

INVERTERRŐL TÁPLÁLT VILLAMOS HAJTÁSOK

1. Bevezető

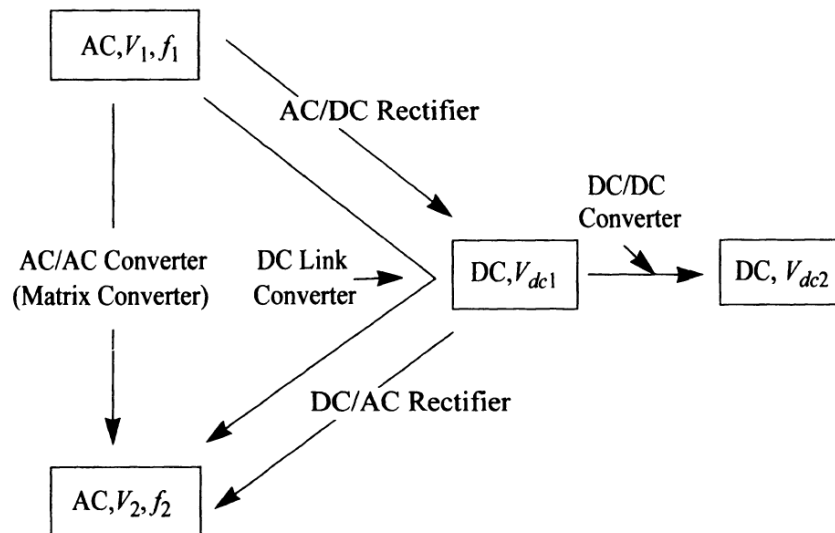
A mai modern villamos hajtásokban (ipari hajtások és főként elektromos gépjárművek esetén) alkalmazott villamos forgógépek a következők [1]: DC kefések motorok, állandó mágneses szinkronmotorok (PM brushless motors), indukciós motorok (aszinkron motorok), illetve kapcsolt reluktancia motorok (Switched reluctance motors (SRMs)). Bármilyen jellegű villamos hajtás esetén a motorokon különböző manipulációkat hajtunk végre, melyek lehetnek például indítás, fékezés, fordulatszám vagy nyomatékszabályozás, forgásirányváltás stb. Ezek megvalósítására a különböző villamos forgógépek esetén más és más lehetőség adódik. A továbbiakban a leggyakrabban alkalmazott villamos forgógépeken keresztül tekintjük át a különböző műszaki megoldásokat.

Váltakozó áramú aszinkron vagy szinkrongép fordulatszámváltoztatásának leghatékonyabb megoldása az állórész feszültség frekvenciájának változtatása, amellyel széles fordulatszám tartományban folyamatosan szabályozható hajtást lehet megvalósítani (léteznék még más megoldások is, például póluspárszám csere, szlip változtatása stb., de ezek hatékonyságban messze elmaradnak az említett módszer mellett). A megoldás elve régóta ismert, de csak a teljesítményelektronika rohamos fejlődése tette lehetővé, hogy minden műszaki követelményt kielégítő, megbízható és költségek szempontjából is elfogadható inverterek kerüljenek kifejlesztésre és gyártásra.

Az inverterről történő táplálás lehetőséget teremtett, hogy a motorok névleges f tápfrekvenciájának nem kell megegyeznie a hálózati 50/60 Hz-es frekvenciával. Így megjelentek olyan nagy fordulatszámú, jellemzően egy póluspárú motorok, melyek tápfrekvenciája több száz vagy akár kHz fölötti érték és így a névleges percenkénti fordulatszám több tíz vagy akár százezer is lehet. Ilyen hajtásokat alkalmaznak például szerszámgépekben. Hasonlóan nagy névleges f tápfrekvenciával rendelkeznek a hibrid és elektromos autókban található motorok. Ugyanakkor a nagyobb leadható nyomaték miatt ezek a motorok több póluspárt tartalmaznak, így a névleges percenkénti fordulatszámuk jellemzően tízezer körüli érték.

A teljesítményelektronikában az átalakítás jellege szerint megkülönböztetünk:

- Egyenáramról-egyenáramra átalakítást (DC/DC konverterek);
- Egyenáramról-váltakozó áramra átalakítást (DC/AC konverterek, (inverterek));
- Váltakozó áramról-egyenáramra átalakítást (AC/DC konverterek, egyenirányítók);
- Váltakozó áramról- váltakozó áramra átalakító (AC/AC konverterek (ciklokonverterek, frekvenciaváltók)).



