

ELEKTROMOS GÉPJÁRMŰVEK SZERKEZETI KIALAKÍTÁSA ÉS ÖSSZEHASZNÁLÁSA A HAGYOMÁNYOS GÉPJÁRMŰVEKKEL

GYARMATI József; ZENTAY Péter

(ORCID: 0000-0001-7594-2383); (ORCID: 0000-0002-3161-8829)

gyarmati.jozsef@uni-nke.hu; zentay.peter@bqk.uni-obuda.hu

Absztrakt

A környezetvédelem és ezen belül az üvegházhatást gerjesztő gázok, mint például a CO₂ emissziójának a kérdése egyre aktuálisabbá és a probléma megoldása egyre sürgetőbbé vált napjainkban. A gépjárművek elektromos hajtása, ami komoly múltra tekint vissza, csak ez elmúlt néhány évben kezdett el térni hódítani. Alkalmazásuk részben és helyi szinten komoly mértékben csökkentheti ezt a hatást.

A cikk az elektromos hajtású gépjárművek szerkezeti kialakításának alapjait mutatja be. Külön hangsúly lett fektetve az elektromos és a hagyományos, vagyis a belsőégésű motorral szerelt járművekkel történő összehasonlításra. A cikk megírásnak célja, hogy az egyre jobban térrel nyerő technológiáról összefoglaló kép nyújtása.

Kulcsszavak: környezetvédelem, elektromos gépjármű,

Abstract

The topics of environmental protection especially the question of the emission of greenhouse gases (like CO₂) became increasingly important and the solution to this problem has become very urgent recently. The electric vehicle drives, which have a long dated history, started to become popular in the last few years. Application of this technology may seriously reduce the greenhouse effect partly and at local level. The paper presents the fundamentals in the structural design of electric vehicles. Special emphasis is made on the comparison of electric and on vehicles with traditional internal combustion engines. The paper is designed to provide a better overall insight of this current vehicle technology

Keywords: environmental protection, electric vehicle,

A kézirat benyújtásának dátuma (Date of the submission): 2017.04.10.
A kézirat elfogadásának dátuma (Date of the acceptance): 2017.06.16.

BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedekben a belsőégésű motorral rendelkező gépjárművekre vonatkozó emissziós normák folyamatos szigorodása volt megfigyelhető. Az emisszió korlátozások az égés során keletkező és az emberi szervezetre káros égéstermékekre, vagyis a CO, HC, NO_x és a szilárd részecskékre vonatkoztak. Az emissziós normákat (2014. szeptembertől az Euro 6) a motor gyártók alapvetően a tüzelőanyag ellátórendszer korszerűsítésével teljesíteni tudták.

A nevezett emissziós normák viszont nem foglalkoznak az üvegházhatást keltő gázok (CO₂) kibocsátás mértékével. A CO₂ kibocsátásról annyit kell tudni, hogy ez a szénhidrogének tökéletes égésének a terméke. Míg a keletkező CO –ami a tökéletlen, vagyis oxigénszegény környezetben történő égés mellékterméke– mennyisége a tüzelőanyag ellátó rendszer segítségével illetve oxidációval lényegében minimálisra csökkenthető (jelenleg 0,5 g/km), addig a CO₂ csökkentés csak az elégetett tüzelőanyag mennyiségének a csökkentése révén érhető el. Meg kell jegyezni továbbá, hogy a CO oxidációja szintén a CO₂ kibocsátást növeli.

Az elektromos meghajtású gépjármű több mint száz éves múltra tekint vissza, vagyis a belsőégésű motorral lényegében egyszerre jelent meg, de lényeges piaci szerepet nem szerzett. Az elmúlt mintegy öt évben viszont egyre több gyártó készít tisztán elektromos hajtású autót (Electric Vehicle, EV) illetve olyan hibrid járművet, amely az elektromos hálózatra csatlakoztatható és azon feltölthető (Plug in Hibrid, PHEV). A két technológia a személygépkocsik piacán Európában elérte az egy százalékos részesedést, és az elemzők a részesedés további és jelentős emelkedését jósolják [1]. Egyes államok mint például Norvégia viszonylag rövid időn belül már csak olyan járművek forgalomba helyezését tervezi megengedni, ahol a CO₂ kibocsátás zéró, vagyis az elektromos- illetve a hidrogén meghajtásúakat. Ezen kívül léteznek más megoldások a CO₂ emisszió csökkentésére, mint például az alternatív tüzelőanyagként alkalmazott LPG [2].

Az elektromos hajtás elterjedésével előre láthatóan meg fognak változni az alkalmazott kenőanyagok [3], és újra kell gondolni a jelenlegi, meghatározó mértékben a belsőégésű motorok igényeit alapul vevő karbantartási stratégiákat is [4].

Az elektromos hajtás piacán sok esetben eltérő véleményekkel és változó, nagy szórású becslésekkel találkozhatunk. Nehéz megbecsülni a technológia fejlődésének az ütemét, az árak és a fogyasztói szokások változását. Amiben környezetvédelmi szempontból az elektromos hajtás markánsan eltér a belsőégésű motortól az a zéró helyi emisszió. Amennyiben az elektromos autó kombinálva van újrahasznosítható energiatermeléssel (szél, víz, nap) akkor globálisan is beszélhetünk zéró emisszióról.

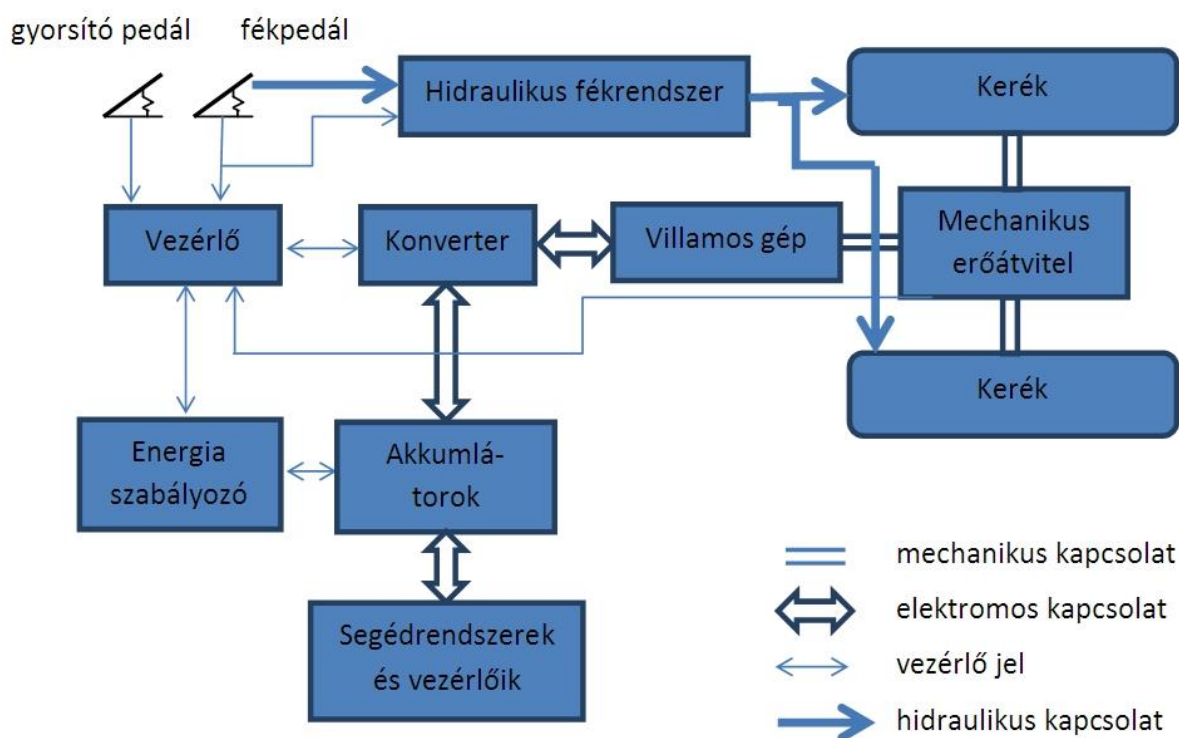
A különbség, ami az elterjedést jelentős mértékben korlátozza, az alacsony hatótávolság, a jelentős töltési idő és a magas ár. Az elterjedést a különböző államok megpróbálják elősegíteni például adókedvezményekkel, egyes töltőállomások ingyenes használatával, vagy közlekedési kedvezményekkel (buszsáv használata). Ezt korábban a hibrid technológiánál is sok helyen megtették, de jelentős eredményeket nem értek el vele. A hibrid technológia az összetettsége miatt magas áron maradt. A tisztán elektromos hajtású jármű viszont szerkezeti lényegesen egyszerűbb, mint a belsőégésű motorral szerelt, ezért a legtöbb ezzel foglalkozó szakíró azon a véleményen van, hogy az ár a részesedés növekedésével, és az eladott autók darabszámának növekedésével csökkenni fog. Az elterjedésben, ahogy azt az emissziós normák szigorodása és az annak hatására kifejlesztett korszerű tüzelőanyag ellátórendszerek esetében tapasztalni lehetett, nagy szerepük lesz az egyes államok törvényhozásainak. Vagyis hogyan fognak alakulni a CO₂ kibocsátására vonatkozó helyi és nemzetközi kvóták.

