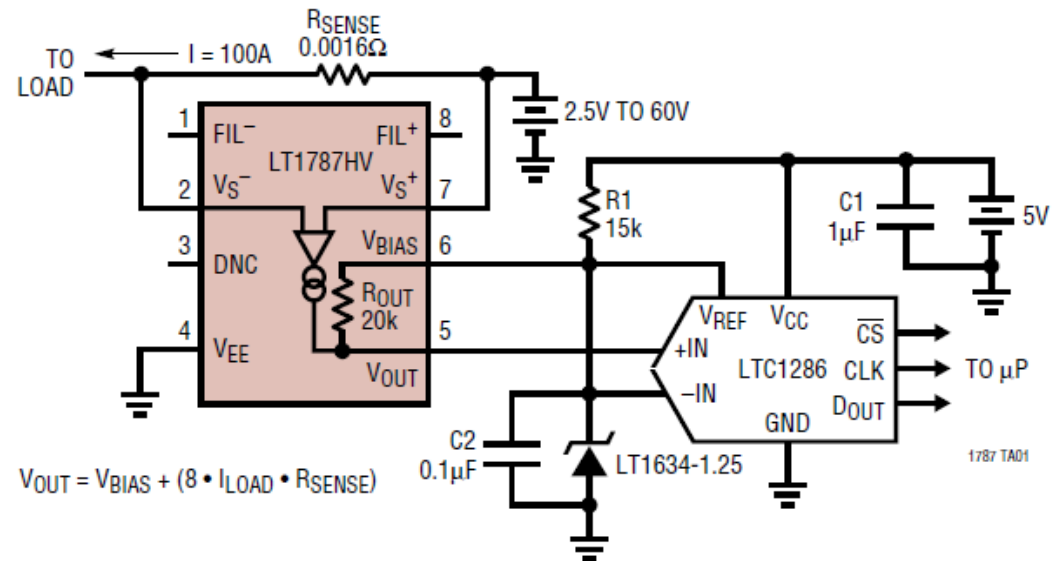
Motoráram mérés

Áramérzékelő (Current Sense) erősítők

Linear Technology LTC1787 High Side Current Sense Amplifier



12-Bit Dynamic Resolution Unidirectional Output into LTC®1286 ADC



135 dB CMR 0V-35V ill. 0-60V (HV változat) tápfeszültség tartományban



Motoráram mérés

Áramérzékelő (Current Sense) erősítők alkalmazási korlátai:

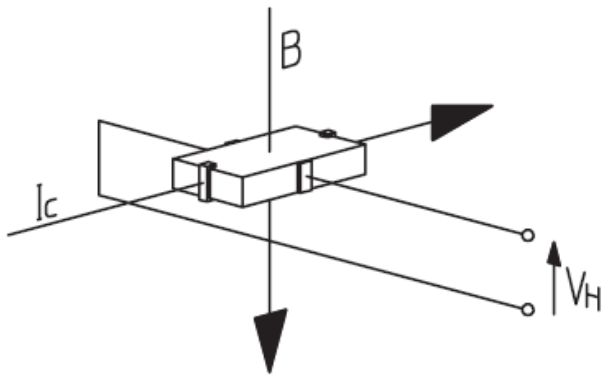
- Korlátozott feszültségtartományban használhatók - néhányszor 10 V átfogás, nagyobb feszültségű motorvezérlőkben nem használhatók.
- Kis offset és drift nem biztosítható optimális mértékben - általában ellentmondanak a közösjel-elnyomás követelményeinek.
- A motorvezérlőkben előálló tranziensek miatt gondos tervezést igényelek a pontosság és megbízhatóság érdekében.



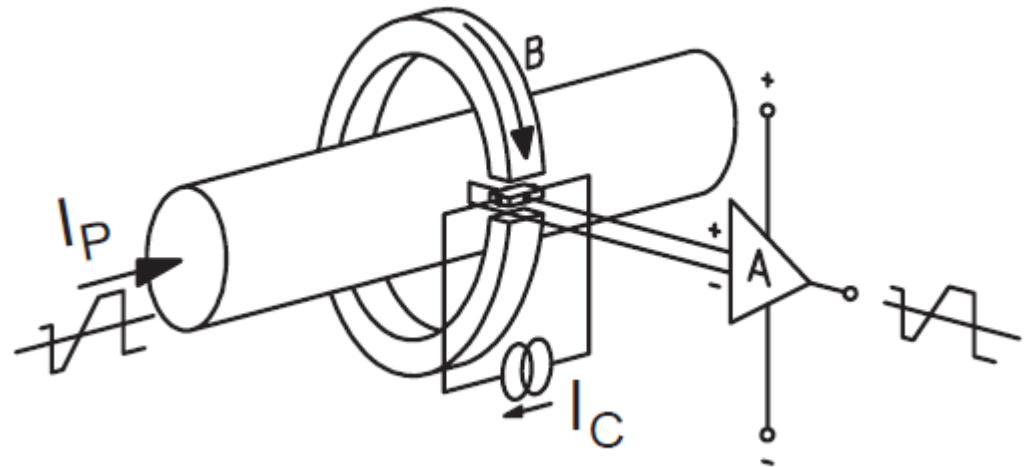
Motoráram mérés

Mágneses elvű áramérzékelők:

- Hall effektus alapján működő érzékelők
- Galvanikusan független a mérendő- és a mérő-kör.



Hall effektus



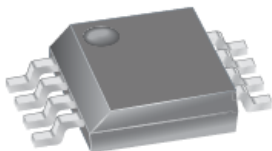
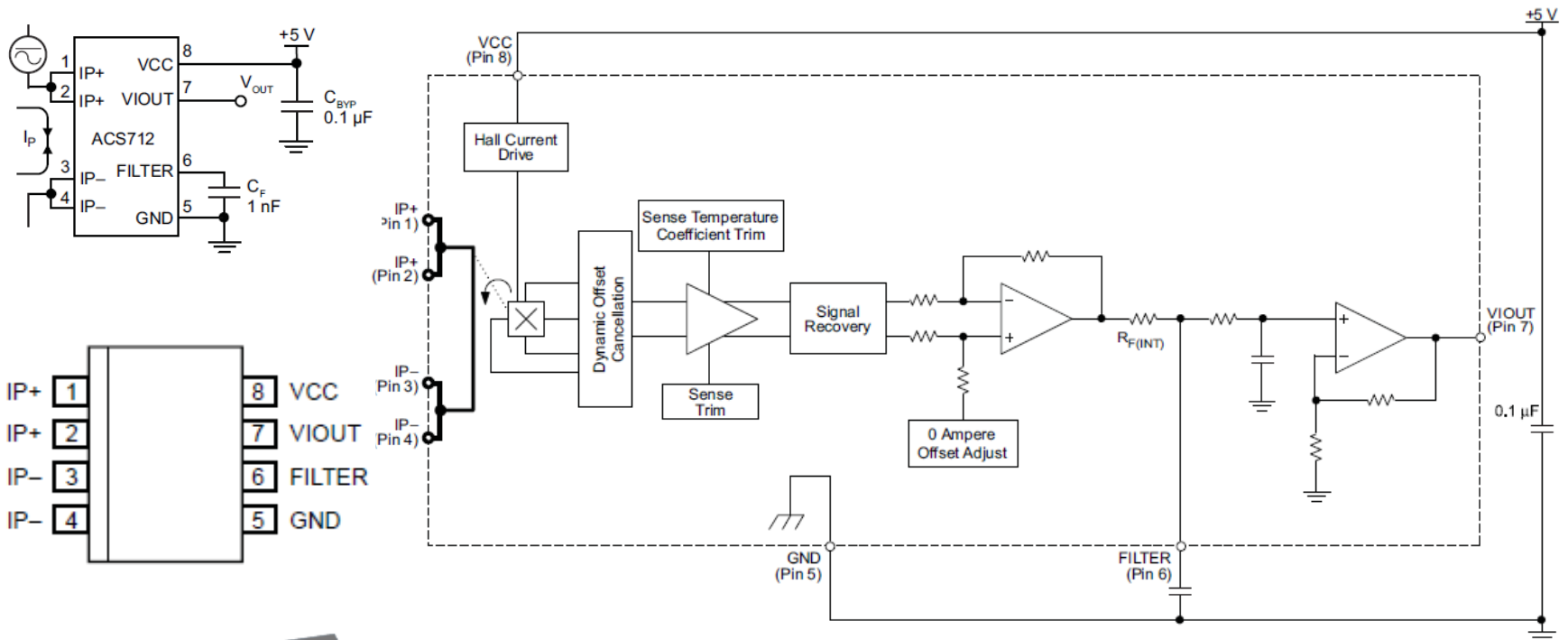
A mérendő árammal arányos feszültséget adnak ki a kimenetükön.



Motoráram mérés

Allegro ACS712:

Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor



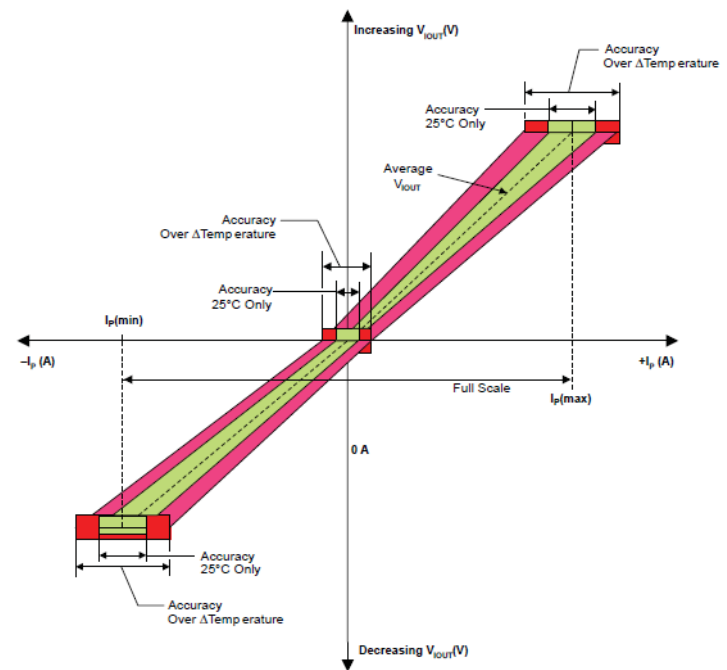
Motoráram mérés

Allegro ACS712:

Mérési tartomány: ± 5 - ± 30 A

Features and Benefits

- Low-noise analog signal path
- Device bandwidth is set via the new FILTER pin
- 5 μ s output rise time in response to step input current
- 80 kHz bandwidth
- Total output error 1.5% at $T_A = 25^\circ\text{C}$
- Small footprint, low-profile SOIC8 package
- 1.2 $\text{m}\Omega$ internal conductor resistance
- 2.1 kVRMS minimum isolation voltage from pins 1-4 to pins 5-8
- 5.0 V, single supply operation
- 66 to 185 mV/A output sensitivity
- Output voltage proportional to AC or DC currents
- Factory-trimmed for accuracy
- Extremely stable output offset voltage
- Nearly zero magnetic hysteresis
- Ratiometric output from supply voltage