1. ábra. Teljesítményelektronikai átalakítók csoportosítása átalakítási funkció szerint

A köznyelvben gyakorta használatos az inverter és a konverter fogalma. A kettő közötti különbséget a vezérlés módja határozza meg. Gondoljunk példaként egy egyenirányító áramkörre (AC/DC konverter). A klasszikus megoldás során az áramkör a természetes kommutáció alapján működik (amíg a dióda nyitóirányú előfeszítést kap, vezető állapotban van). Az energiaáramlás egyirányú (a forrás felől a terhelés felé). Ha a diódákat például tirisztorra cseréljük, máris egy vezérelt egyenirányító áramkört kapunk, mellyel (megfelelő vezérlés esetén) az energiaáramlás megfordítható.

Az invertereket két nagy csoportra, az úgynevezett *közbenső egyenáramú körös* (DC-link converter) és a *közvetlen átalakítós inverterekre* (Matrix converter) oszthatjuk. A mai modern ipari hajtásokban alkalmazott inverterek legnagyobb része az első csoportba tartozik, ezért a cikk is ezeket fogja részletesebben bemutatni. A közvetlen átalakítós inverterek közé tartozik például a tirisztoros ciklokonverter, illetve a tranzisztor alapú mátrix konverter. Utóbbinak jelentős előnye, hogy az energiatároló elem hiánya miatt kisebb a mérete.

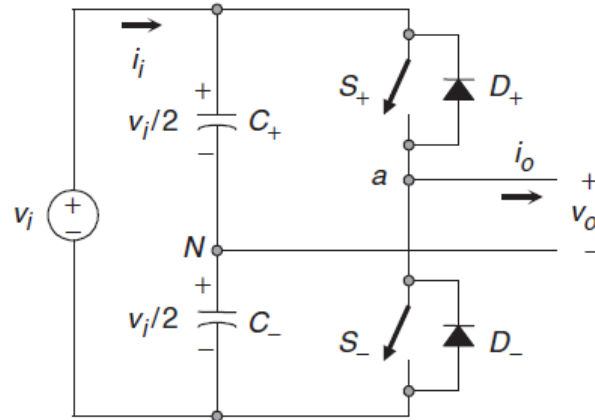
Attól függően, hogy a közbenső egyenáramú körös inverter bemenete feszültségforrásként vagy áramforrásként viselkedik, *feszültség inverterekről* (Voltage Source Inverter) vagy *áraminverterekről* (Current Source Inverter) beszélünk. Megfelelő vezérléssel a frekvencián kívül az első típusoknál a kimenő feszültséget, míg a másik típusnál a kimenő áramot tudjuk változtatni. Miután a modern ipari hajtások jelentős része feszültség inverteres jellegű, ezért a továbbiakban ez a típus kerül ismertetésre.