Jelen cikkben ezen kérdések –vagyis lényegében a környezetvédelem– nem kerülnek feldolgozásra. Ezzel foglalkozik magyar nyelven a [5] forrás. A cikkben az elektromos hajtású gépjármű mint technika általános és tájékoztató jellegű leírására lett koncentrálna.

ELEKTROMOS AUTÓ SZERKEZETI KIALAKÍTÁSA

A legkorábbi változatoknál előfordult, hogy a belsőégésű motor erőforrást villanymotorra cserélték az üzemanyagtankok helyére pedig az elektromos energiát biztosító akkumulátorokat helyezték el. Azonban ezek a megoldások nem használták ki a villanymotorok üzemeltetési szempontból kedvező külső karakterisztikáit. A napjainkban használt elektromos autók szerkezeti kialakítása ettől jelentős mértékben eltér. A kialakítás nagyban függ az alkalmazott villanymotortól, ezért itt egy általánosan értelmezhető felépítés kerül bemutatásra. Az elektromos meghajtást három alrendszerre lehet bontani: hajtáslánc, energiaforrás és segédberendezések. [6]

A hajtáslánc vezérlő egységből, converter (átalakító) egységből, villanymotorból és mechanikus hajtóműből áll. Az elektromos autó elvi felépítését az 1. ábra mutatja.

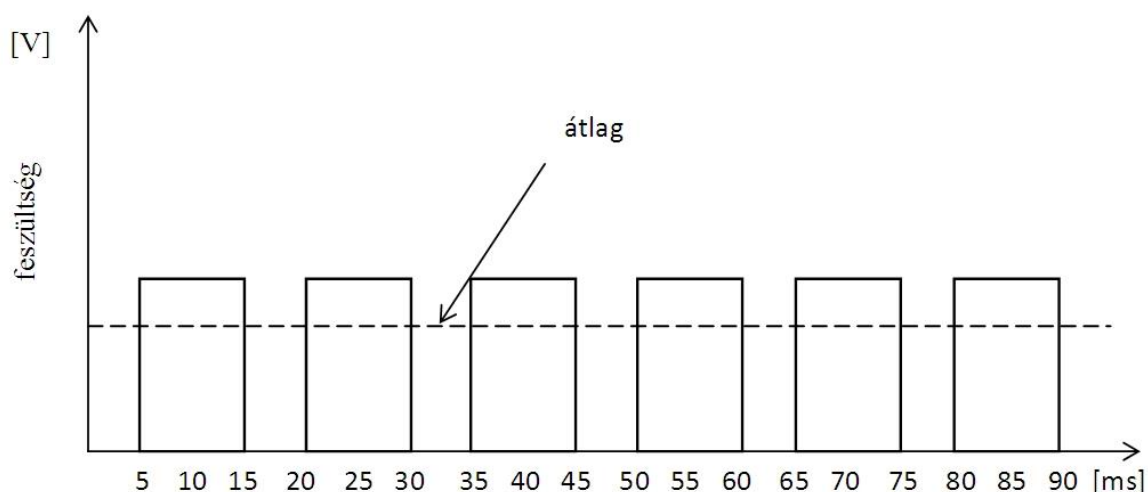


1. ábra Az elektromos hajtású gépjármű elvi felépítése [6]

A vezérlő egység a jelet a gépjárművezető által kezelt pedálról kapja, ennek alapján vezérli az akkumulátor és a járművet meghajtó villamos gép között áramló elektromos energia nagyságát és irányát. Az elektromos járművek esetében a gyorsítás és a fékezés, pontosabban a regeneratív fékezés egy az 1. ábrán is ábrázolt pedál segítségével történik. A pedál lenyomása esetén a járművet gyorsítani, a pedál felengedése esetén pedig lassítani lehet. Ez a lassítás (fékezés) független a járműbe beépített hidraulikus féktől. Ebben az esetben ugyanis a villamos gép generátor üzemmódba kapcsol és a jármű mozgási energiáját elektromos energia formájában az akkumulátorokban tárolja el. Itt kap szerepet az energia szabályozó egység is,

amely még a jármű akkumulátorainak a feltöltésekor jut szerephez. Az elektromos autók ezen kívül rendelkeznek autonóm hidraulikus fékekkel is.

Az elektromos energia mennyiségét korábban egyszerűen potenciométerrel szabályozták ebben az esetben viszont az akkumulátor által leadott teljesítmény állandó volt, a fölösleges teljesítmény pedig a potenciométer tekercsein hővé vált. Ez az eljárás alacsony átlagos hatásfokot eredményezett. Egyenáramú motorokkal rendelkező korszerű elektromos járműveknél, ún. impulzusszélesség modulációval (PWM-Pulse Width Modulation) szabályozzák a villamos gép teljesítményét. A moduláció elvét a 2. ábra mutatja. A vezérlés ezzel könnyen elvégezhető, mert a kapcsoló üzemben használt tranzisztor ki és bekapcsolási idejének arányával lehet a motor kapocsfeszültségét változtatni. Az ábrán szaggatott vonal jelzi az átlagos feszültséget, ami nem más, mint a motor tápfeszültsége. Ha az impulzusok ábra szerinti 10 ms-os szélességét csökkentjük, akkor csökken az átlagfeszültség ezáltal a teljesítmény, ellenkező esetben pedig nő. Az ábrán mutatott esetben csak csökkenteni lehet a feszültséget, de léteznek feszültségnövelő kapcsolások is.



2. ábra Az impulzusszélesség moduláció elve [6]

A jármű fő akkumulátorai egyenfeszültséget biztosítanak, amit az alkalmazott villanymotortól függően át kell alakítani, ezt végzi a converter egység. Az elektromos autókban alkalmaznak egyenáramú és váltóáramú villamos gépeket is ennek megfelelően az átalakítás lehet egyenfeszültségből váltakozó feszültségre (inverter). Az átalakítás történhet egyenfeszültségről más egyenfeszültségre a villanymotor illetve a segédberendezések feszültségigénye szerint (converter).

Az elektromos járművek meghajtásában alkalmazott villamos gépek: egyenáramú gép (Direct Current voltage motor); aszinkron gép (Induction Motor), szinkron gép (Synchronous Motor), permanens mágneses forgórészű, kefe nélküli egyenáramú motor (Permanent Magnet BrushLess Direct Current); kapcsolt reluktancia motor (Switched Reluctance Motor) [7]. A motorok működésével és a 2. ábra szerinti teljesítményszabályozással a következő pont részletesen foglalkozik.

Az elektromos autóban is alkalmazhatnak mechanikus erőátvitelt, ez viszont az alkalmazott villanymotortól és annak elhelyezésétől is függ. Amennyiben a motor a kerékbe van építve, ebben az esetben a mechanikus hajtómű teljesen elhagyható. A villamos gép ugyanis ebben az esetben közvetlenül a kereket hajtja meg. Amennyiben csak egy motort alkalmaznak mindenképpen szükséges differenciálmű és a hajtómotor tengelyének elhelyezkedése függvényében haránthajtás. Esetenként előfordulhat, hogy a differenciálmű

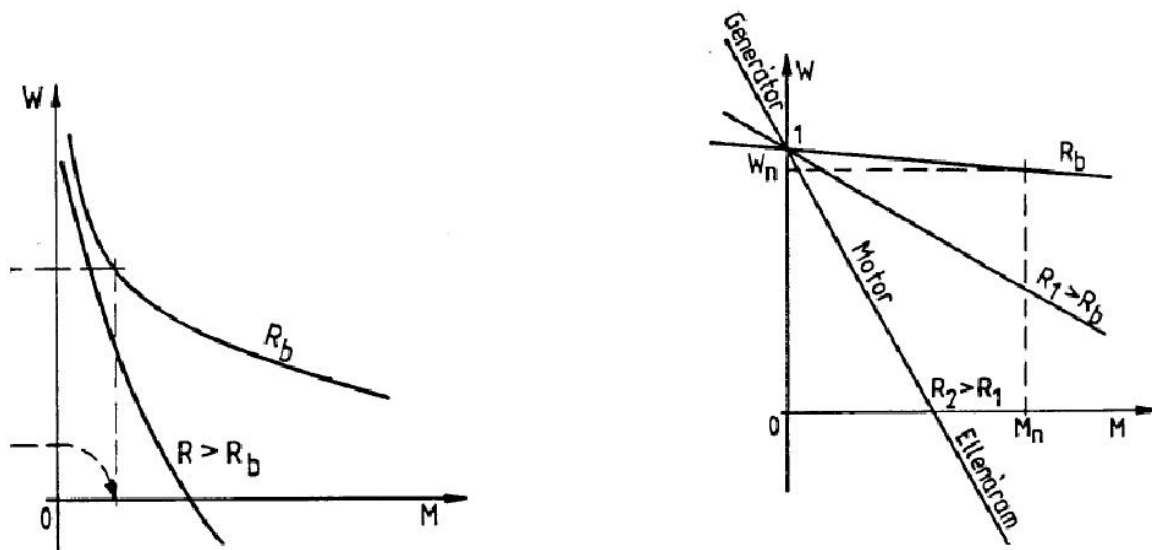
elé többfokozatú kapcsolható sebességváltót építenek, ezzel ugyanis kis sebességnél a forgatónyomaték nagy sebességnél pedig a fordulatszám növelhető.