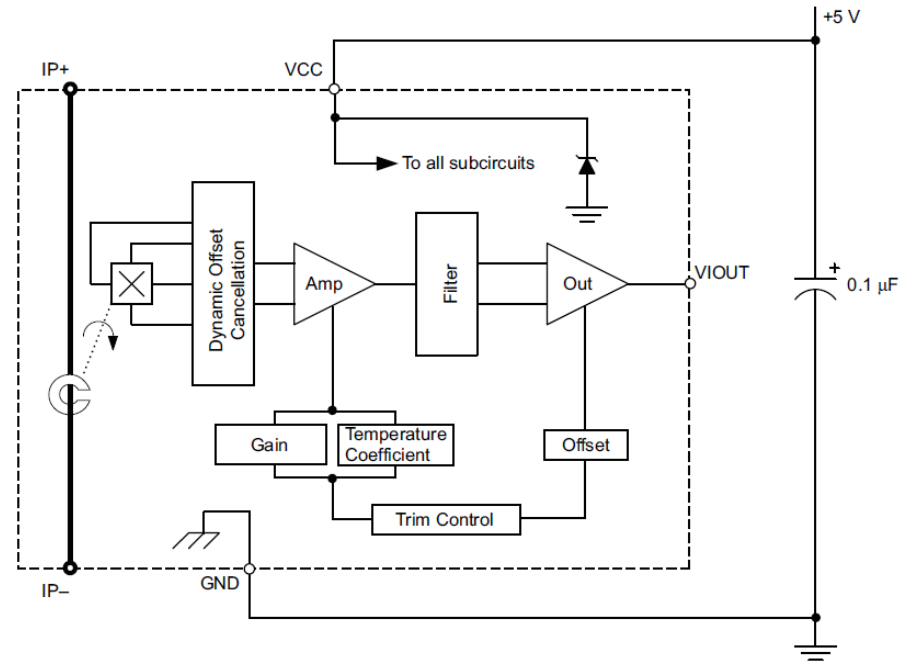
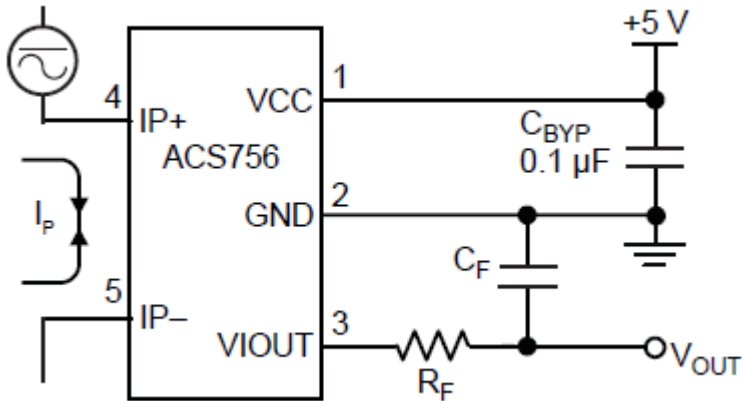
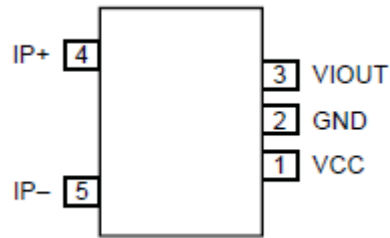


Motoráram mérés

Allegro ACS756:

Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 3 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

Mérési tartomány: $\pm 50 - \pm 100\text{A}$



Motoráram mérés

Mágneses elvű áramérzékelők előnyei:

- Földpotenciáltól vagy egyéb más potenciáltól függetlenek.
- Galvanikusan leválasztottak, eleget tesznek nagyfeszültségű szigetelési követelményeknek.
- Nem függnek bármilyen közös jeltől.
- Egyen- vagy váltakozó illetve változó áram mérésére egyaránt használhatók*.

* Nem így az áramváltók, amelyek lényegében váltakozó áramú transzformátorok.

Mágneses elvű áramérzékelők hátrányai:

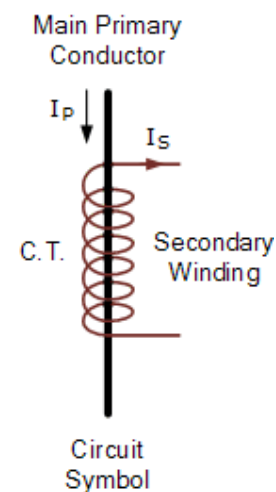
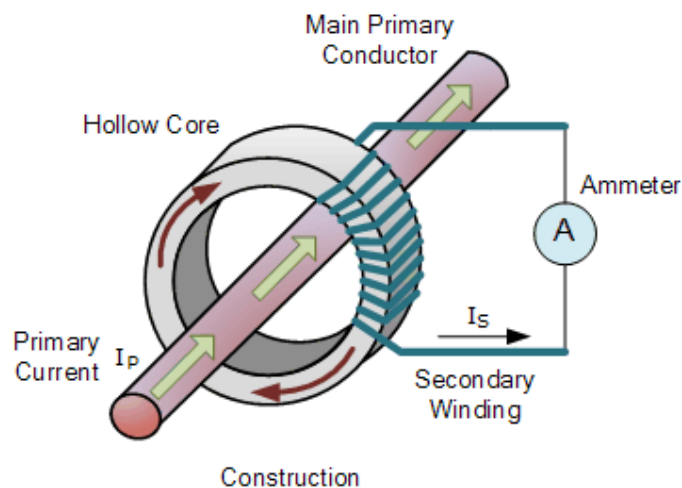
- Korlátozott pontosság (0.5 - 1 %).



Nagy áramok mérése

Áramváltók:

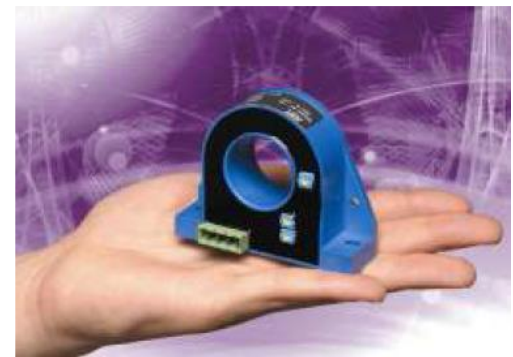
- Földpotenciáltól vagy egyéb más potenciáltól függetlenek.
- Galvanikusan leválasztottak, eleget tesznek nagyfeszültségű szigetelési követelményeknek.
- Nem függenek bármilyen közös jeltől.
- Lényegében váltakozó áramú transzformátorok.
- Alapváltozatukban váltakozó áramok mérésére alkalmasak.
- Időben változó (nem feltétlenül szinuszos) áramok mérése: a szekunder körben jelfeldolgozás révén.



Nagy áramok mérése

LEM

- áramváltók
- Hall-elvű áram-
érzékelők
- 0 ... 5.000 A
- DC ... 500 kHz



Fordulatszám mérés

Fordulatszám meghatározása BLDC motorokban:

- A fordulatszám kiadódik a kommutáció megvalósítása során, ill. időmérésre vagy impulzusszámlálásra vezethető vissza.
- A fordulatszámmérés eszközei: a mikroszámítógép időzítő (Timer) perifériái.

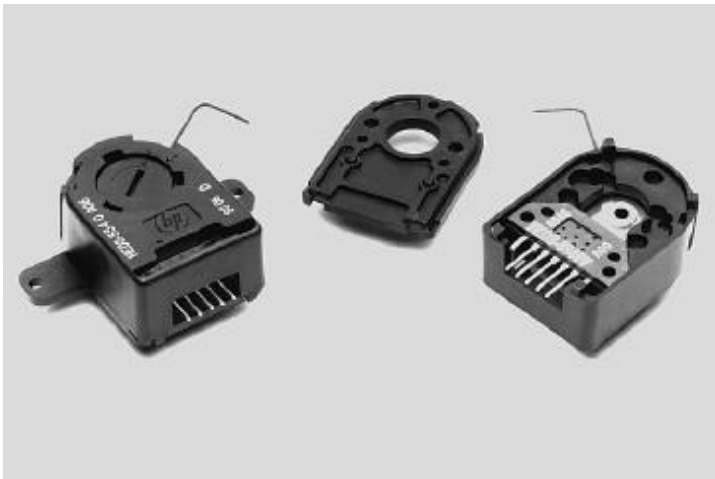
Egyes esetekben vezérléstől független fordulatszámmérés szükséges:

- Inkrementális optikai vagy mágneses jeladó alkalmazása.

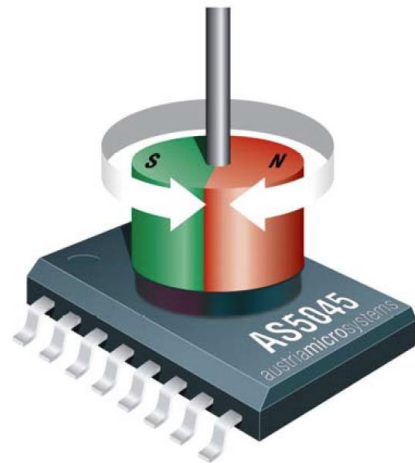


Szöghelyzet mérés

Ugyanaz elmondható, mint a DC motorokkal kapcsolatban:



Optikai elvű érzékelők



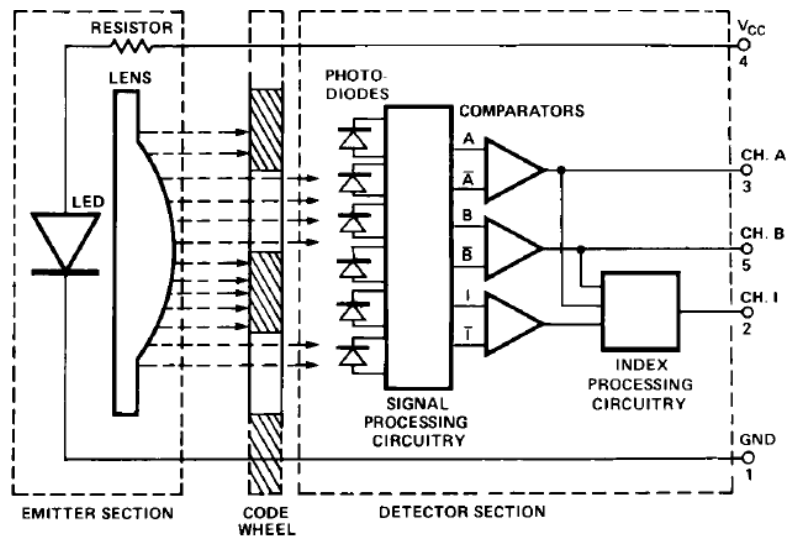
Mágneses elvű érzékelők



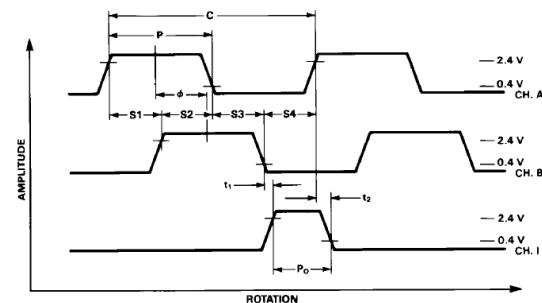
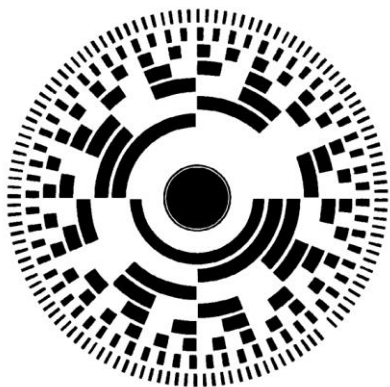
Szöghelyzet mérés

Optikai szögjeladó (encoder):