2. Feszültség inverterek (Voltage Source Inverters)

2.1 Működés (Egyfázisú félhíd)

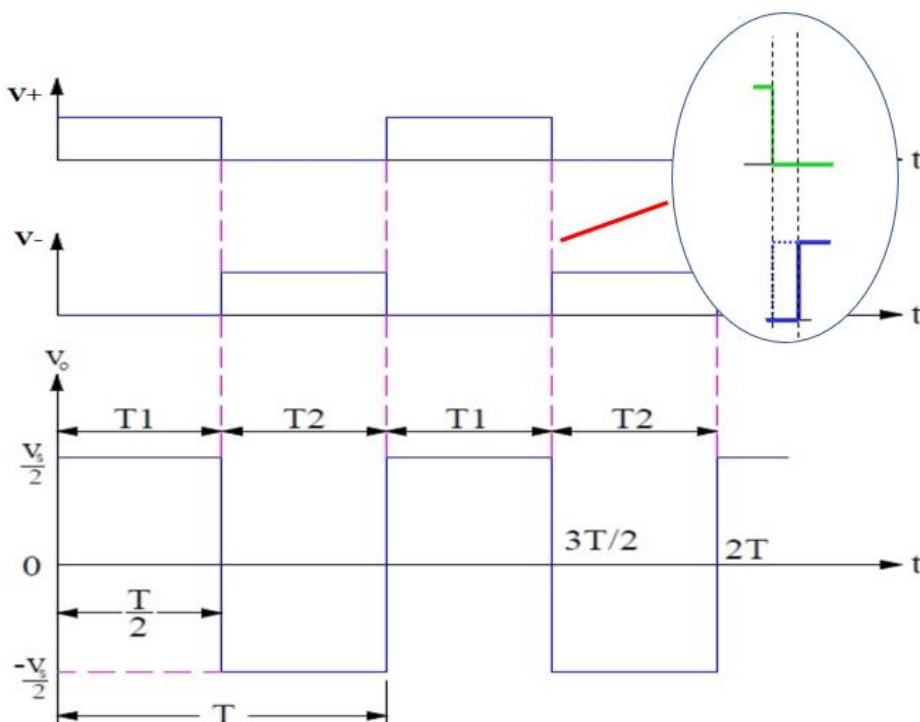
Az inverterek működésének megértéséhez a legegyszerűbb kapcsolási elrendezésből fogunk kiindulni: egyfázisú, félhidas inverter (single phase half-bridge VSI). Az áramköri elrendezés a 2. ábrán látható. Az áramkör bemenetén egy kapacitív osztó található (melyet két

nagy értékű kondenzátor realizál), mely feladata a semleges pont (N) létrehozása. S_+ és S_- egy-egy félvezető kapcsoló, mely a vezérlésnek megfelelően bekapcsolt vagy kikapcsolt állapotban van. Magától értendő, hogy mindkét kapcsolóelem egyazon időben nem lehet bekapcsolt állapotban, ugyanis abban az esetben a tápfeszültség rövidzárba kerülne. Ennek megfelelően az átkapcsolások közé (például amikor S_+ -t ki és S_- -t bekapcsoljuk) holtidőt szükséges beiktatni. A példában a terhelésünk rezisztív jellegű, a legegyszerűbb esetet figyelembe véve (ilyen jellegű terhelés a valóságban nagyon ritka).



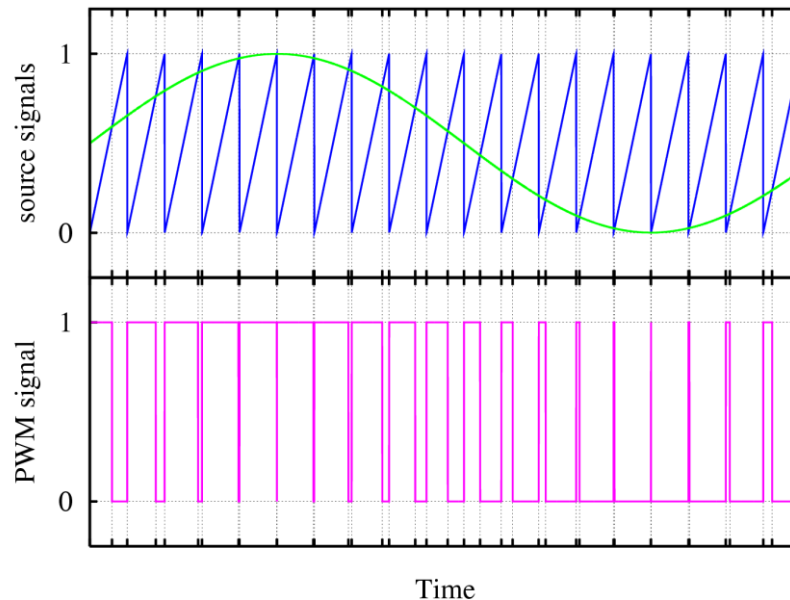
2. ábra. Egyfázisú, félhidas feszültséginverter áramköri elrendezés

A fontosabb jelalakok a 3. ábrán láthatók, melyek rendre felső kapcsolóelem vezérlő feszültség (S_+), alsó kapcsolóelem vezérlő feszültség (S_-), kimeneti feszültség (V_o).