AZ ELEKTROMOS AUTÓKBAN HASZNÁLT VILLAMOS GÉPEK

Egyenáramú gépek

Vontatáshoz a soros és a külső gerjesztésű egyenáramú motor legkedvezőbb ezért a többi egyenáramú gép nem kerül ismertetésre. A motorok működésének a leírásával számos szakirodalom foglalkozik ezért itt csak az üzemeltetési sajátosságai kerülnek bemutatásra.

A soros gerjesztésű egyenáramú motor jelleggörbéje (3/a. ábra) indulásnál nagyon nagy nyomatékkal rendelkezik, míg a fordulatszám növekedésével ez a nyomaték hiperbolikusan csökken. Ha nagy fordulatszámon is jelentős nyomatékra lenne szükségünk (nagy sebességre való gyorsításnál), akkor ez hátrányos lehet.



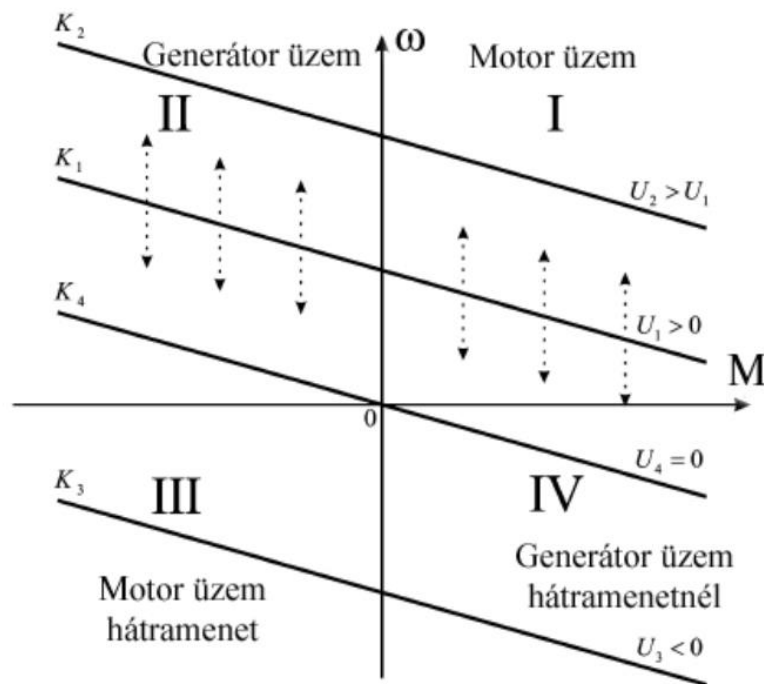
3. ábra Egyenáramú villamos gép nyomatéki jelleggörbéi

a: külső gerjesztésű; b: soros gerjesztésű

R_b : a motor armatúraköri ellenállása ; R_1 : 1. külső beiktatott ellenállás ; R_2 1. külső beiktatott ellenállás [8]

A külső gerjesztésű egyenáramú motornál (3/b ábra) is nagy az indító nyomaték, míg a fordulatszám növekedésével ez lineárisan csökken. Így nyomatéktartó karakterisztikát lehet létrehozni. A motor szögsebességét az armatúra feszültséggel lehet szabályozni, míg a nyomaték az armatúra árammal arányos.

Az egyenáramú gépekkel megfelelő elektronikával és táplálásnál 4/4-es hajtást tudunk megvalósítani, tehát mindkét irányba való hajtást és mindkét irányba generátoros üzemet. Tehát gépjárműben előre és hátramenet elektromosan kapcsolható és mindkét irányban fékezésnél vissza tud táplálni a töltő elektronikába (4 ábra).



4. ábra Külső gerjesztésű egyenáramú gép 4/4-es hajtása [8]

A fordulatszámot számos paraméterrel lehet változtatni (állórész fluxus, armatúra ellenállás, tápfeszültség). Ezek közül a legegyszerűbb és leghatékonyabb a szinguláris motoroknál a tápfeszültség változtatása. A motor fordulatszám szabályozása ezzel nagyon egyszerűn végezhető. Régebben ehhez egy változtatható ellenállást használtak, de ez a megoldás nagyon gazdaságtalan, mert az ellenálláson a teljesítmény hő formájában elvész. A teljesítményelektronika és a félvezető technika fejlődésének köszönhetően a teljesítmény szabályozását impulzusszélesség moduláció elvén teljesítményvesztés nélkül lehet elvégezni.

Ezek a szaggatós megoldások nagyon egyszerűek, olcsók és könnyen kivitelezhetőek. A megfelelő vezérléshez még sok egyéb elem szükséges, például a kapcsolásból adódó áramcsúcsok ellen védő motoroldali dióda illetve passzív szűrőelemek és a kapcsoló kikapcsolásakor a motor körbe iktatott dióda (flyback diode). A kapcsolási frekvenciát mindig úgy kell választani, hogy az nagyságrendekkel legyen nagyobb a motor tehetetlenségénél, ugyanis ebben az esetben megakadályozzuk a motor egyenlőtlen (remegő) járását.

A motorok fordulatszámát, a korszerű elektronikai elemeknek köszönhetően egyszerűen és nagyon pontosan tág határok között lehet szabályozni. A szabályozás költséghatékony és pontos, azonban a klasszikus egyenáramú motorok használata ennek ellenére mégis egyre háttérbe kerül, többek között a drága előállításuk és a nagy karbantartási költségük miatt. A legnagyobb elhasználódást a szénkefe és a kommutátor kopása jelenti, melyet meghatározott időközönként kell cserélni, illetve fel kell szabályozni.

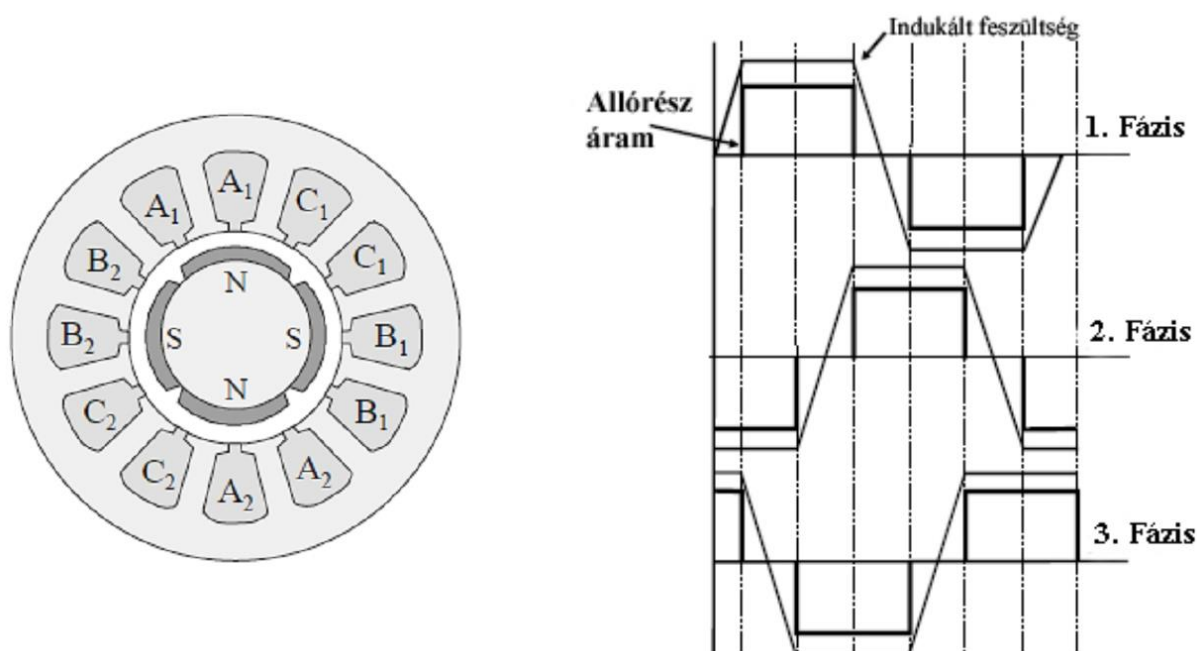
Kefenélküli egyenáramú motorok

1960-as években fejlesztették ki a kefenélküli egyenáramú motorokat (BLDC – BrushLess DC motor). Ezzel a konstrukcióval az előbbi problémát kívánták kiküszöbölni. A motor felépítése fordított a hagyományos egyenáramú motorokéhoz képest, mivel itt a forgórészben helyezkedik el az állandó mágnes, míg az állórészben található az összes tekercselés. Ezzel a megoldással mind a szénkefét, mind a kommutátort kiküszöbölik. Az állórész tekercseiben a feszültséget tekercsről – tekercsre változtatjuk, ezzel hozunk létre forgó mágneses mezőt,