Inkrementális

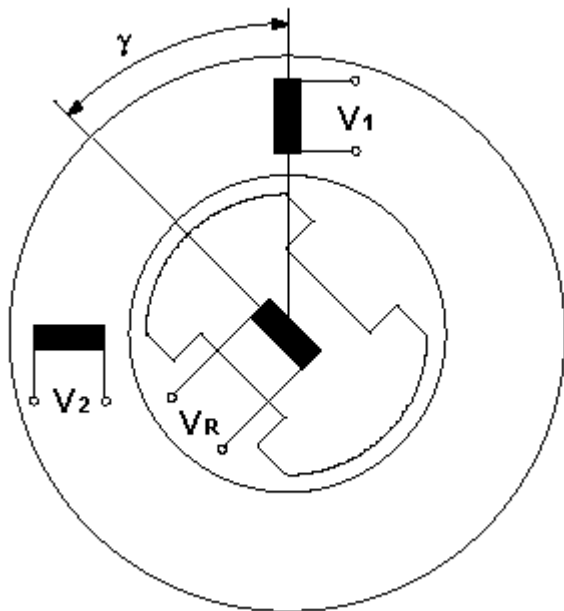


Abszolút

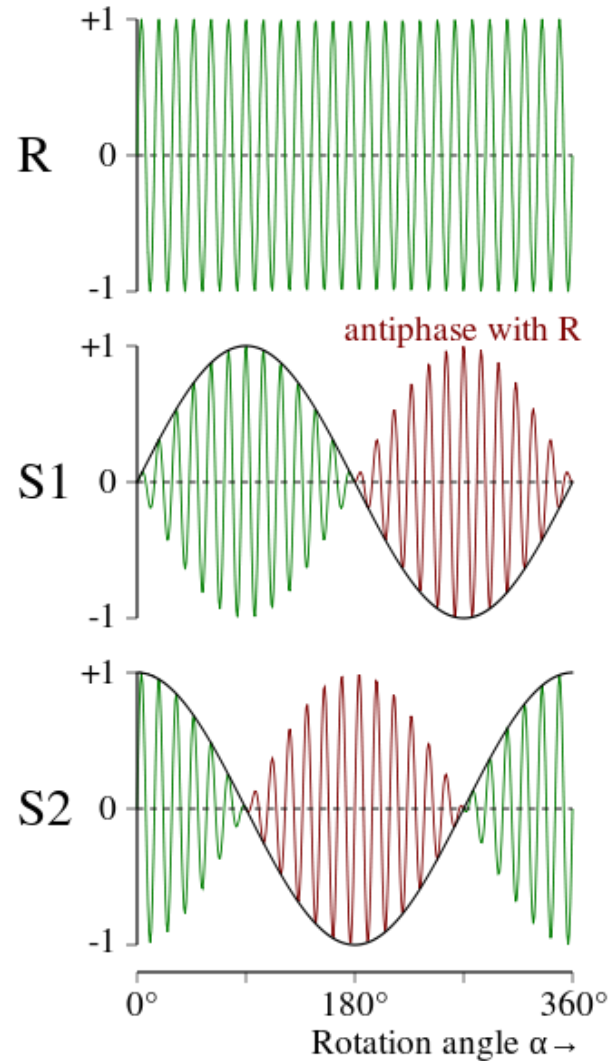


Szöghelyzet mérés

Rezolver:



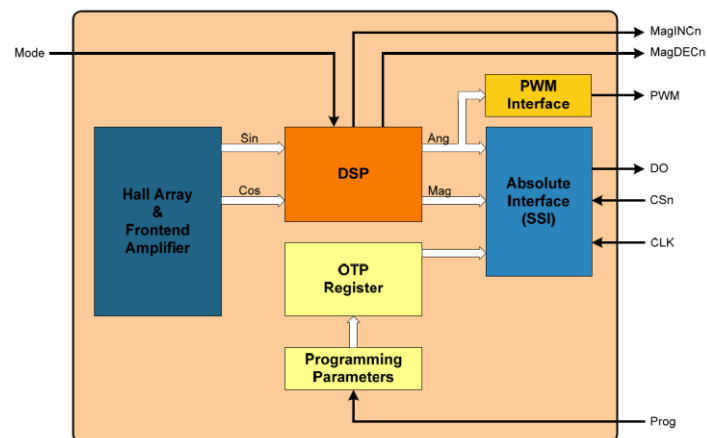
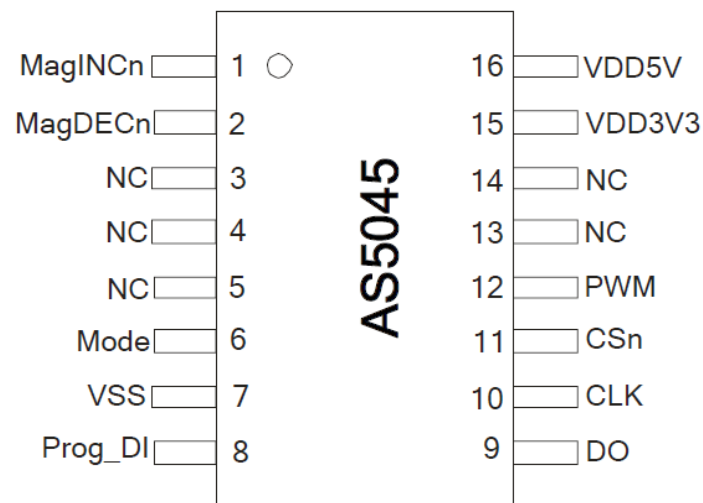
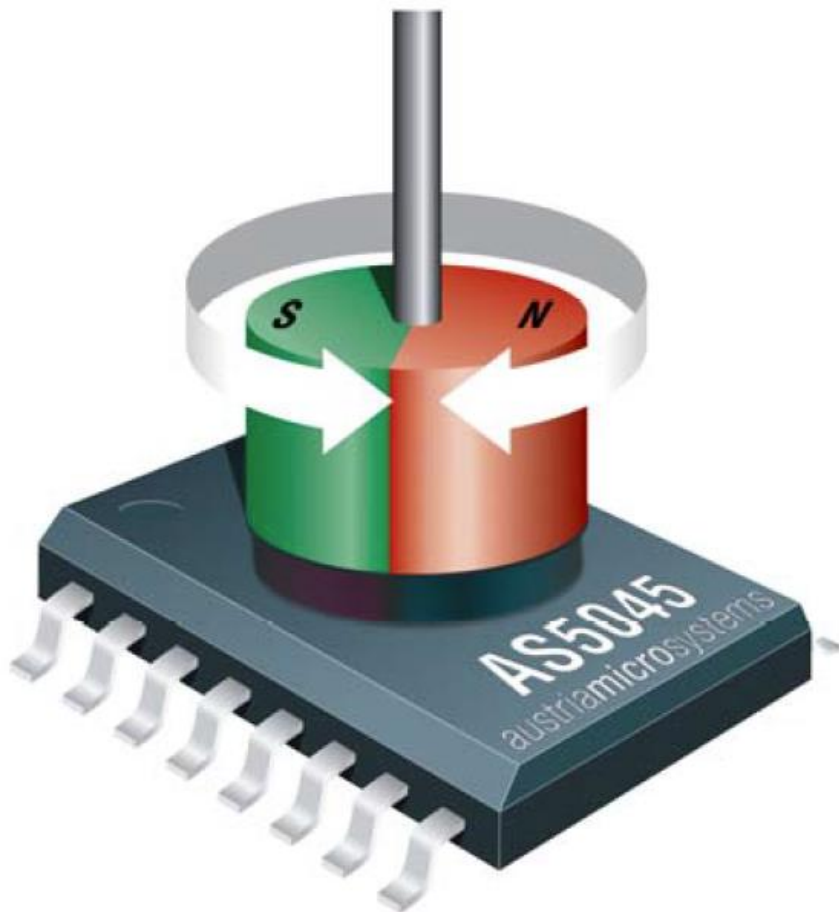
„Forgó transzformátor”



Szöghelyzet mérés

Mágneses abszolút szögjeladó:

AMS (Austria)

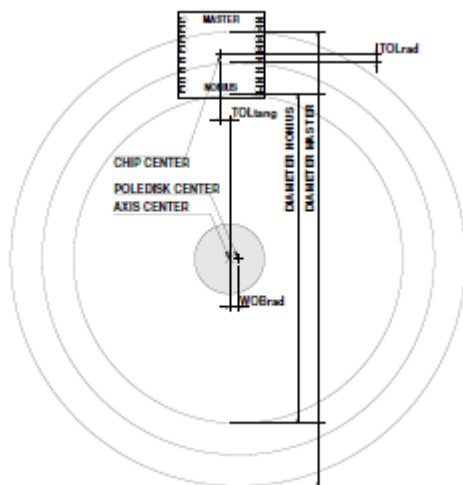


Szöghelyzet mérés

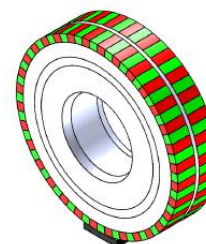
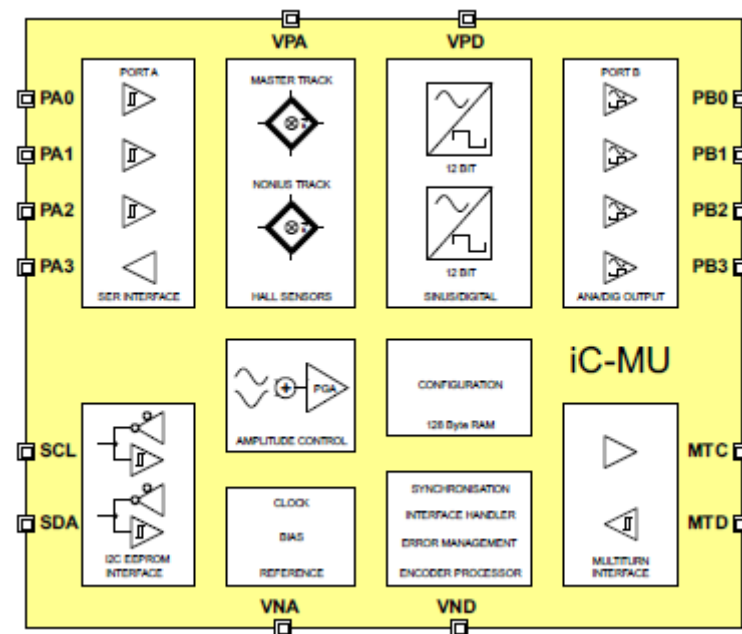
Mágneses abszolút szögjeladó: „off axis”

iC-Haus (DE)

- Master track - Nonius track
- A nonius track-en 1-el kevesebb domén
- Pozíciómérés egy-egy doménen belül 14 bit felbontással
- A domének sorszáma egyértelműen meghatározható az mért értékekből

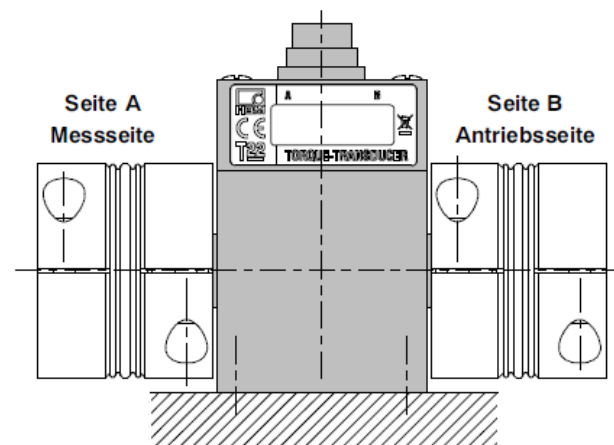
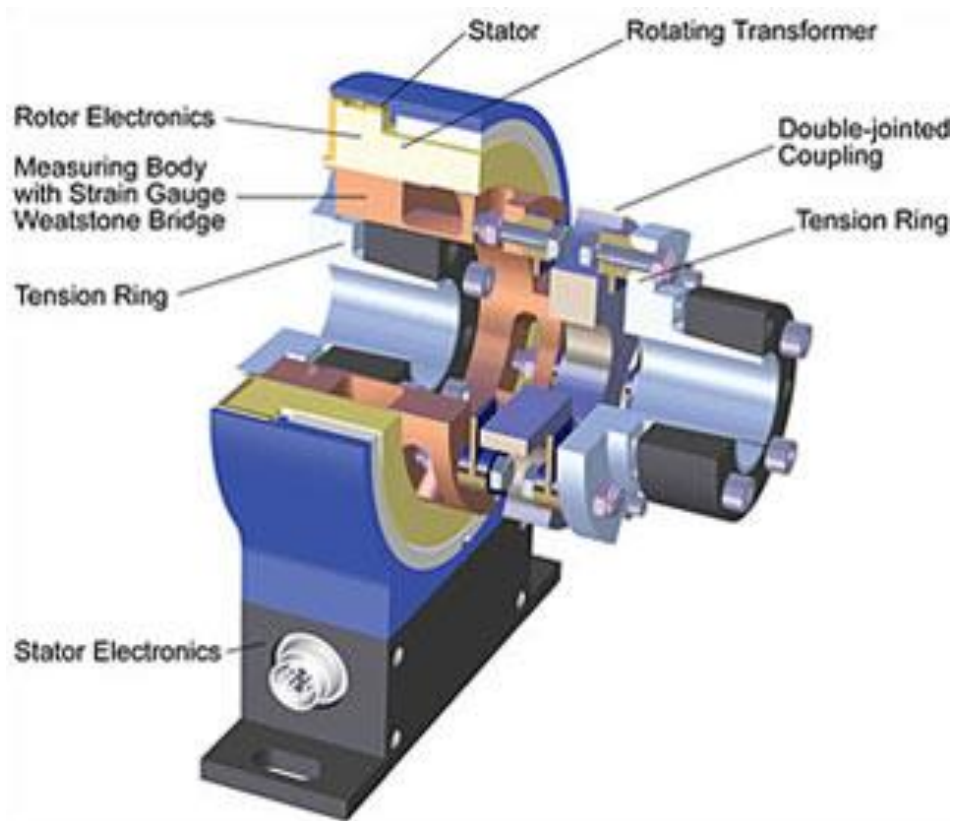