3. ábra. Egyfázisú, félhidas feszültséginverter áramköri jelalakok

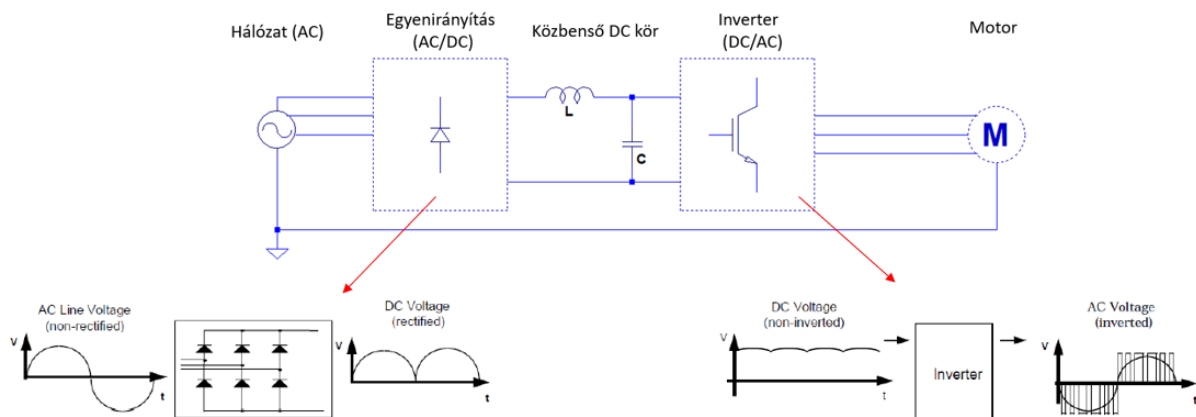
A feszültséginverterek vezérlése (feszültség amplitúdó és frekvencia változtatása) impulzusszélesség moduláció (ISZM, angolul PWM) segítségével történik. Ezek közül a legelterjedtebb modulációs technika a vivőfrekvenciás. Ilyenkor egy állandó amplitúdójú és frekvenciájú háromszög jelet, az úgynevezett vivő jelet hasonlítják össze (komparálják) fázisonként egy változó amplitúdójú és frekvenciájú szinuszos periódusos jellel, az úgynevezett alapjellel (vagy referencijellel), hogy előállítsák a kapcsoló jeleket.



4. ábra. ISZM (PWM) moduláció

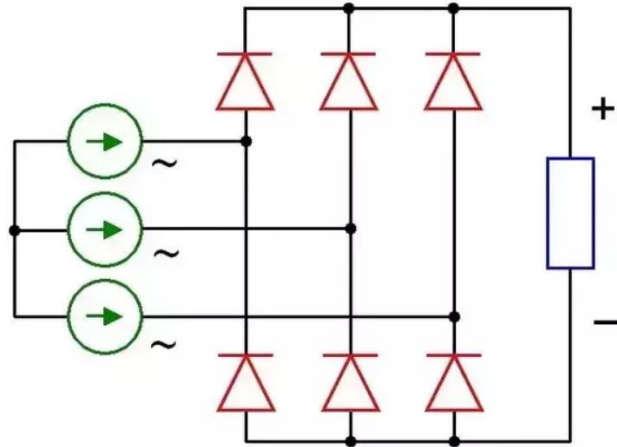
3. Kisfeszültségű hajtásrendszer tipikus felépítése – a frekvenciaváltó-

Egy tipikus kisfeszültségű hajtásrendszer bloksémája a második ábrán látható (háromfázisú kivitelben). Szerkezetük három nagy részre osztható: (i) egyenirányító rész (AC/DC), (ii) közbenső egyenáramú kör, (iii) inverter (DC/AC).