mely a forgórészben lévő állandó mágneset magával viszi (5. ábra). Ehhez egy bonyolult szabályozó rendszer szükséges, mely érzékeli a forgórész szögpozícióját és ehhez megfelelően kapcsolja az állórész tekercseket a forgás elindításához és fenntartásához. Ezzel elektronikusan kommutációt hoznak létre. Az állórész lehet kívül, de léteznek olyan konstrukciók is ahol az állórész a motor belsejében helyezkedik el.

A motorban a csapágyakon kívül nincs kopó alkatrész, kivitele egyszerű, gyártása olcsó, azonban a vezérlése igen bonyolult. Régebben a megfelelő nagy mágneses remanenciával rendelkező mágnesek hiányában csak kis teljesítményű motorokat tudtak létrehozni.

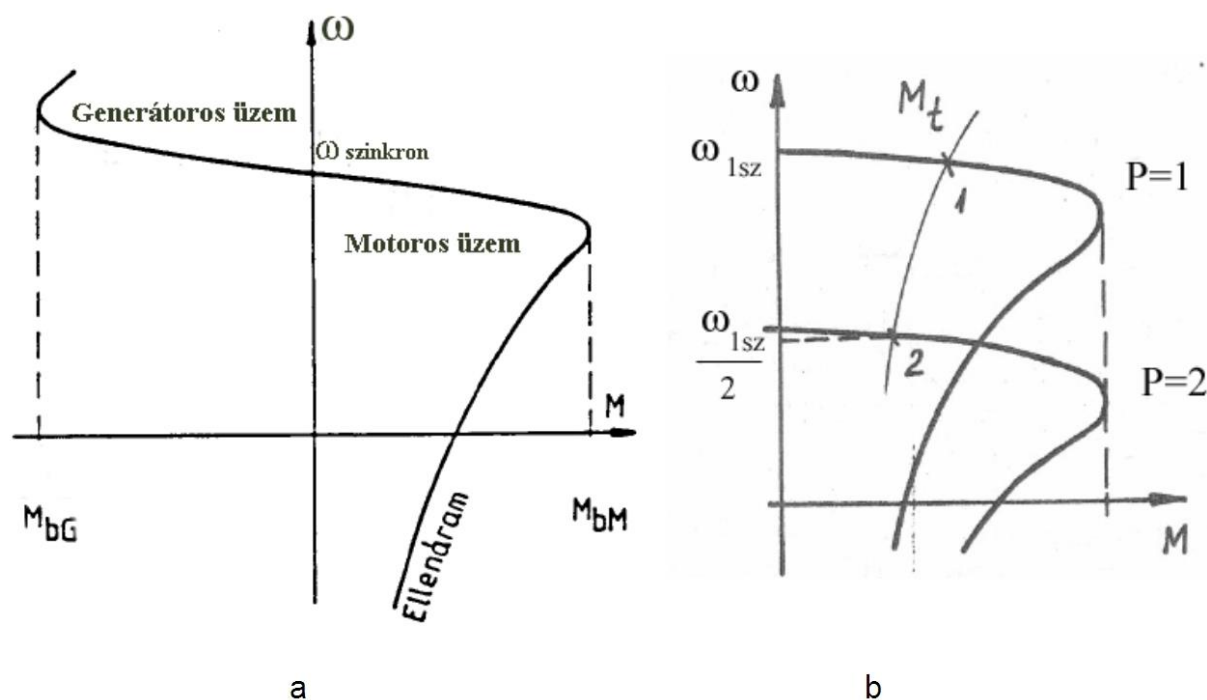
Ritkaföldfém mágnesek (Neodimium-Vas-Bór, Szamárium-Kobalt) használatával a jelenlegi motorok teljesítménye és nyomatéka már megfelelő az elektromos gépjárművek hajtására. Az állórész tekercseinek kapcsolása időben négyzög egyenfeszültség jellel történik (5. ábra). A feszültség ilyen módú táplálása a motorban nyomatékrángásokat hoz létre, különösen alacsony fordulatszámokon. Ezt a hatást a motorok tekercseinek pólusszám növelésével lehet csökkenteni. Ez viszont a motor gyártási költségeit növeli.



5. ábra BLDC motor és fázis kapcsolásai [8]

Aszinkron motorok

Szerszámgépeknél az elmúlt 60-70 évben szinte egyeduralkodó volt a háromfázisú rövidre zárt forgórészű aszinkronmotor, amit a 6/a ábra mutat. Az olcsósága, egyszerűsége, megbízhatósága és a karbantartás mentessége teljesen kiszorította az egyenáramú motort a szerszámgépekből, annak ellenére, hogy kezdetekben ez a motor általában csak egy (hálózati frekvenciától függő) fordulatszámon tudott működni és a gép kialakításából adódóan terheléstől függően mindig fellép egy szlip (eltérés a forgó mágneses tér és a forgórész fordulatszáma között). Léteznek diszkrét fordulatszámváltásra képes háromfázisú aszinkron motorok is, de ezek ár/felhasználhatóság aránya már sok esetben nem megfelelő. Egy ilyen motor fordulatszám-nyomaték jelleggörbáját mutatja a következő 6/b ábra:



6. ábra Aszinkron motor nyomatéki jelleggörbéi

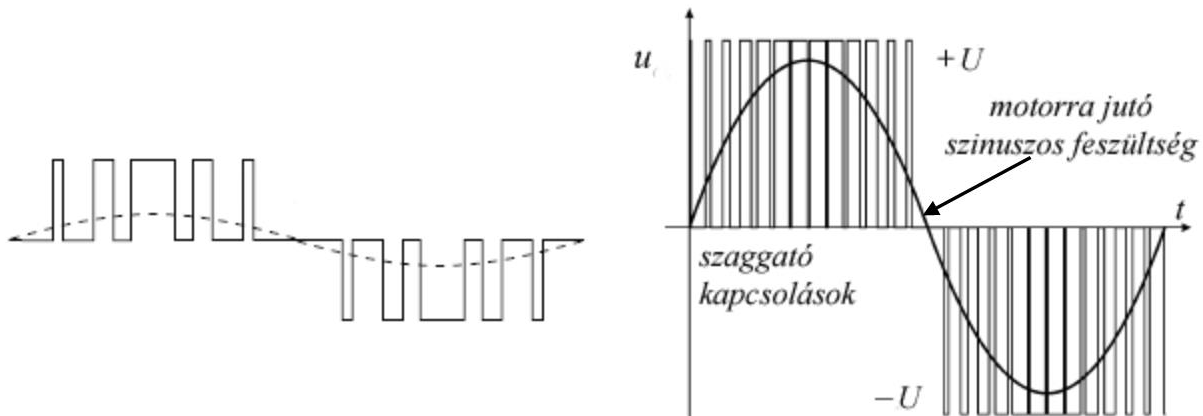
a: Nemszabályozott aszinkron motor jelleggörbéje és üzemei. M_{bM} a gép maximális (billenő) nyomatéka motorüzemnél, M_{bG} a gép generátoros üzemének maximális nyomatéka.

b: Póluspárváltásra alkalmas tekercseléssel ellátott gép jelleggörbéinek ábrázolása. [9]

A 6. ábráról látszik, hogy a nyomaték fordulatszám görbe ennél a gépnél nem sokkal kedvezőbb, mint egy belsőégésű motornál, mivel indulásnál az indító nyomaték alacsony, a gép áramfelvétele nagy. Így nem lenne kedvező gépjármű hajtásra. A korszerű teljesítményelektronikai elemekkel azonban olyan szabályozást lehet készíteni, mely lehetővé teszi a motor nagy fordulatszám tartományokban történő változtatását nyomatéktartás mellett. Ezt a motorba táplált primer feszültség abszolút értékének és frekvenciájának változtatásával tudják szabályozni. Ezzel a módszerrel el lehet érni, hogy maximális (billenő) nyomatékon indítsuk a motort és a fordulatszám függvényében a teljes tartományon állandó nyomatékkal működjön. Mivel a primer feszültség értékét nem lehet tetszőlegesen növelni (szigetelési/átütési szilárdság miatt), ezért az állandó nyomatékot csak addig a fordulatszámig tudja tartani a motor, amíg ezt a feszültséget el nem éri. Ha meg akarjuk haladni ezt a fordulatszámot, akkor a nyomaték (állandó teljesítmény mellett) hiperbolikusan fog csökkenni. Azonban a korszerű hajtásoknál ezt nem szükséges meghaladnunk, ugyanis még direkt kerékajtásnál sem szükséges, hogy a motor ilyen nagy fordulatszámon működjön.