Number of pole pairs		16	32	64
Master track diameter	[mm]	13,04	26,08	52,15
Chip center to axis center	[mm]	4,72	11,24	24,28
Nonius track diameter	[mm]	5,84	18,88	44,95
Master track pole width	[mm]	1,28	1,28	1,28
Nonius track pole width	[mm]	0,81	0,96	1,12



Nyomatékmérés

Nyomatékmérő szenzor:

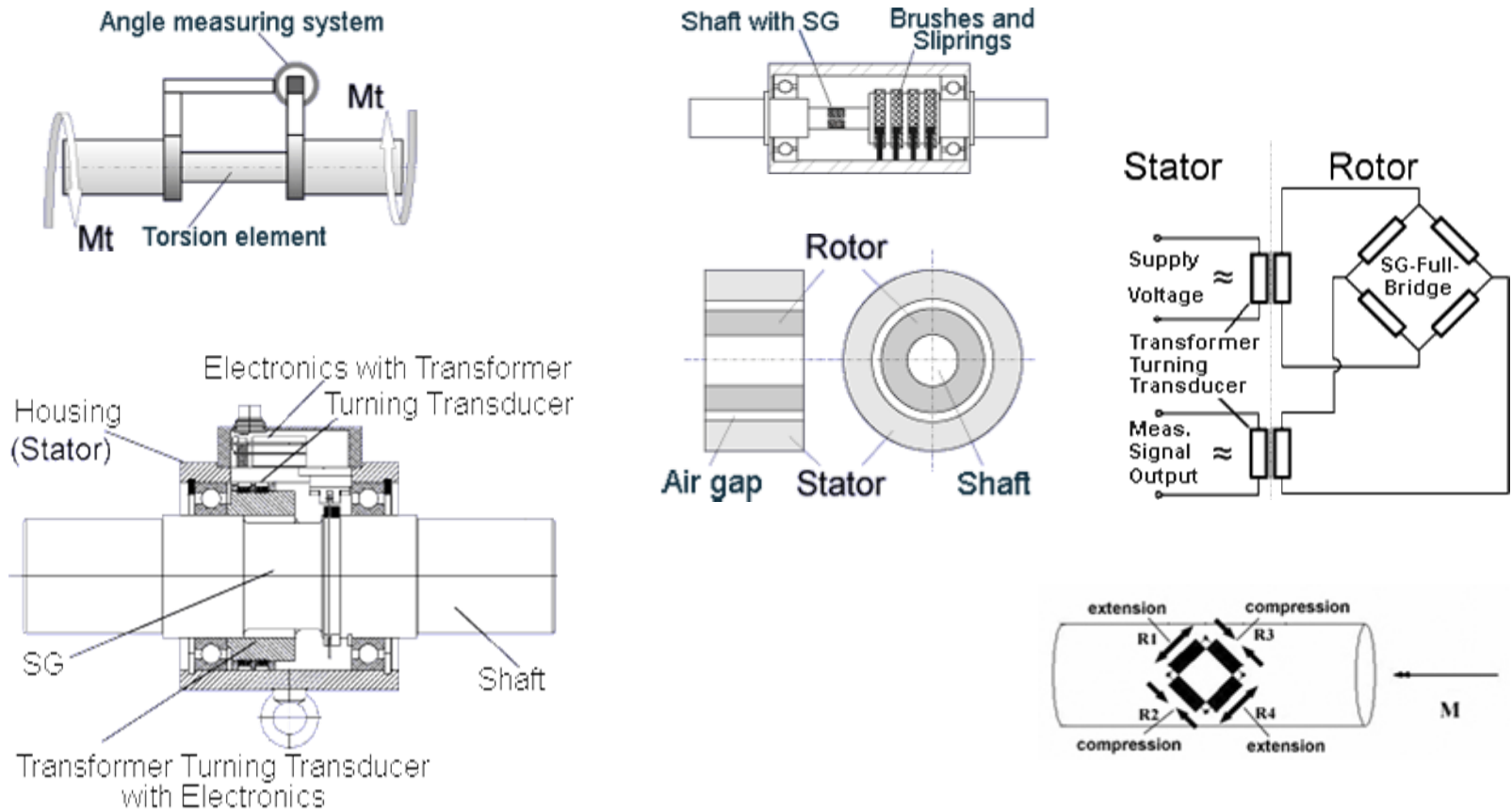


forgó tengelyen való mérés



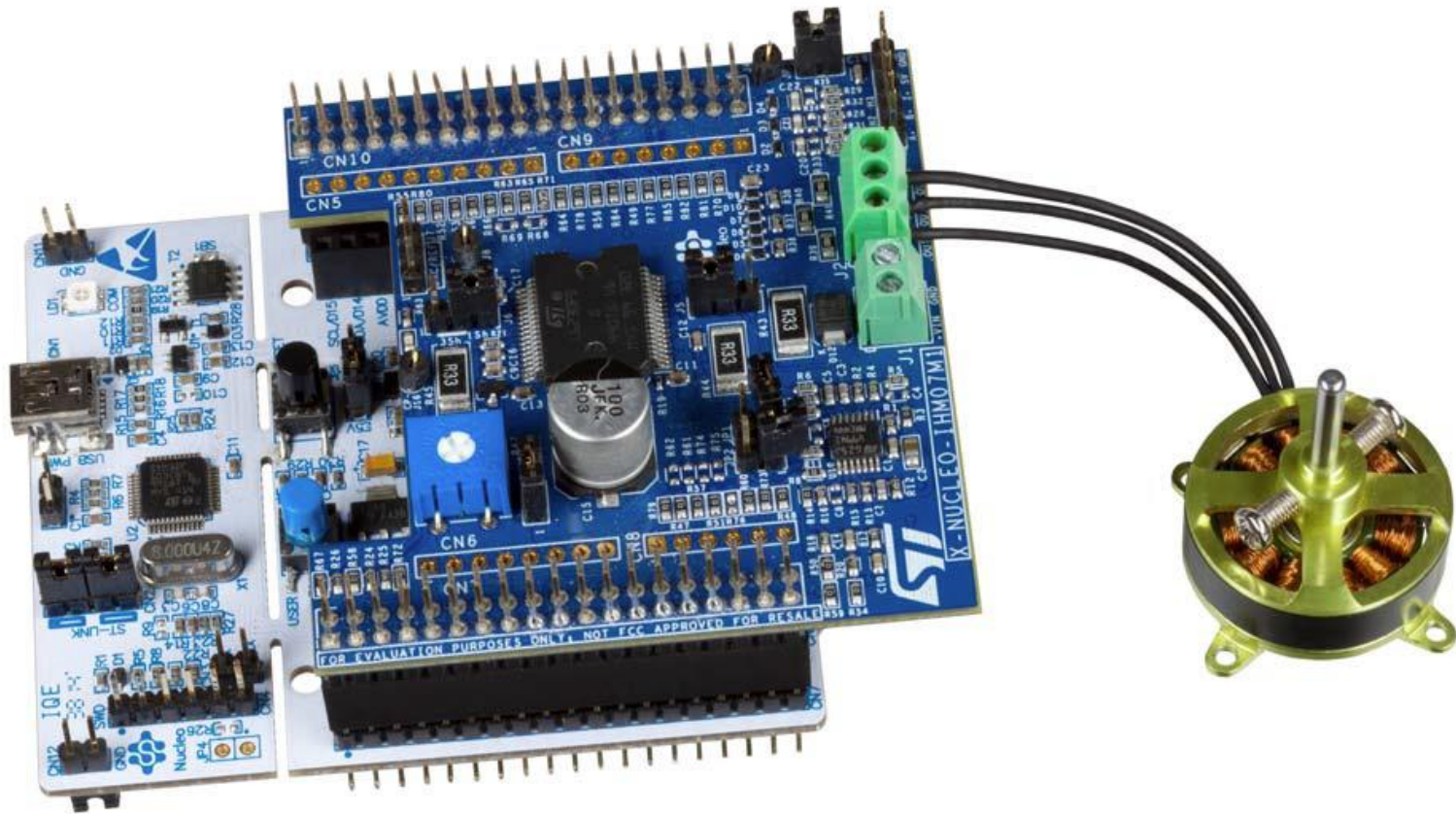
Nyomatékmérés

Nyomatékmérő szenzor megvalósítási elvei:



BLDC motorvezérlő példa

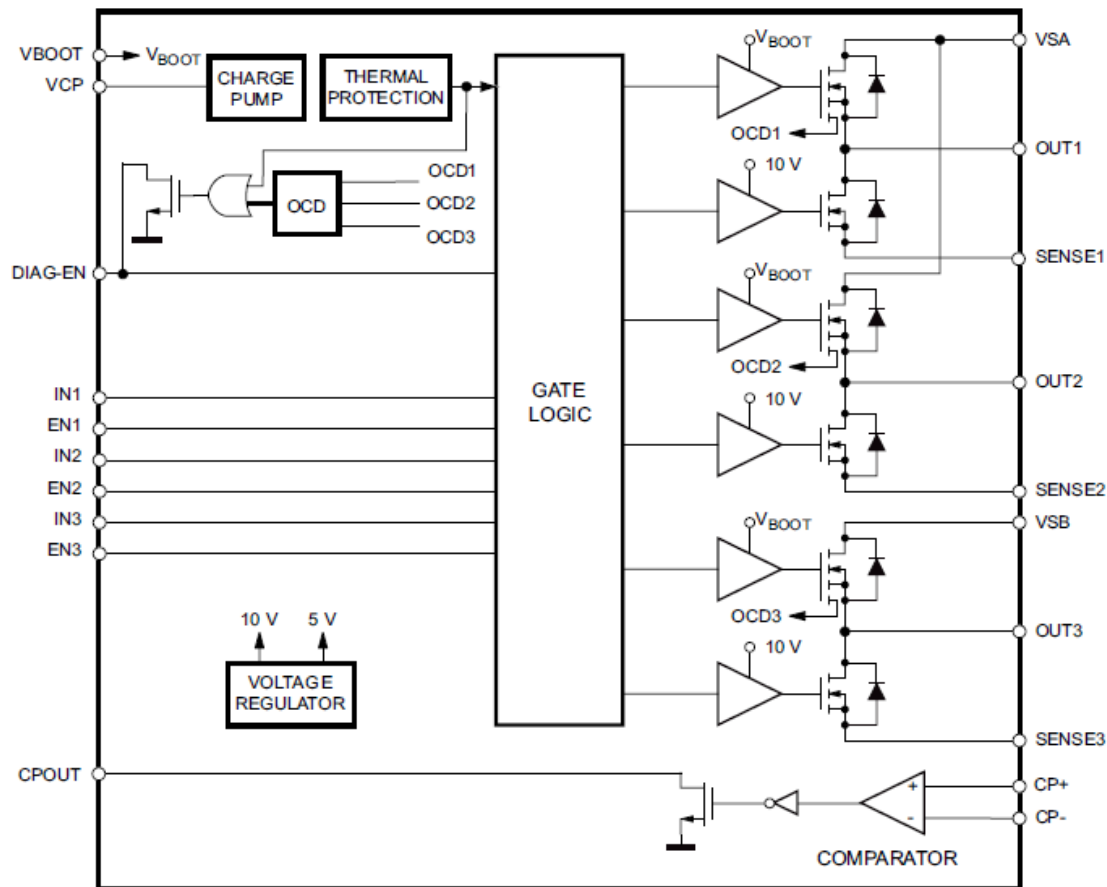
ST Nucleo BLDC Evaluation Kit:



BLDC motorvezérlő példa

DMOS driver for three-phase brushless DC motor

- 8 - 52 V működési feszültség
- 2.8 A kimeneti áram
- $R_{DS(on)}$ 0.73 Ω
- 100 kHz maximális PWM frekvencia
- Integrált szabadonfutás biztosító diódák
- Disszipációmentes árammérés és túláramvédelem
- Védelmi funkciók
- Diagnosztikai kimenet



BLDC motorvezérlő példa

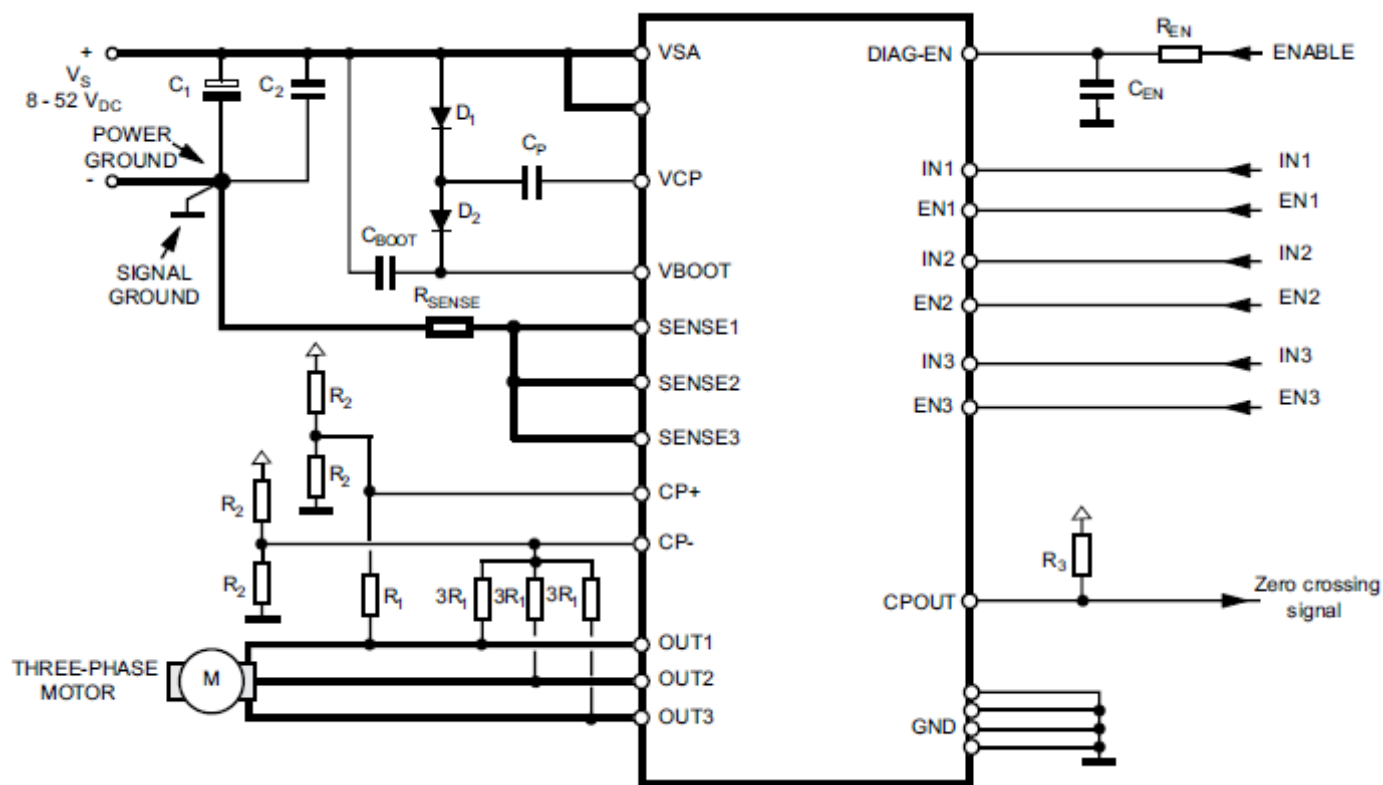
Logikai vezérlés:

ENn	INn	Upper DMOS switch	Lower DMOS switch
0	0	Off	Off
0	1	Off	Off
1	0	Off	On
1	1	On	Off

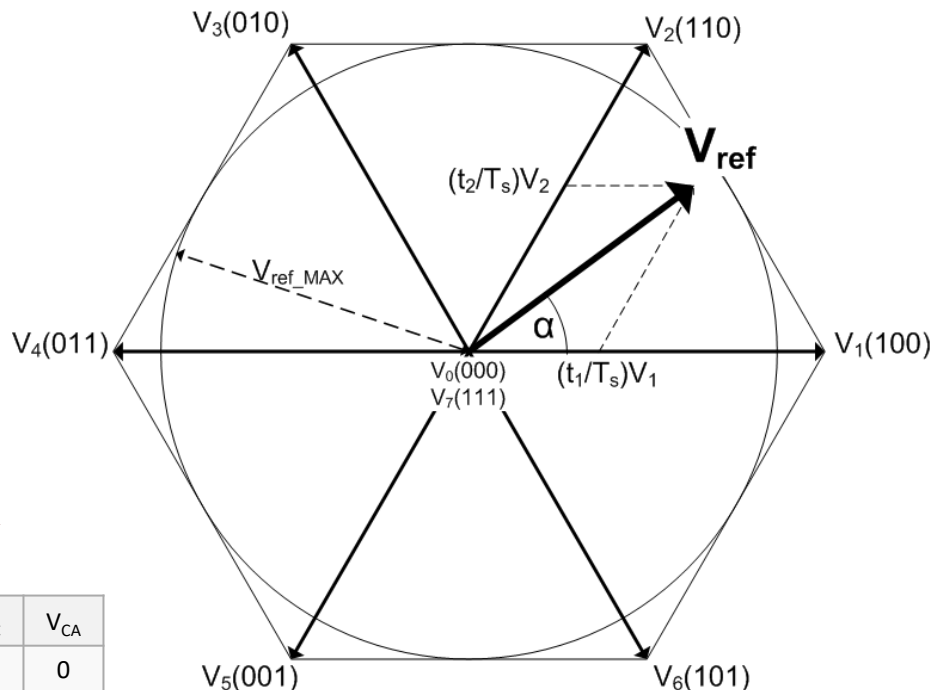
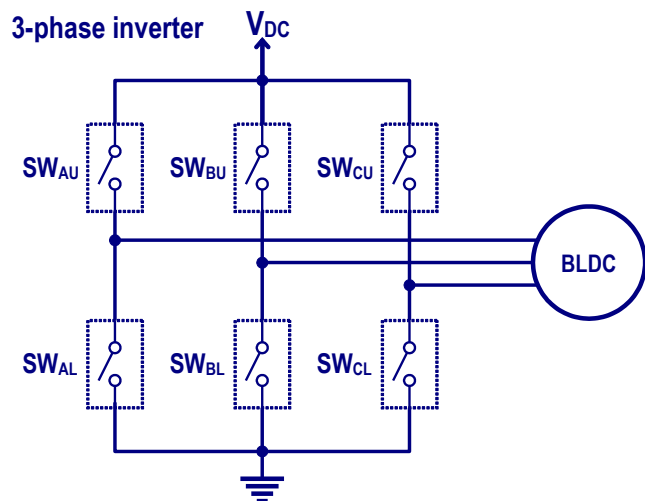


BLDC motorvezérlő példa

6-lépéses BLDC vezérlés megvalósítása



BLDC motorvezérlő példa



A 3-fázisú H-híd táp- és földoldali kapcsolóinak ellenütemű vezérlése mellett:

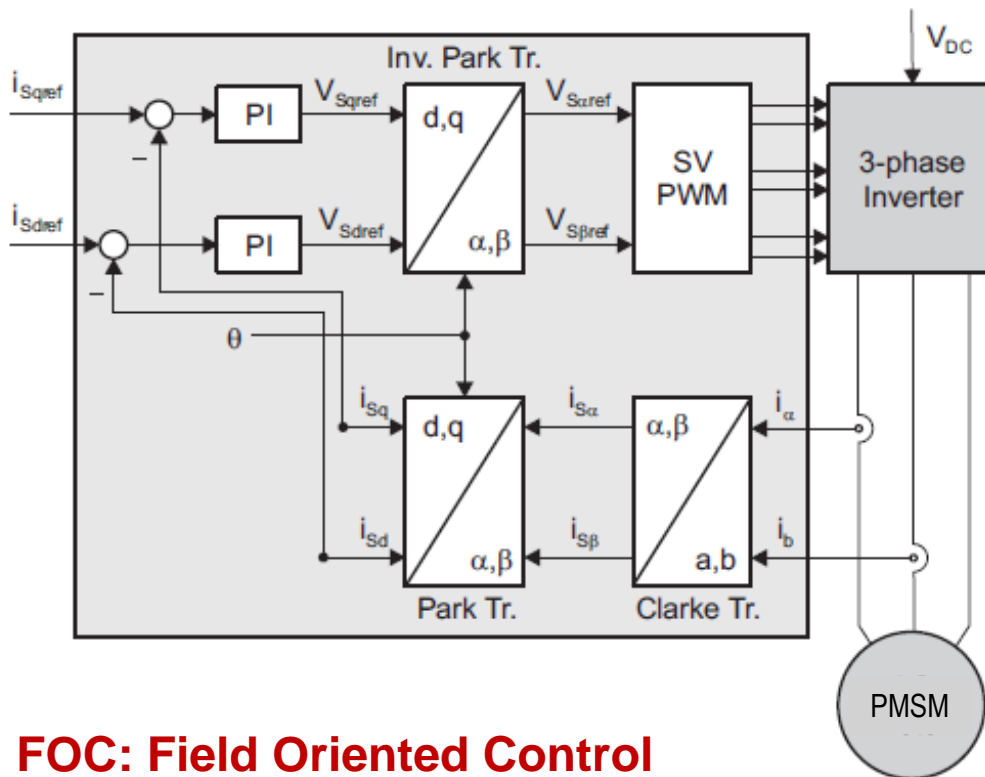
Vector	A ⁺	B ⁺	C ⁺	A ⁻	B ⁻	C ⁻	V _{AB}	V _{BC}	V _{CA}
V ₀ = {000}	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	0	0	0
V ₁ = {100}	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	+V _{dc}	0	-V _{dc}
V ₂ = {110}	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	0	+V _{dc}	-V _{dc}
V ₃ = {010}	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	-V _{dc}	+V _{dc}	0
V ₄ = {011}	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	-V _{dc}	0	+V _{dc}
V ₅ = {001}	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	0	-V _{dc}	+V _{dc}
V ₆ = {101}	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	+V _{dc}	-V _{dc}	0
V ₇ = {111}	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	0	0	0

- Alapesetben: 6-pontos szinusz approximáció.
- PWM-mel: korlátlanul finomítható – a 3-fázisú sin függvény nagy pontosságú előállítására.