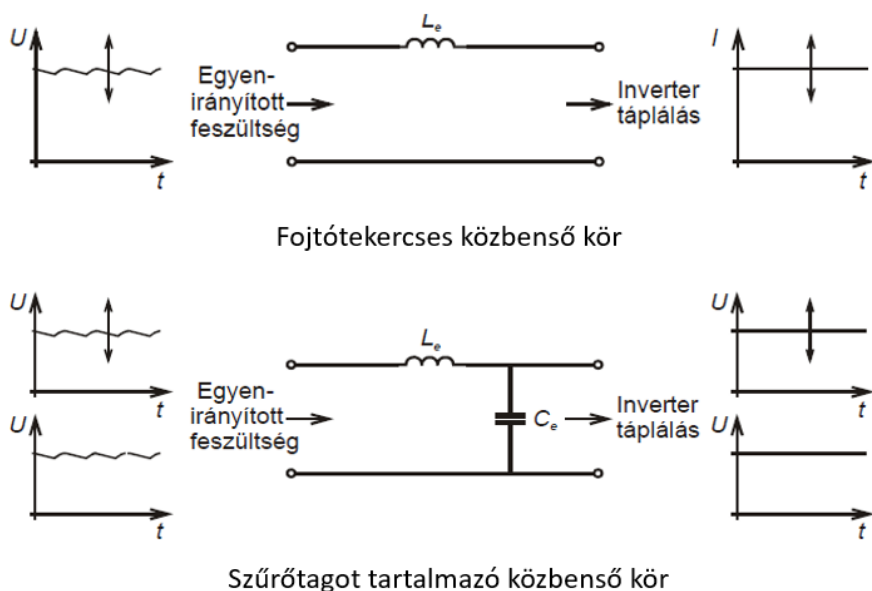
2. ábra. Feszültség inverter blokséma

Az egyenirányító rész feladata a bemeneti háromfázisú feszültség egyenirányítása. Tipikus hajtásrendszer esetén itt egyszerű diódák találhatók, ezért az energiaáramlás egyirányú (a forrás felől a terhelés felé). Amennyiben vezérelt egyenirányítót alkalmaznánk (például tirisztorokkal), úgy az energiaáramlás iránya megfordítható lenne (négynegyedes hajtás). Legegyszerűbb esetben az egyenirányítást 3 fázisú, 2 utas, 6 ütemű áramkör segítségével valósítják meg, mely kapcsolási rajza a 3. ábrán látható.



3. ábra. 3F2U6V egyenirányító áramkör

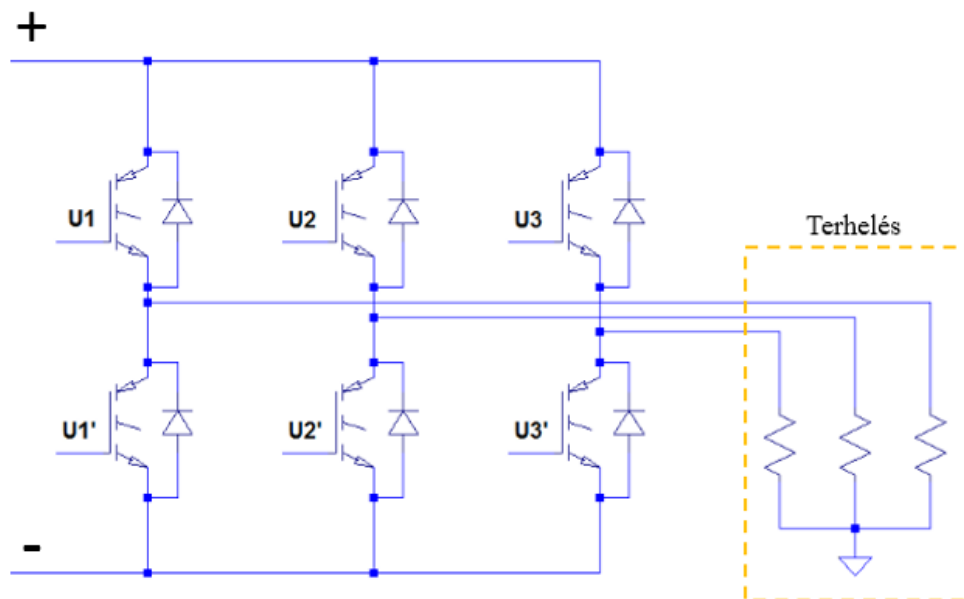
A következő nagy egység az úgynevezett közbenső egyenáramú kör (DC-bus). A közbenső kör a merev táphálózat és a frekvenciaváltó változtatható kimeneteinek szétválasztására szolgál. A két oldalt egy energiatárolón keresztül szokás összekapcsolni, amely áraminverterek (CSI) esetén egy nagy induktivitású tekercs, feszültséginverterek (VSI) esetén pedig egy kondenzátor. A nagy áramfelharmonikus tartalom csökkentése érdekében általában valamilyen (pl. LC) szűrőtagot is alkalmaznak. Ezek szemléltetése a 4. ábrán látható.