Régebben a háromfázisú hálózatról közvetlenül állították elő a megfelelő feszültséget és frekvenciát tirisztoros (triac) kapcsolásokkal, de ezek hátránya a bonyolultság volt és a frekvencia és a feszültség értékét csak lefelé lehetett változtatni. Manapság egy háromfázisú egyenirányítóval állítanak elő egyenfeszültséget, melynek értékét impulzusszélesség modulációval (2. ábra), már tetszőlegesen lehet változtatni. A kimenetnél pedig egy háromfázisú inverterrel a megfelelő frekvenciájú szinuszos váltakozó feszültséget hoznak létre (szinuszos impulzus szélesség moduláció). Ennek a szabályozásnak egy egyszerűsített vázlatát mutatja a 7. ábra.

Elektromos gépjárműveknél rendelkezésünkre áll már az egyenfeszültség, melyet az előbb említett módon tudjuk a motor vezérlésére használni.



7. ábra Tipikus szinuszos ISZM hullámformák, különböző módosításokkor [8]

Az aszinkron gépeknél is előállítható a 4/4-es üzem, megfelelő frekvencia és primerfeszültség szabályozással a nyomaték állandó értéken tartható az egész fordulatszám tartományon

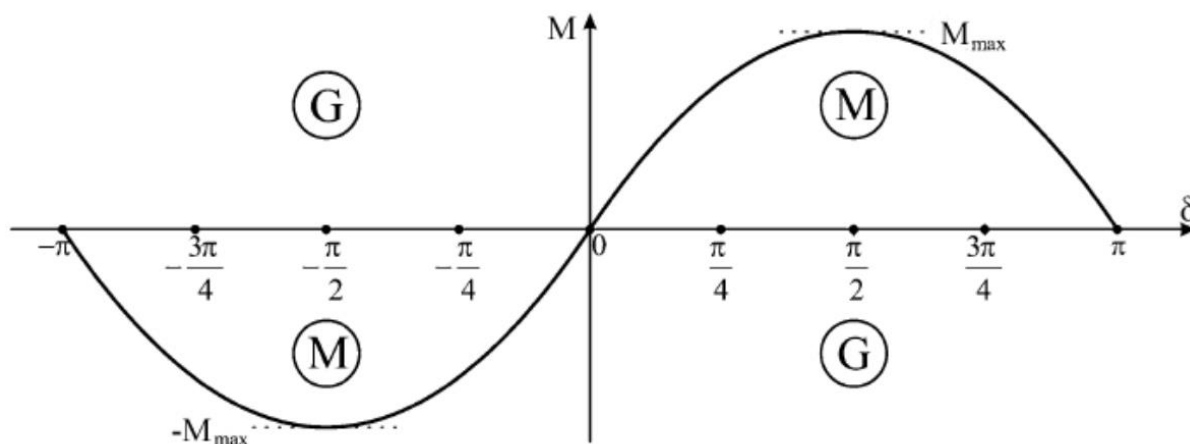
Szinkron motorok

Sokáig a szinkron gépeket csak erőműi turbógenerátorokban illetve nagyteljesítményű stabil motorokban használták. Ennek fő okai az egyenáram előállítása és a motor karakterisztikáiból adódott. Az indítást ezeknél a motoroknál általában egy indító kalicka végezte, mely egy egybeépített aszinkron motorként funkcionált, amíg a gépet szinkron fordulatszám közelébe felpörgette. Ekkor a forgórész tekercseit egyenfeszültséggel gerjesztve a gép szinkron fordulatszámra ugrik, és ezzel forog tovább. Ezt a módszert kis gépeknél nem lehet gazdaságosan alkalmazni. A szinkron gép állórészének felépítését tekintve megegyezik a háromfázisú aszinkron motoréval, míg forgórészében állandó mágneses teret hozunk létre. Ez lehet elektromos gerjesztéssel (általában nagy gépeknél ahol a gerjesztést változtatni is kell) csúszógyűrűkön keresztül. Ennek hátránya, hogy az alkatrészek itt is kopásnak vannak kitéve. Az állandó mágneses tér létrehozható állandó mágnessel is. A korábban említett ritkaföldfém mágnesek alkalmazásával óriási nyomaték-térfogat illetve teljesítmény-térfogat arányú gépek hozhatók létre. Ezek az állandó mágneses szinkron motorok (Permanent Magnet Synchronous Motor).

Kialakításban és működésben egy ilyen motor nagyon hasonlít a BLDC motorhoz, azonban elosztott tekercseléssel készülnek és az állórészt szinuszos feszültséggel gerjesztik a BLDC motorokban használt trapéz-lüktetéses gerjesztéshez képest. Ez működés szempontjából sokkal kedvezőbb, mint a BLDC motoroknál alkalmazott módszer. A gerjesztés a szinkron gépeknél nagymértékben kiküszöböli a BLDC motoroknál tapasztalható nyomatékrángást.

Szinkron motoroknál nem beszélhetünk nyomaték fordulatszám görbéről, mivel itt a forgórész mindig szinkron forog az állórészben kialakult forgó mágneses mezővel. Motor üzemben a forgórészhez forgó mágneses térhez képest lemarad a terheléstől függően, generátor üzemben a forgórész húzza maga után a forgó mágneses teret egy terheléstől függő szöggel. Legnagyobb nyomaték a motornál, illetve a legnagyobb indukált feszültség generátornál akkor keletkezik, ha a terhelési szög (δ) értéke 90° . Arra kell ügyelni, hogy a terhelő nyomaték ne haladja meg a motor maximális nyomatékát egyetlen pillanatra sem, mert

akkor a motor kiesik a szinkronból. Ekkor a motor által keltett nyomaték lüktető lesz, amely forgást nem tud létrehozni és a motor leáll (8. ábra).



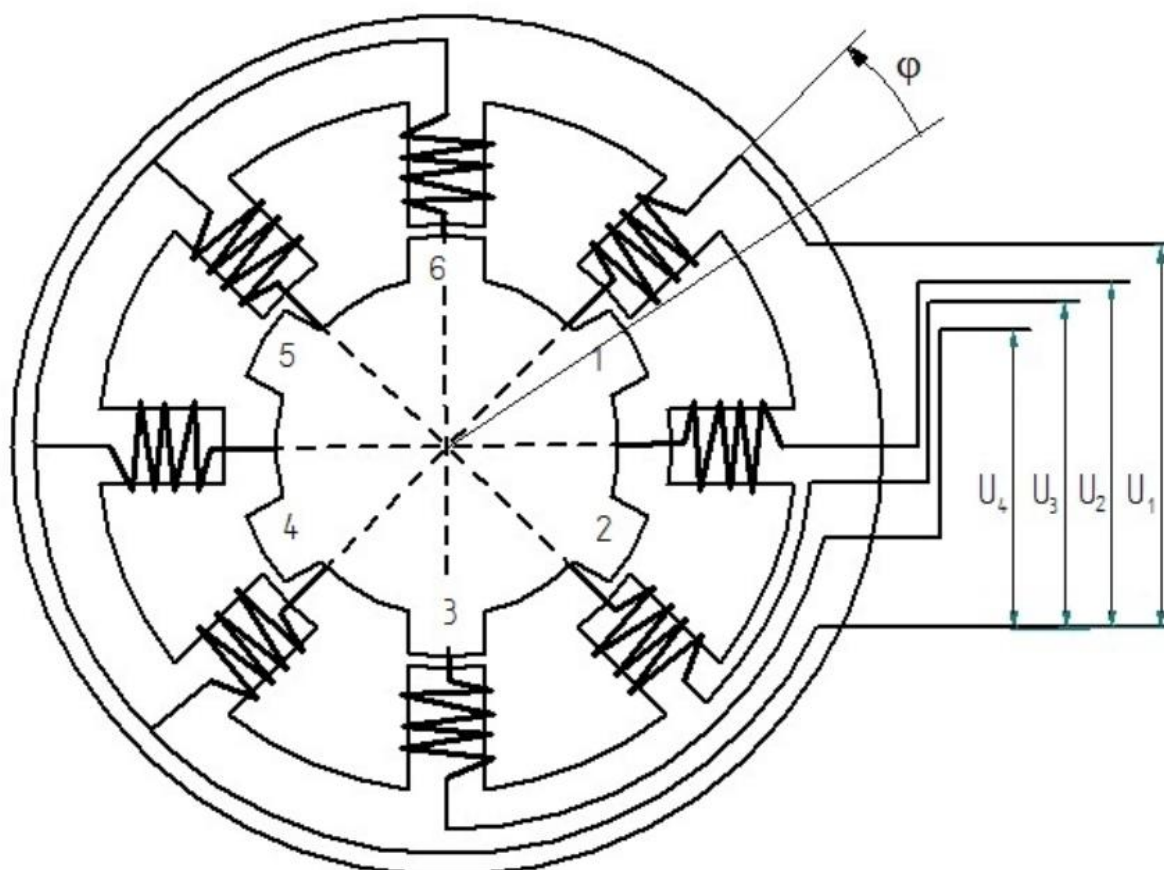
8. ábra Szinkron gép nyomaték görbéje a terhelés (δ) szög függvényében [8]