Mezőorientált (FOC) szabályozás

Tipikusan a (szinuszmezős) PMS motorok irányítására:



FOC: Field Oriented Control

A lényege:

- A 120° -os 3-tengelyű (nem ortogonális) koordináta rendszerről áttérünk 90° -os ortogonális rendszerre – (q,d) irányú vektorok (Clark és Park transzformáció).
- A szabályozást az egymástól független (q,d) irányú komponensekre valósítjuk meg.
- Az eredményt visszatranszformáljuk 3 fázisú rendszerre (inverz Park transzformáció).

Nem szinuszmezős motorokra (trapéz): korrekciókkal alkalmazható, egyébként nagyobb nyomatéklüktetéssel működnek.

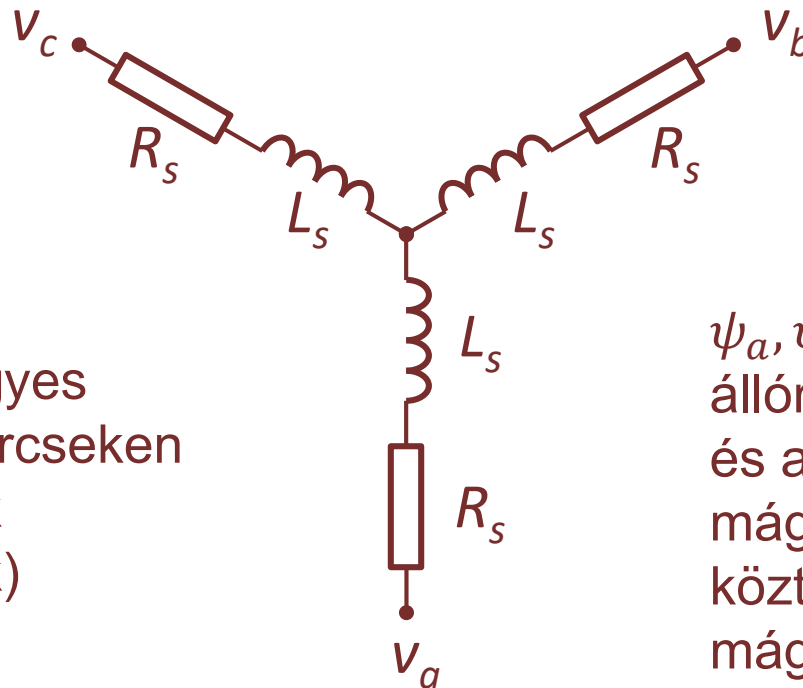


A PMS motor

A v_a, v_b, v_c fázisfeszültségekre vonatkozó Kirchoff törvény a forgórész álló helyzetében (nincs indukált feszültség):

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}$$

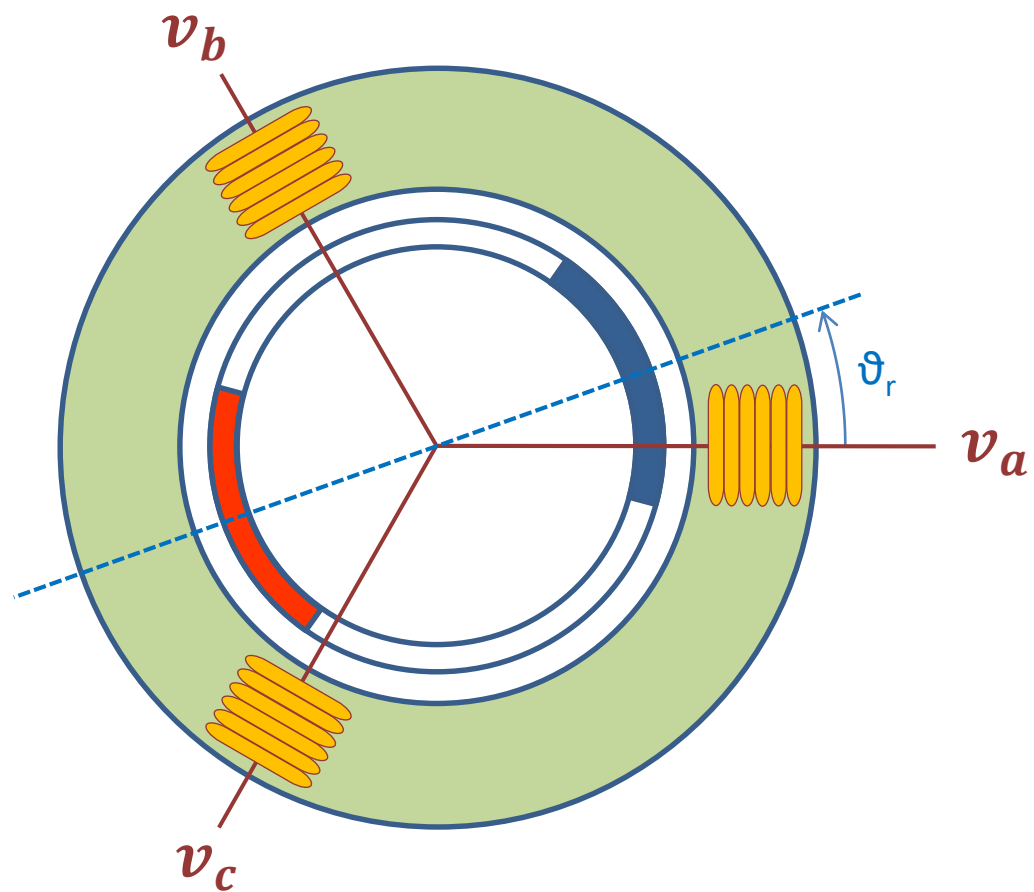
i_a, i_b, i_c az egyes állórész tekercseken folyó áramok (fázisáramok)



ψ_a, ψ_b, ψ_c az egyes állórész tekercsek és a forgórész mágnesek pólusai közt előálló mágneses fluxus



Koordináta-rendszerek



PMS Motor

A ψ_a, ψ_b, ψ_c teljes fluxus több összetevőből áll:

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{am} \\ \psi_{bm} \\ \psi_{cm} \end{bmatrix}$$

- $\psi_{am}, \psi_{bm}, \psi_{cm}$ az állandó mágnes és az állórész tekercsek közti fluxus
- L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} az állórész tekercsek öninduktivitása
- $L_{ab}, L_{ac}, L_{ba}, L_{bc}, L_{ca}, L_{cb}$, az állórész tekercsek közötti kölcsönös induktivitások

$$L_{ba} = L_{ab} \quad L_{ca} = L_{ac} \quad L_{cb} = L_{bc}$$

Feltételezzük, hogy

- Az állórész centrálisan szimmetrikus kialakítású,
- A tekercsek azonos anyagúak, azonos menetszámúak, és a tekercselés módja is azonos.

Mindegyik állórész-tekercsnek L_s öninduktivitást és tekercspároknak M_s kölcsönös induktivitást tulajdonítunk.



PMS Motor

N pólusú kialakítást feltételezve a ϑ_e villamos szögelfordulás N -szerese a mechanikainak:

$$\vartheta_e = N\vartheta_r$$

Az induktivitások az elfordulás szögétől függően a következőképpen alakulnak:

$$L_{aa} = L_s + L_m \cos(2\vartheta_e)$$

$$L_{bb} = L_s + L_m \cos\left(2\left(\vartheta_e - \frac{2\pi}{3}\right)\right)$$

$$L_{cc} = L_s + L_m \cos\left(2\left(\vartheta_e + \frac{2\pi}{3}\right)\right)$$

$$L_{ab} = -M_s - L_m \cos\left(2\left(\vartheta_e + \frac{\pi}{6}\right)\right)$$

$$L_{bc} = -M_s - L_m \cos\left(2\left(\vartheta_e + \frac{\pi}{6} - \frac{2\pi}{3}\right)\right)$$

$$L_{cb} = -M_s - L_m \cos\left(2\left(\vartheta_e + \frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3}\right)\right)$$

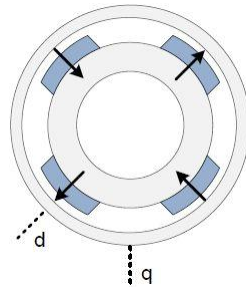
L_m az induktivitásoknak az elfordulás szögétől való függését leíró tényező



PMS Motor

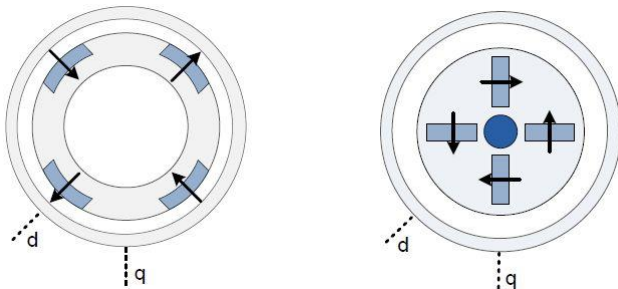
A gyakorlatban különböző kialakítású PMS motorokat gyártanak. A két legfontosabb alapeset:

- SM-PMSM – Surface Mounted PMSM – a mágnesek a forgórész felületén helyezik el.



- Izotrop szerkezet
- Szöghelyzettől független paraméterek
- A q és d irányú induktivitások azonosak

- I-PMSM – Interior Mounted PMSM – a mágnesek a forgórész tömbjébe süllyesztve helyezik el.



- Nem-izotrop szerkezet
- Erős szöghelyzet-függés a paraméterekben
- $L_d < L_q$
- Nagyobb nyomaték érhető a jobb mezőgyengítési lehetőségek következtében.



PMS Motor

SM-PMSM motorokra a centrális szimmetriát (izotrop jelleget) kihasználva egyszerűsíthetjük az egyenleteket.

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m & L_m \\ L_m & L_s & L_m \\ L_m & L_m & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{am} \\ \psi_{bm} \\ \psi_{cm} \end{bmatrix}$$

A ön- és kölcsönös induktivitásokat két konstansra, L_s, L_m -re redukáljuk.