4. ábra. 3F2U6V egyenirányító áramkör

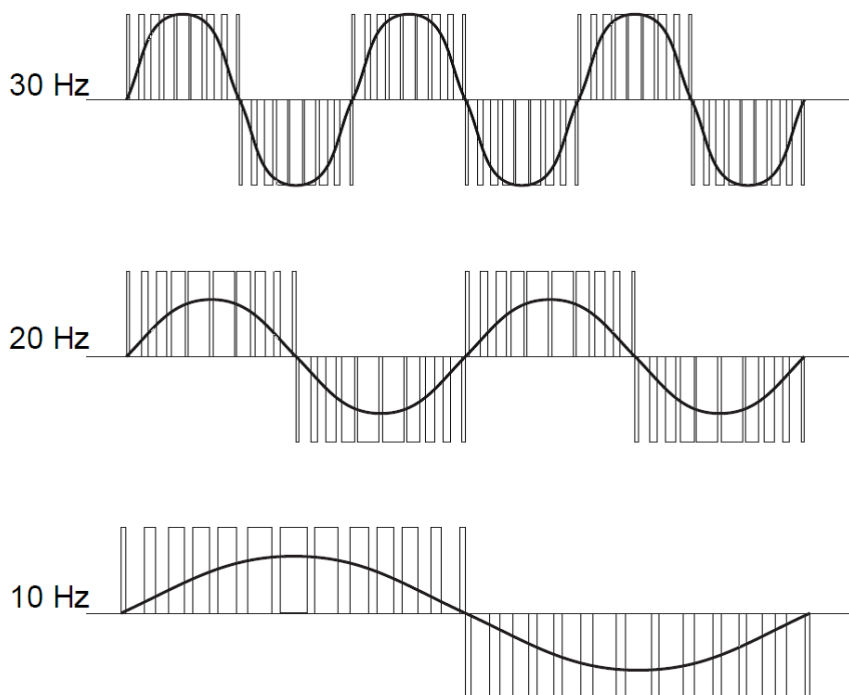
Az utolsó egység maga az inverter, mely a legtöbb esetben háromfázisú. A legegyszerűbb esetben úgynevezett kétszintű invertert alkalmaznak (5. ábra). Ez azt jelenti, hogy a motor adott tekercselése vagy a pozitív sarokhoz, vagy a negatív sarokhoz tud kapcsolódni, attól függően, hogy melyik félvezető kapcsolóelem vezet. Féhidat alkot például U1 és U1'. A kapcsolóelemek általában IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) vagy MOSFET (Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor) típusú félvezetők. Modernebb hajtásokban már előfordulnak SiC (szilikon-karbid) vagy GaN (gallium-nitrid) típusú félvezetők, melyek villamos és fizikai (súly) tekintetében sokkal korszerűbbek.

A félvezetők ki és bekapcsolását általában a processzoros egység vezérli a gate meghajtó áramkörökön keresztül. Léteznek többszintű invertek is, ahol egy félhídban több feszültségszintet különböztetnek meg. Ezek különböző előnyökkel rendelkeznek a kétszintű áramköri megoldáshoz képest (pl.: alacsonyabb THD) Áttekintésüket az érdeklődő olvasóra bízunk!



5. ábra. Kétszintű, háromfázisú inverter

A mai modern invertek kapcsolási frekvenciája jellemzően kHz-es nagyságrendű: MOSFET-ek esetén magasabb (kb. >100kHz), IGBT-k esetén alacsonyabb (<100kHz). Csak a szaggatás frekvenciája ilyen magas: a motor tekercselése a legtöbb esetben egy nagy értékű és időállandójú induktív terhelést képvisel, így a szaggatott feszültség időátlaga lesz a motorra jutó feszültség. Ennek átlagfrekvenciája is jóval alacsonyabb, a legtöbb esetben 50Hz, de 150, 300Hz-es hajtásrendszerek is előfordulnak, a modern frekvenciaváltóknak köszönhetően.