A motor fordulatszám vezérlését az aszinkron motor és a BLDC motor vezérléséhez hasonló módon oldjuk meg. A háromfázisú tekercsekre a vezérlés inverterein keresztül juttatjuk az időben megfelelően változó háromfázisú feszültséget. Ezzel forgó mágneses teret tudunk előidézni, mellyel az állandó mágnesekkel ellátott forgórész együtt tud forogni, ha δ nem haladja meg a 90° -ot. Indításnál és fordulatszám szabályozásnál egy pozíció és fordulatszám jeladót használunk, mely jelét feldolgozva a szabályzón keresztül juttatjuk a megfelelő tekercsekre adott időben a feszültséget, úgy, hogy az előbb említett feltételek teljesüljenek.

Kapcsolt reluktancia motorok

A kapcsolt reluktancia motor az egyik legolcsóbb kialakítású villamos gép. A forgórészben nincsen drága tekercselés vagy még drágább ritkaföldfém mágnes, hanem lágy mágneses anyagból készül. A forgórész és az állórész is fogazott kialakítású (amely az egyetlen drága technológiája a motor gyártásnak) eltérő fogszámmal, ahol az állórész fogszáma kisebb a forgórészénél. Csak az állórész tekercselt. Fázisszám különböző lehet, 1-6 a szokásos, de a 4/4-es üzemhez legalább 3 fázis szükséges.

Az állórész tekercseinek az öninduktivitása függ a mozgórész helyzetétől. Amikor az állórész megfelelő tekercseit gerjesztjük, például az U_1 feszültség rákapcsolásával (9. ábra) a forgórész kiálló pólusait az állórész adott tekercseihez fogja vonzani, mert ezáltal a teljes mágneses kör reluktanciája (mágneses ellenállása) kedvező lesz. Ez az elfordulás mindig vonzó jellegű, független az adott polaritástól. Amikor a forgórész eléri az adott szöghelyzetet, és a kör mágneses ellenállása minimális lesz akkor a következő tekercset gerjesztik (például U_1 ki- és U_2 bekapcsolásával), a továbbforduláshoz. Lényeges, hogy a forgórész szöghelyzete pontosan legyen érzékelve, mert a vezérlés ennek függvényében kapcsolja a forgórész tekercseit.



9. ábra Kapcsolt reluktancia motor (saját szerkesztés)

A gépnek nagy nyomatéka van álló állapotban is. A motor jelleg és a forgórész kis inerciája miatt nagy fordulatszámra is alkalmas. A fordulatszám-nyomaték határjelleggörbe alkalmassá teszi vontatási feladatok elvégzésére.

Egyszerű, megbízható elektronikus táplálás (egyirányú áramvezetés, tápfeszültség rövidzárása nem lehetséges). Felhasználástól függően sokféle konstrukció alakítható ki (fázisszám, állórész pólusszám, rotor fogság, elektronika, irányítási stratégia)

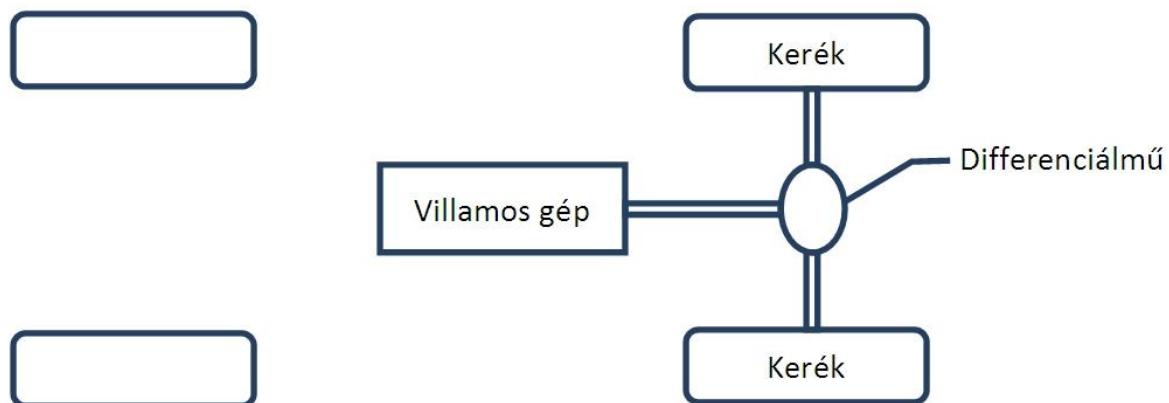
A motor hatásfoka igen jó, mivel a nyomatékképzéshez nincs szükség rotor áramra. A motor kialakítása miatt az állórészen van elég hely a tekercselés elhelyezésére. Sokszor unipoláris gerjesztés is elegendő, ahol a fellépő hiszterézis veszteség kisebb.

A motor fő hátrányai közé sorolható a bonyolult irányítás mivel a nyomaték-áram összefüggése ennél a motornál nemlineáris. Az üzennél felléphet nagy nyomatéklüktetés, ezt csak megfelelő (általában drágább) konstrukcióval és csak korlátozott fordulatszámra lehet eliminálni. A motor a nyomatéklüktetés miatt elég zajos lehet, ezt csak a lüktetés csökkentésével és a pólusszám növelésével lehet csökkenteni.

AZ ELEKTROMOS AUTÓKNÁL HASZNÁLT HAJTÁSLÁNC LEHETSÉGES KIÉPÍTÉSE

Egy meghajtómotoros megoldás

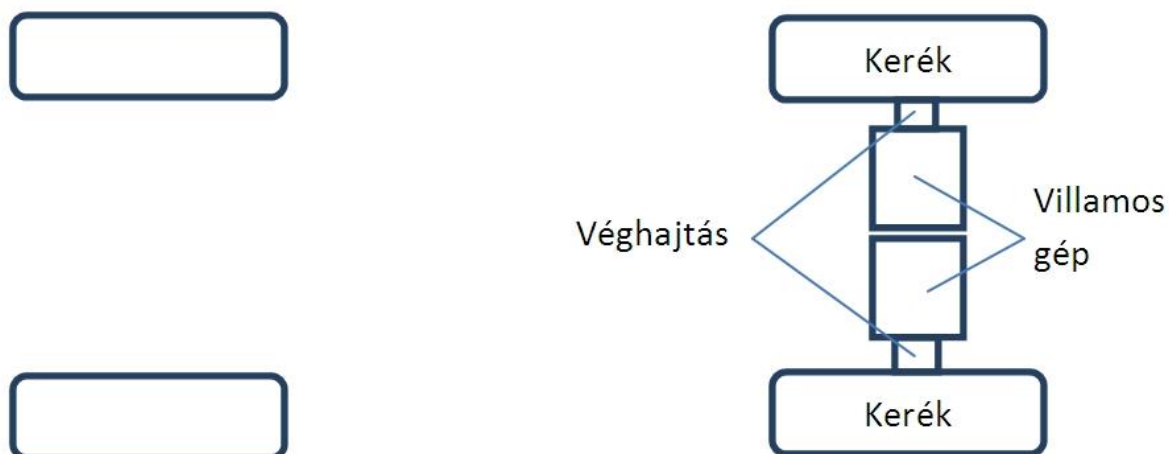
Egy villanymotor van alkalmazva, ami főtengelykapcsoló és sebességváltómű nélkül közvetlenül a differenciálművet hajtja meg. Állandó áttétel beépítésére van lehetőség. Orrmotoros és farmotoros kialakításban is használatos.