Az állandó mágnes és az állórész-tekercecsek közötti fluxuskapcsolat az elektromos szöghelyzet függvénye. Feltételezve, hogy mindegyik tekercs az állandó mágnessel azonos fluxust generál a fluxuskapcsolatot egyetlen ψ_m tényezővel írhatjuk le.

$$\begin{bmatrix} \psi_{am} \\ \psi_{bm} \\ \psi_{cm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_m \cos \vartheta_e \\ \psi_m \cos \left(\vartheta_e - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \psi_m \cos \left(\vartheta_e + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix}$$



PMS Motor

A PMS motor egyszerűsített modelljére így a következő formát kapjuk:

(elvégezve a harmadik tagban az idő szerinti differenciálást, és alkalmazva $\omega = \dot{\vartheta}$ jelölést)

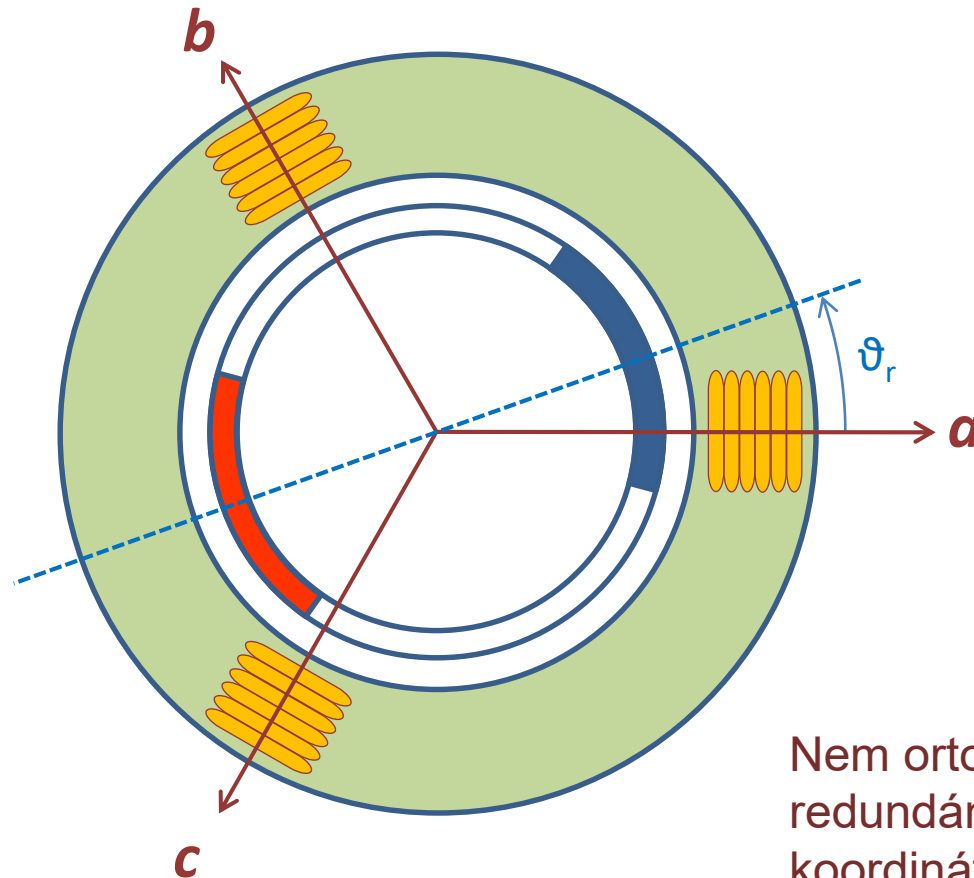
$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & L_m & L_m \\ L_m & L_s & L_m \\ L_m & L_s & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \psi_m \omega \begin{bmatrix} \sin \vartheta_e \\ \sin \left(\vartheta_e - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \left(\vartheta_e + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix}$$

Az i_a, i_b, i_c áramok nem függetlenek (I. Kirchoff-törvény), továbbá az (a, b, c) 120° -os koordinátarendszer nem ortogonális, ezért célszerű áttérni más leírásra. Ez a Clark és Park transzformációkkal lehetséges.



Koordináta-rendszerek

Állórészhez rögzített 120° -os koordináta rendszer. Ebben a rendszerben jelennek meg közvetlenül az i_a, i_b, i_c fázisáramok.



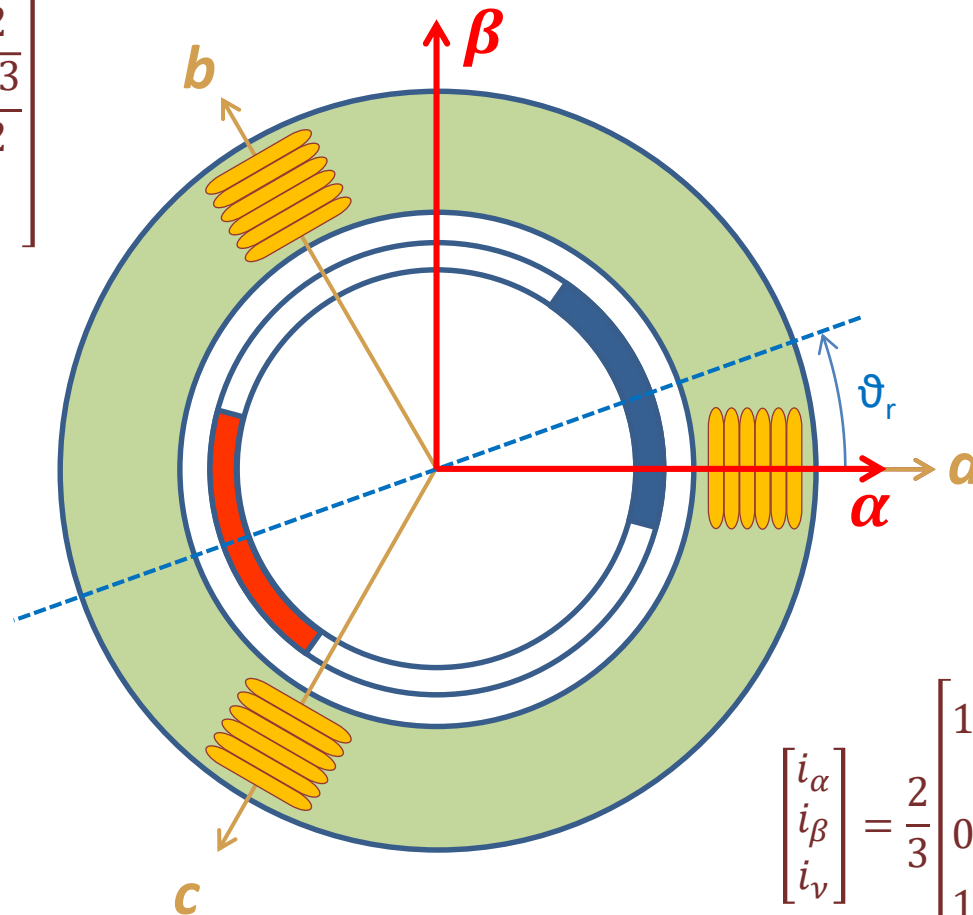
Nem ortogonális,
redundáns
koordináta-rendszer.



Koordináta-rendszerek

Clark transzformáció: állórészhez rögzített ortogonális koordináta-rendszer

$$C = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_\nu \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$



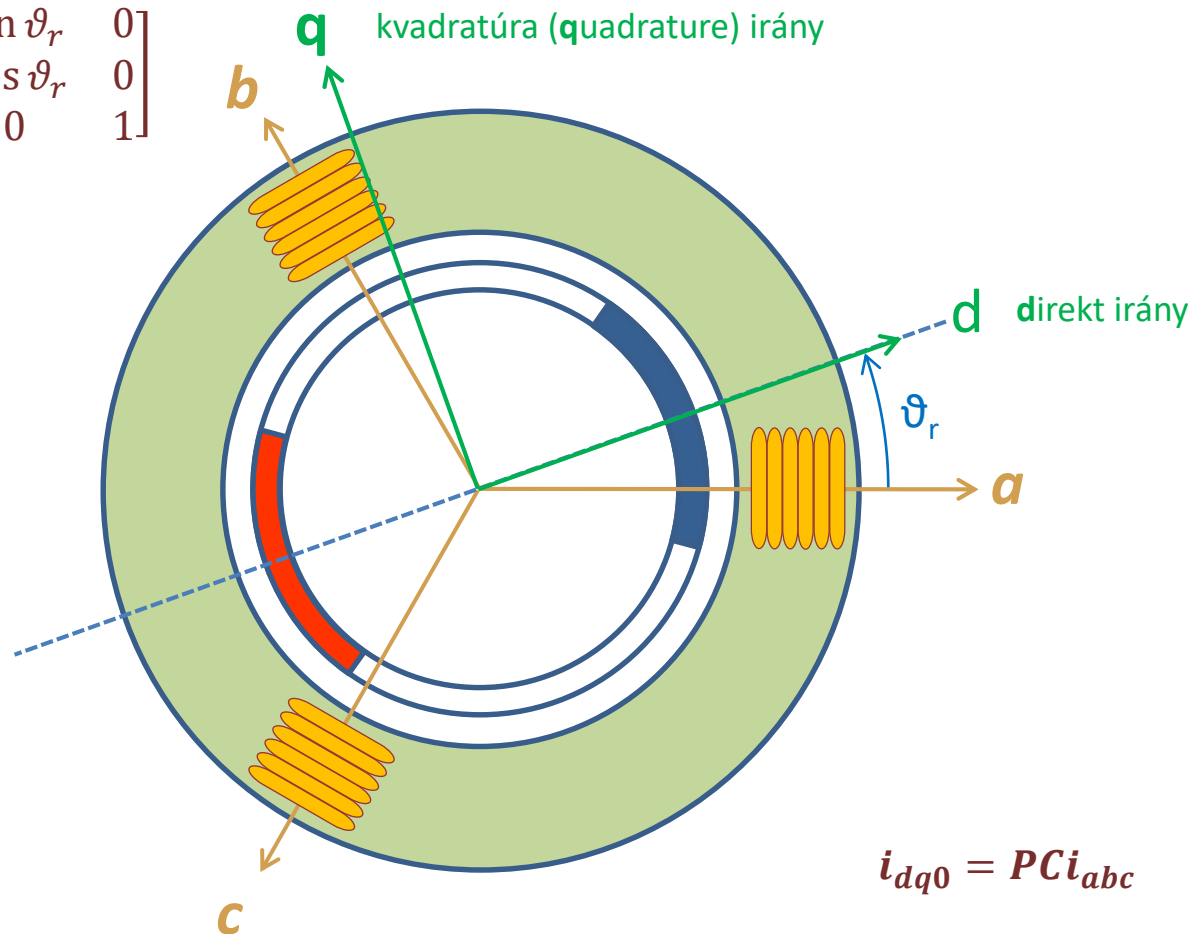
Koordináta-rendszerek

Park transzformáció: forgórészhez rögzített ortogonális koordináta-rendszer – forgató mátrix alkalmazása

$$P = \begin{bmatrix} \cos \vartheta_r & \sin \vartheta_r & 0 \\ -\sin \vartheta_r & \cos \vartheta_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$i_{dq0} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}$$

$$i_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$



PMS Motor

Clark és Park transzformáció alkalmazásával

$$i_{dq0} = PCi_{abc}$$

- i_d direkt áram
- i_q kvadratúra áram
- i_0 nulla sorrendű áram

A motoráramot általában kételemű vektorként értelmezzük, mert, ha az $i_a + i_b + i_c = 0$ Kirchoff csomóponti törvény teljesül, akkor a nulla sorrendű áram zérus. Csillag kapcsolású motorok esetén ez eleve teljesül, Δ -kapcsolású motoroknál a gyakorlatban általában elhanyagolható.

Hasonlóan a feszültségekre:

$$v_{dq0} = PCv_{abc}$$

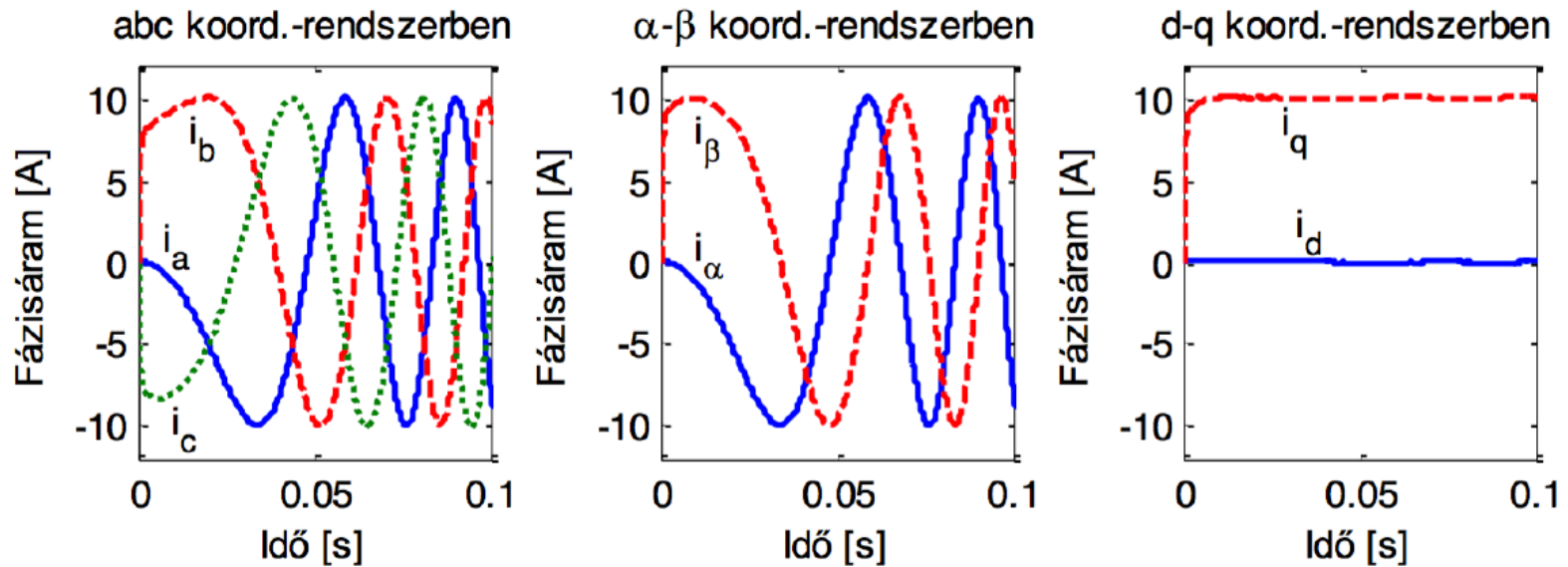
- v_d direkt komponens
- v_q kvadratúra komponens
- v_0 nulla sorrendű komponens

A Park transzformáció alkalmazása megköveteli a forgórész abszolút szöghelyzetének mérését.