6. ábra. PWM és szinusz kimeneti jel különböző frekvenciákon

3.1 Ipari frekvenciaváltók

Az iparban alkalmazott frekvenciaváltók számos kivitelben kaphatók, egy és háromfázisú kivitelben. Az alapvető rendeltetés mellett számos további hasznos funkciót tartalmazhatnak (a teljesség igénye nélkül):

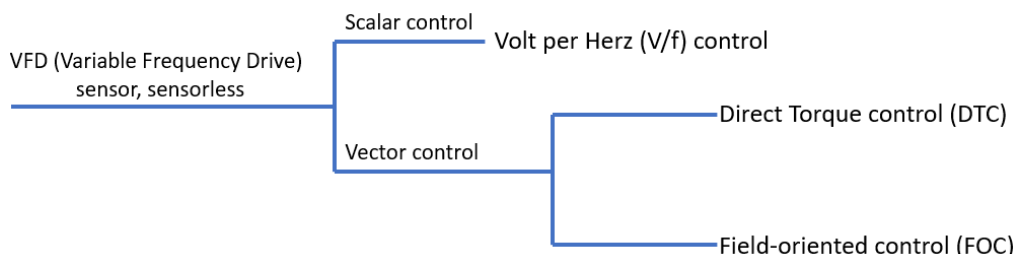
- lágyindítás;
- túláramvédelem;
- hővédelem;
- kompenzáció;
- tápláló hálózat figyelése;
- külső vagy beépített fékegység vezérléséről;
- a hajtott technológia mennyiségi jellemzőjének szabályozásáról;
- a motor forgórészének állandó és névleges értékű gerjesztéséről (fordulatszámától és a terhelés nagyságától függetlenül) stb.

A felsoroltakon kívül, gyártmánytól függően számos további funkcióval rendelkezhetnek. A legújabb frekvenciaváltók már szinte kötelezően el vannak látva legalább egy kommunikációs felülettel a digitális folyamatirányító eszközökhöz való csatlakoztatáshoz, illetve diagnosztika miatt (pl. CAN-busz).

Egyre több készülék egészíthető ki önálló kommunikációs felülettel rendelkező, tetszőlegesen programozható vezérlőmodullal is. Ezzel a felhasználó által megírt és betöltött program segítségével megvalósítható a hajtott technológiai berendezésen végbemenő ipari folyamat irányítása is (pl. szabályozási algoritmus).

3.2 Irányítási stratégiák

A legtöbb mai hajtásrendszer alapja a frekvenciaváltó. Ennek működését korábban áttekintettük. A szakirodalom az ilyen jellegű rendszerekre VFD (Variable Frequency Drive) néven hivatkozik (frekvenciaváltoztatáson alapuló hajtások). Az említett rendszerek több irányítási elven is működhetnek. Ezek gyakoribb csoportosítását láthatjuk a 7. ábrán (a megnevezések kapcsán az angol névre szorítkozunk).



7. ábra. Gyakoribb VFD irányítási stratégiák

A skaláris szabályozási módszer (scalar control) két paraméter egyidejű változtatásán alapul. A motor sebessége önmagában a frekvencia változtatásával is szabályozható, de ez egyidejűleg az impedanciák változását is eredményezi (ezáltal az áram is változni fog). Az áram csökkenése pedig nyomatékcsökkenést von maga után. Ha a frekvencia csökken vagy a feszültség nő, a tekercsek sérülhetnek (megégnek) vagy a vas telítődik. Ennek elkerülése érdekében a feszültséget és a frekvenciát együtt szokás növelni. Ily módon kompenzálhatók a frekvencia és a feszültség változásának előforduló hátrányai. Az indukált feszültség egyenlete szerint a V / Hz állandó szabályozás állandó fluxust ad az állórészben. Az iparban előszeretettel alkalmazzák a következők miatt:

- egyszerűség;
- alacsony költségek;
- nyílthurkú működés (csak sebesség szabályozás, nyomaték nem).

Természetesen az említett módszer megoldható zárt szabályozási körben is, ahol már a nyomaték is szabályozható, amennyiben szükséges. Magától értetődik, hogy ebben az esetben a megvalósítás bonyolultabb lesz.