10. ábra Elektromos autó kialakítása differenciálmű használatával [7]

Kerekenkénti közvetlen meghajtás a differenciálmű kiiktatásával

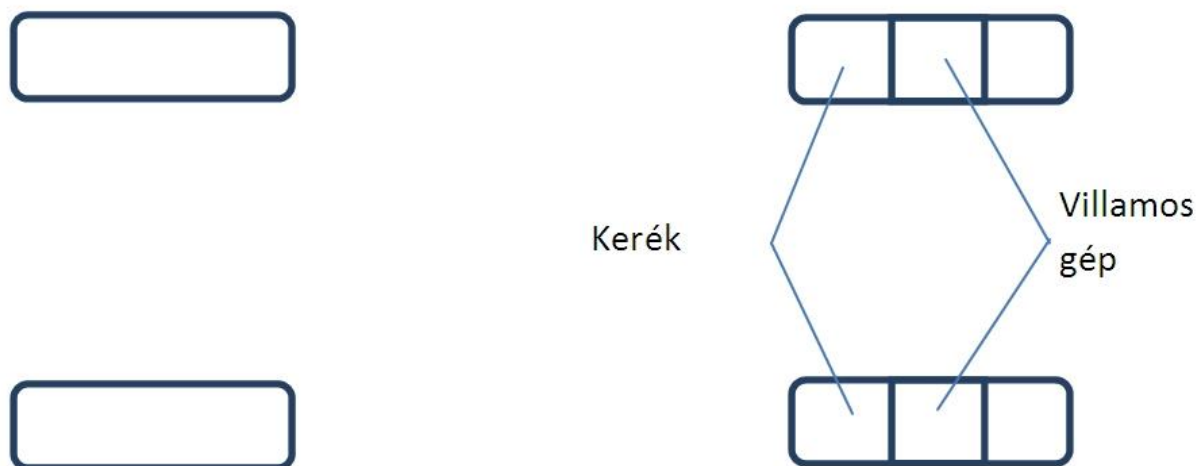
A kerekeket külön-külön villanymotor hajtja meg, differenciálmű nincs. A kerekek eltérő fordulató hajtásáról a vezérlő elektronika gondoskodik. Állandó áttétel beépítésére van lehetőség a kerék és a hajtó motor közé.



11. ábra Elektromos autó kialakítása differenciálmű használat nélkül [7]

Kerekenkénti meghajtás a kerékbe épített villanymotorral

Az előző megoldáshoz hasonlóan itt sincs differenciálmű. A motor közvetlenül áttétel nélkül hajtja meg a kerekeket. A villanymotor olyan kialakítású, hogy az álló rész köré építik a forgórészt.



12. ábra Elektromos autó kialakítása a kerék közvetlen hajtásával [7]

AZ ELEKTROMOS AUTÓ ÖSSZEHAONLÍTÁSA HAGYOMÁNYOS BELSŐÉGÉSŰ MOTORRAL SZERELT AUTÓVAL

Egy jármű hajtásához és irányításához, függetlenül a meghajtás módjától és kialakításától, mindenképpen meg kell találni annak a módját, hogy a hajtás energiaszükségletét fedező energiát tárolni és tölteni lehessen a gépjárműbe. Ezen kívül a jármű szerkezetének vagy hajtásláncának gondoskodni kell, arról az átalakításról mely során a tárolt energiát a kerék forgási ezzel együtt a jármű mozgási energiájává alakítja. Elektromos járművek esetében az energia nagyobb részének a tárolását többnyire akkumulátorok segítségével végzik, vagyis a belsőégésű motorok üzemanyagtankjának felelnek meg energetikai szempontból. Az elektromos járművek esetében más energiatárolási megoldások is ismertek, mint például a nagy kapacitású kondenzátorok, speciálisan kialakított nagy fordulatszámú lendkerekek és figyelembe véve az elektromos járműveken használt regeneratív fékezési megoldást, a haladó jármű mozgási energiája is részben energiatárolásnak tekinthető. A kerék és a talaj között kifejtett vonóerő, ezzel együtt a sebesség és a gyorsulás szabályozására a belsőégésű motorok üzemanyagellátó rendszere gondoskodik, általában a ciklusonként befecskendezett üzemanyag mennyiségének a szabályozásával. Elektromos járművek esetében a járművet meghajtó villanymotor kapcsaira jutó elektromos energia mennyisége van szabályozva. A szabályozást egy erre célra kialakított vezérlő egység végzi ami általában impulzus modulációval állítja be a belsőégésű motorokhoz hasonlóan kiépített gázpedál állása alapján a szükséges energia mennyiséget [10], [11].

Külső megjelenésre az elektromos autó csak a kipufogócső hiányában különbözik a hagyományoshoz képest. A szerkezeti kialakításban viszont meglehetősen nagy a különbség. Ennek a fő oka a villanymotor eltérő energiaellátása, mérete kialakítása valamint a jelentős mértékben különböző külső karakterisztikája. Ismert a belsőégésű motor külső karakterisztikája, ami üzemeltetési szempontból kedvezőtlen. Szűk fordulatszám tartomány, még szűkebb nyomatéki tartomány, ezen kívül ennek a motortípusnak a stabil teljesítmény leadásához egy minimális fordulatszámra van szüksége. Ebből következik, hogy a belsőégésű

motor gépjárműben történő alkalmazásához összetett és nagy tömegű erőátviteli rendszerre van szükség, ami főtengelykapcsolót és sebességváltóművet magába kell, hogy foglaljon. Elektromos hajtás esetén az erőátvitel, attól függően, hogy hova építik be a villanymotort jelentős mértékben leegyszerűsíthető, vagy akár el is hagyható, ahogy az az előzőekben már be lett mutatva. Amennyiben a meghajtó villanymotorból egy van beépítve központi helyre ebben az esetben csak differenciálműre esetleg haránthajtásra van szükség. A meghajtó villanymotor, köszönhetően a szerkezeti kialakításának közvetlenül beépíthető a kerékbe is. Ebben az esetben differenciálműre sincs szükség. A villanymotor, ellentétben a belsőégésű motorral álló helyzetben is képes forgató nyomatékot leadni, vagyis a főtengelykapcsoló használata minden esetben elkerülhető. A kedvező külső karakterisztika pedig fölöslegessé teszi a sebességváltómű használatát.

Egy korszerű dízelmotor hatásfoka 0,45 vagyis a tüzelőanyag égetése során felszabaduló energia 55%-a veszteség [11]. A veszteség legnagyobb hányada termodinamikai jellegű, ami az ide vonatkozó törvényszerűségekből adódik, valamint az alternáló hajtómű szerkezeti kialakításának korlátaiból. A villanymotornak viszont nincs termodinamikai vesztesége. A bevezetett elektromos teljesítményt csak a súrlódás (csapágysúrlódás, szénkefe,...stb) és a tekercsek ellenállása csökkenti. A villanymotor hatásfoka ennek megfelelően lényegesen magasabb, a dízelmotor hatásfokának két- a benzinmotor hatásfokának pedig akár a háromszorosát is elérhetik, szám szerint 0,8 és 0,96 között lehet. A bevezetett energia 80-96%-a tárolódik a jármű mozgási energiájába. A fajlagos kilométer költségekre ez jelentős hatással bír. A segédberendezések energiaellátása a belsőégésű motor esetében a motoron illetve az azt meghajtó generátoron keresztül történik, tovább rontva a hatásfokot. Elektromos jármű esetén a segédberendezéseket közvetlenül az akkumulátor látja el energiával.

Karbantartás-igényesség illetve megbízhatóság szempontjából összehasonlítva a két motortípust a villanymotor lényegesen kevesebb alkatrészből tevődik össze, és ami nagyon lényeges minimális a mozgó és ezáltal súrlódásnak kitett alkatrészek száma. Karbantartási igénye a villanymotornak minimális vagy egyáltalán nincs. Ezzel szemben a belsőégésű motor több száz mozgó, finoman illesztett, jelentős kenésigénnyel rendelkező alkatrészből áll. Ebből következően jelentős a karbantartás igény, és a javítási költségek is magasak. A villanymotor esetében a karbantartás többnyire kimerül csapágyak esetleges kenésével illetve cseréjével.

Összköltségeket figyelembe véve az elektromos autó ára a hagyományoshoz képest lényegesen magasabbak, típusoktól és a felhasználási céltól függően ez mintegy 2-3-szoros is lehet a belsőégésű motorral szerelthez képest. A fenntartási költségek viszont várhatóan alacsonyabbak. A legújabb technológiával készült (Li-ion akku) elektromos autók esetében viszont még nem rendelkezünk megfelelő üzemeltetési tapasztalattal, hogy a fenntartási költségek tekintetében pontos arányokat lehessen megállapítani. Ezeknél a járműveknél kulcskérdésnek tűni az akkumulátorok élettartama, ezek ugyanis a jármű árának mintegy 20-30%-át is kitehetik.