PMS Motor

Clark és Park transzformáció alkalmazása révén a fázisáramok a következőképpen alakulnak (példa):



Ennek alapján izotrop szerkezetű PMS motorok esetében egyetlen komponens, a q -irányú áram szabályozásával megoldható a teljesítményszabályozás.



PMS Motor

Clark és Park transzformáció alkalmazása révén motor forgásából eredő hatás a következőképpen alakul:

$$-PC\psi_m\omega \begin{bmatrix} \sin \vartheta_e \\ \sin \left(\vartheta_e - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \left(\vartheta_e + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} = \psi_m\omega \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Az állandómágnes fluxusából eredő indukált feszültségnek is csak q irányú komponense hat – a tengely szöghelyzetétől függetlenül.

Az indukált feszültség természetesen függvénye a forgási körfrekvenciának.



Inverz transzformációk

A Clark és Park transzformációknak létezik egyértelmű inverze, így a megvan a lehetőség a fizikailag előállítható (a, b, c) fázisáramokra és feszültségekre.

Az inverz Park transzformáció:

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta_r & -\sin \vartheta_r & 0 \\ \sin \vartheta_r & \cos \vartheta_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Az inverz Clark transzformáció:

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$$



Mezőorientált (FOC) szabályozás

A PMS motorok szabályozása a gyakorlatban a fázisáramok szabályozása révén a motor nyomatékának szabályozását jelenti – ezt nevezzük **mezőorientált szabályozásnak** (Field Oriented Control – FOC).

Ezáltal a motor fordulatszámának szabályozása is egyszerűen megvalósítható pl. az áram-alapjelekre ható fordulatszám-szabályozó hurok alkalmazásával. A fordulatszám (forgási frekvencia) mérése mikroszámítógépes irányítás megvalósítása esetén nem igényel egyéb mérőeszközt.

A mezőorientált szabályozás révén a motor terheléstől függő munkapontja állítható be a nyomaték-fordulatszám jelleggörbén. Ez forgásiránytól függetlenül hajtás- és fékezés üzemmódban is megvalósítható, tehát a mezőorientált szabályozás a jelleggörbe egészen képes szabályozni – 4-siknegyedes (4-quadrant – 4q) szabályozás.



Mezőorientált (FOC) szabályozás

A mezőorientált szabályozást – függetlenül attól, hogy általában elegendő a q irányú áram szabályozása – érdemes mindkét áramkomponensre alkalmazni. Ennek előnyei:

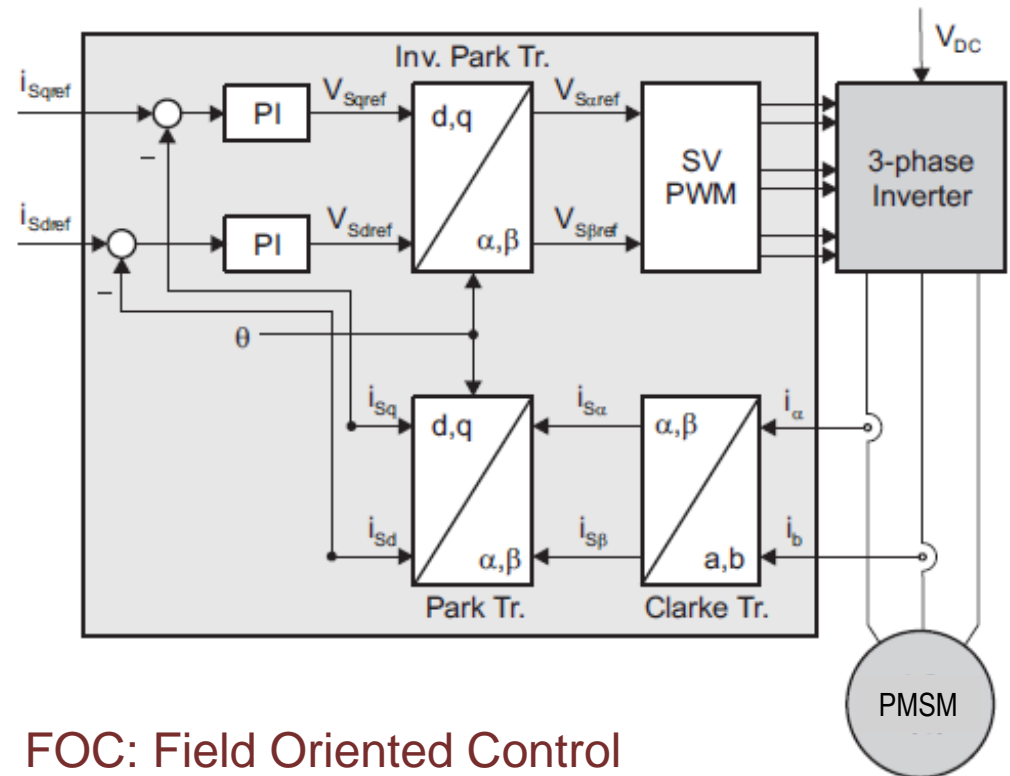
- Alapjelként $i_d = 0$ alkalmazása kompenzálja a motor anizotrópiájából eredő hatásokat.
- i_d megfelelő megválasztásával (általában $i_d < 0$ esetén) *mezőgyengítés* valósítható meg. Ennek eredményeként a névleges fordulatszámnál nagyobb fordulatszámok érhetőek el, azaz a motor működési tartománya kibővíthető. Ennek ára a nagyobb indukált feszültség, amely káros lehet a motorra, az inverterre és más elektronikai egységekre nézve.



Mezőorientált (FOC) szabályozás

Megvalósítás:

- Az i_a, i_b, i_c fázisáramok mérése
- A fázisáramokra Clark- és Park transzformáció alkalmazása – áttérés az i_d, i_q áramokra.
- Visszacsatolt szabályozás megvalósítása az i_d, i_q áramokra áram-alapjelek alkalmazásával. A szabályozó kimenete a v_d, v_q motorfeszültségek.
- Inverz Park- és Clark transzformációval a v_a, v_b, v_c fázisfeszültségek előállítása.



FOC: Field Oriented Control

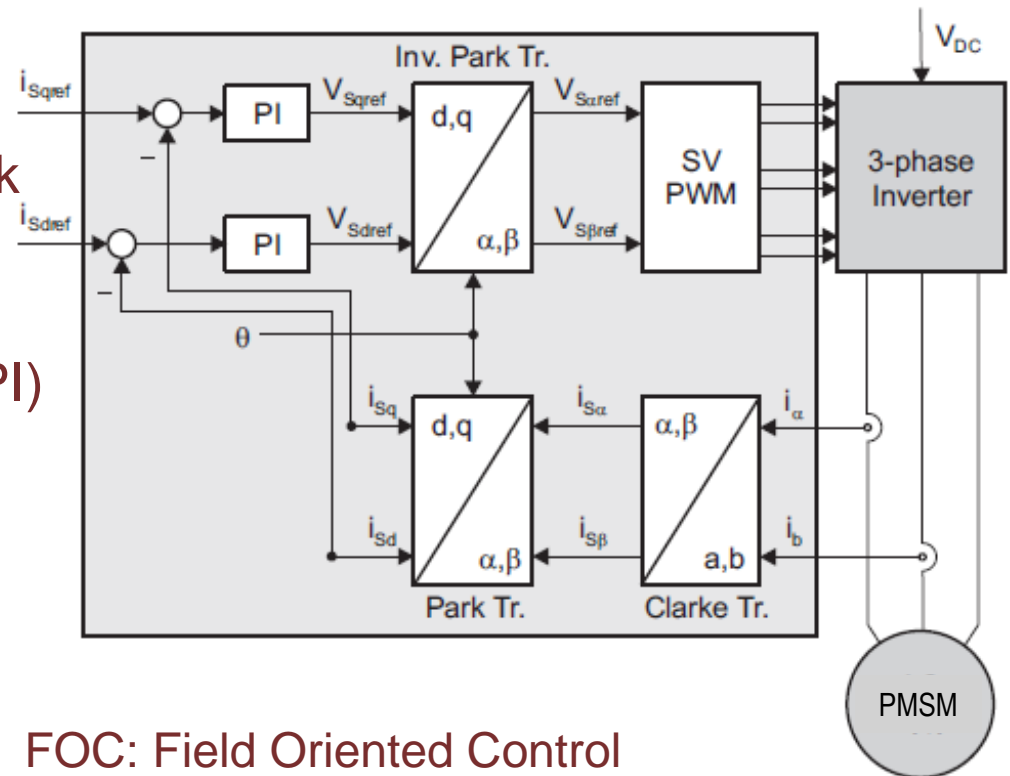
- A fázisfeszültségek kiadása a motor irányában impulzusszélesség moduláció (PWM) útján.



Mezőorientált (FOC) szabályozás

Szabályozás:

- Az egymásra merőleges i_d, i_q áramok egymástól függetlenül szabályozhatók (szétcsatolt rendszer).
- Ma a leggyakrabban használt módszer a PID (PI) szabályozás, de alkalmaznak optimális LQ vagy robusztus (L^∞) szabályozásokat is.



Megjegyzések:

FOC: Field Oriented Control

- Elegendő a három fázisáram közül kettő mérése, mivel a Kirchoff csomóponti törvény szerint a harmadik komponens az előző kettő alapján kiadódik.



Mezőorientált (FOC) szabályozás

A mezőorientált szabályozás előnyei:

- Pontos fordulatszám és nyomatékszabályozás valósítható meg akár egyidejűleg is.
- A legkisebb fordulatszám- ill. nyomatéklüktetést eredményezi.
- Jól kezelhetők a motorok eltérő felépítéséből eredő tulajdonságok.
- A d komponens megfelelő szabályozásával (negatív i_d választásával) egyszerű és áttekinthető módon lehet *mezőgyengítést* megvalósítani, amely révén a motor fordulatszáma hatékonyan növelhető.

Hátrányok:

- Megvalósítása nagyobb számítástechnikai kapacitást igényel.
- A transzformációk elvégzése igényli a forgórész abszolút szöghelyzetének mérését, ami költségnövelő tényező.
- A precíz árammérés megvalósítása költséges lehet.



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

Dr. Soumelidis Alexandros



email: soumelidis@mail.bme.hu



BME KÖZLEKEDÉSMÉRNÖKI ÉS JÁRMŰMÉRNÖKI KAR
32708-2/2017/INTFIN SZÁMÚ EMMI ÁLTAL TÁMOGATOTT TANANYAG