A dinamikus hajtásrendszerek megvalósítását már nem lehet megoldani skaláris vezérléssel, mert lassú, ezért a skalár vezérlést inkább vektoros vezérléssel helyettesítik. Az indukciós motor vektoros vezérlése a külső gerjesztésű egyenáramú motor (separately excited DC motor) nyomatékszabályozásán alapul. A külső gerjesztésű egyenáramú motor vezérlése két külön részre bontható: nyomaték áramkör és armatúra áramkör. Ez azt jelenti, hogy amikor a forgatónyomatéket az armatúraáram (I_a) vezérlésével szabályozzuk, a tér fluxusát (Φ) ez nem befolyásolja, és a névleges térfluxussal megkapjuk a gyors tranziens választ, illetve a magas nyomaték / amper arányt. A gerjesztések függetlensége miatt, amennyiben a mezőáramot (I_f) vezéreljük, az csak a mező fluxusát érinti, az armatúraáramot (Φ_a) azonban nem.

A módszer kiterjeszthető más villamos forgógépekre is (pl. PMSM). Ehhez koordinátatranszformációt kell alkalmazni, vagyis a háromfázisú áramokat egy úgynevezett dq

koordinátarendszerbe kell transzformálni. Bonyolultabb megoldás, mint a skaláris szabályozás, de sokkal pontosabb és dinamikusabb.

Mindkét szabályozási módszer rendelkezik előnnyel és hátránnyal. A skalár vezérlés olcsó, jól megvalósítható módszer. Ezen előnyök és egyszerűség miatt sok ipari alkalmazás működik ilyen jellegű irányítással. Másrészt nem kielégítő a dinamikus viselkedésű hajtások vezérlése szempontjából, mivel lassan reagál a tranziensekre. Ennek oka, hogy a V / Hz módszer a feszültség és a frekvencia nagyságát vezérli ahelyett, hogy szabályozná az áramok fázisát és nagyságát. Alacsony teljesítményű, de stabil irányítási technika. A mezőorientált vezérlési módszer vezérli az áramokat, így gyors válaszokkal működik. Ez a módszer kielégíti a dinamikus meghajtók követelményeit, ahol gyors reagálásra van szükség. Kiváló szabályozási módszer a tranziensek kezelésére. Hátránya a bonyolultság és a meghajtó áramkör magas ára. Ennek ellenére nagy teljesítményű vezérlési technika. Mindkét technika a névleges fordulatszám felett alkalmazható a nyomaték rovására (mezőgyengítés).

4. Felkészülést segítő kérdések

Csoportosítsa a teljesítményelektronikai átalakítókat. Mindegyikre adjon egy példát!

Mutassa be az inverterek típusait!

Rajzolja le és ismertesse az egyfázisú feszültséginvertert (VSI)!

Ismertesse a PWM modulációt!

Rajzoljon le egy tipikus kisfeszültségű hajtásrendszert! Ismertesse az egyes részegységeket!

Ismertesse a frekvenciaváltók előnyeit!

Csoportosítsa a frekvenciaváltoztatáson alapuló hajtásokat!

Ismertesse a V/f control-t (elv, előnyök)!

Ismertesse a vector control-t!

Hasonlítsa össze a skalár és a vector controlt!

Forrás:

- [1] **Krithika, V, Subramani, C.** *A comprehensive review on choice of hybrid vehicles and power converters, control strategies for hybrid electric vehicles.* *Int J Energy Res.* 2018; 42: 1789– 1812. <https://doi.org/10.1002/er.3952>
- [2] **Muhammad H. Rashid:** *Power electronics handbook*, Butterworth-Heinemann, 2017
- [3] Elektrotechnika 11. Előadás, AC motorok Vezérlése, fordulatszám változtatás, BME-VIK
- [4] **S. Halász, P. Stumpf,** *Az inverteres villamos hajtások fejlődési irányai,* Elektrotechnika, 2018, 12.
- [5] **Z. Kvasznicza,** *Szabályozott Felvonó Hajtások Alkalmazásának Hálózati és Környezeti Zavarai, PhD értekezés, 2011.*
- [6] **G.Kohlrusz, D. Fodor,** *Comparison of scalar and vector control strategies of induction motors,* Hungarian Journal of Industrial Chemistry Veszprém. Vol. 39(2) pp. 265-270 (2011).
- [7] **Jerković Štil, Vedrana & Špoljarić, Željko & Miklosevic, Kresimir & Valter, Zdravko.** (2018). *Comparison of Different Motor Control Principles Using Frequency Converter*