A fenntartási költségek esetében meg kell még említeni az elektromos autóknál használt regeneratív fékezést. Ennél az eljárásnál ugyanis a jármű mozgási energiájának egy részét az ilyen esetekben generátorként működő villanymotor elektromos energia formájában visszatáplálja az akkumulátorokba. Az eljárás csökkenti az energiafogyasztást és kíméli a hagyományos autókban használttal megegyező fékberendezést, az eredmény a kevésbé kopó ebből adódóan nagyobb élettartamú fékbetétek.

Nehezebben összehasonlítható a káros anyag kibocsátás. Az elektromos járműveknek ugyanis közvetlenül, csak lokálisan vizsgálva semmilyen káros anyag kibocsátásuk nincs, de meg kell jegyezni, hogy nem primer energiaforrást használnak. Az akkumulátorokban tárolt elektromos energiát meg kell termelni valamilyen eljárással. Ez történhet megújuló energiaforrással mint például szél, nap vagy víz energia felhasználásával. Ezekben az

esetekben továbbra is zéró emisszióról beszélhetünk. Más energiaforrás esetén, mint például fosszilis tüzelőanyagok égetése esetén a helyzet teljesen más. Ezekben az esetekben a globális emissziót az energiaforrás emissziójával együtt kell érteni. A káros anyag kibocsátás vizsgálatakor viszont mindenképpen meg kell jegyezni, hogy lokális szinten, hiszen a jármű maga nem bocsát ki káros anyagot, teljes bizonyossággal lehet beszélni a káros anyag kibocsátás csökkenéséről. Ennek különösen nagy jelentősége lehet például nagyvárosokban és ott is főleg nagy csomópontokban és egyéb nagy forgalmú helyeken, ahol a gépjárművek csak nagyon alacsony sebességgel képesek haladni, a járműsűrűség pedig jelentős. Globálisan tovább vizsgálva pedig meg kell jegyezni, hogy az elektromos járművek azonos vontatási teljesítményhez jóval kisebb motorteljesítményt igényelnek a lényegesen magasabb hatásfok miatt, amiből következik, hogy globális szinten is el lehet érni a káros anyag kibocsátás csökkenését még fosszilis energiaforrásokat felhasználó erőművekkel is.

Az elektromos járművek a magas bekerülési költség mellett másik komoly hátránya a hosszú feltöltési idő és az alacsony hatótávolság. Egy feltöltéssel általában 100-150 km-t képesek megtenni. Léteznek olyan elektromos járművek, amelyek hatótávolsága megközelíti a 500 kilométert, de ezek inkább a sport-luxus kategóriába tartoznak, tehát a hatótávolság vizsgálatakor az előbbi és kisebb értékek kerülnek inkább figyelembe véve. A helyzet érdekessége, hogy az alapvetően városi fogyasztói szokások alapján ez a hatótávolság még megfelelő is lenne és a töltés is megoldható az otthoni hálózatról. Nagyobb távolságok megtétele csak nagyon sok megállóval lehetséges, 500 kilométeres hatótávolság esetén a belsőégésű motorral rendelkező autónak lényegében csak az utasok igényei szerint kell megállnia. A jármű egy feltöltéssel ezt a távolságot képes megtenni. Az elektromos autónak viszont legalább négy minimum 20 perces megállóra van szüksége, feltételezve, hogy minden megállónál, például egy autópályán van töltőberendezés.

A feltöltés ideje a háztartásokban rendelkezésre álló hálózatról 230V feszültség és maximálisan 16A töltőáramot feltételezve 6-8 óra. Ez megfelelő lehet az autó városi használata és otthoni éjszakai töltése esetében. Nagyobb napi kilométer teljesítése esetében, amennyiben a jármű használata szintén helyi jellegű ez megoldható gyorsöltő állomások segítségével, ahol nagy (400A) áramerősséggel a feltöltés mintegy 20 perc alatt elvégezhető. A jelenleg használt korszerű akkumulátorok esetében viszont korlátozva van az egymás után elvégezhető gyorsöltések száma. Ez azt jelenti, hogy általában három gyorsöltés után legalább egy lassú 6-8 órás töltést kell közbeiktatni.

KÖVETKEZTETÉSEK

Az elektromos gépjármű nem nevezhető új megoldásnak, hiszen ezt a hajtási megoldást már több mint száz éve megalkották. A belsőégésű motorok viszont olyan előnyökkel rendelkeztek, amely hatására a személy és tehergépjárművek piacán tisztán egyeduralkodóvá váltak.

Az elmúlt évtizedben viszont az akkumulátor technikában olyan jelentős és sikeres fejlesztések zajlottak le, amely éreztette a hatását a gépjárműtechnikában is. A hibridek mellett megjelentek a tisztán elektromos hajtású gépjárművek is.

Az elektromos hajtás jelenleg még komoly hátrányokkal rendelkezik, ezek közül a legnagyobb korlátot a mintegy 150 km-es átlagos hatótávolság és a hosszú töltési idő jelenti. A beszerzési árak jelenleg a többszöröse a hagyományos gépjárművekének, de itt figyelembe kell venni, hogy a gyártott darabszám alacsony és a fejlesztési költségek ezt rendkívüli mértékben megterhelik. A cikkben bemutatott egyszerű szerkezeti kialakítás viszont lehetővé teszi, megfelelő gyártási darabszám mellett az árak jelentős mértékű csökkentését.

Ami az elektromos meghajtás mellett szól, hogy a piaci részesedés évente egyértelműen nő és az elmúlt években egyre több gyártó jelent meg a piacon ilyen autóval. Az ezzel foglalkozó elemzők többsége a piaci részesedés további növekedését jósolja.

A beszerzési árak változása mellett a másik fontos befolyásoló tényező, ami meghatározó lehet ezen a területen a környezetvédelem és ezen belül a CO₂ emisszióra vonatkozó helyi és nemzetközi kvóták változása. Az elektromos autónak ugyanis a helyi szinten nincs káros anyag kibocsátása. Globálisan vizsgálva már más a helyzet ugyanis itt figyelembe kell venni az elektromos energiát termelő erőművek emisszióját is. Ennek megfelelően ennek a technológiának az elterjedését az ide vonatkozó nemzetközi és országokon belüli szabályozás jelentős mértékben fogja befolyásolni.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] <http://greenfo.hu/hirek/2017/01/13/felporgott-az-elektromos-autok-piaca-tavaly-europaban>. (letöltve: 2017. 04.13.)
- [2] GÁVAY, GY.: *Az LPG alkalmazásának lehetőségei a Magyar Honvédség gépjárműtechnikai eszközeiben alternatív tüzelőanyagként.* 1, 2012., Hadmérnök, VII. kötet, old.: 59-66.
- [3] GÁVAY, GY.: *Az etilénlikol motorolajra gyakorolt káros hatásának vizsgálata.* 1, Bolyai Szemle : 2012., XXI. kötet, old.: 17-27.
- [4] GÁVAY, GY.: *A tervszerű fenntartási rendszer és az amerikai forrásból származó páncélos- és gépjárműtechnikai eszközök karbantartási rendszere.* 4, HONVÉDSÉGI SZEMLE, 2015., old.: 85-92. ISSN 1216-7436.
- [5] https://www.pwc.com/hu/hu/kiadvanyok/assets/pdf/merre_tart_az_elektromos_autok_piaca-e-car_2014.pdf. (letöltve: 2017. 04.13.)
- [6] ERJAVEC, J.: *Hybrid, Electric & Fuel-Cell Vehicles.* USA : DELMAR, 2013.
- [7] XUE, X.D., CHENG, K.W.E., CHEUNG, N.C.: *Selection of Electric Motor Drives for Electric Vehicle.* Hong Kong Polytechnic University : Australasian Universities Power Engineering Conference, 2008.
- [8] VUKOSAVIC, S. N.: *Electrical Machines.* New York : Springer, 2013.
- [9] HALÁSZ, S.: *Villamos hajtások.* Budapest : Műszaki Könyvkiadó, 1993.
- [10] VÉG, R., HEGEDŰS, E.: *Dízelmotorok feltöltése és hűtése, különös tekintettel a katonai felhasználásra tervezett konstrukciókra. I. rész.* 6, 2016., Haditechnika, 50. kötet, old.: 6-11.
- [11] VÉG, R., HEGEDŰS, E.: *Dízelmotorok feltöltése és hűtése, különös tekintettel a katonai felhasználásra tervezett konstrukciókra. II. rész.* 1, 2017., Haditechnika, 51. kötet, old.: 7-11.
- [12] EHSANI, M. ET AL.: *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles.* Boca Raton London New York Washington, D.C.: CRC PRESS, 2005.