Vrste i karakteristike motora za električna vozila

Kujavec, Benjamin

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:608336

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-21**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA

Stručni studij

VRSTE I KARAKTERISTIKE MOTORA ZA ELEKTRIČNA VOZILA

Završni rad

Benjamin Kujavec

Osijek, 2023.

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

Obrazac Z1S: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za završni ispit na preddiplomskom stručnom studiju

Osijek, 16.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za završni ispit na preddiplomskom stručnom studiju

Ime i prezime Pristupnika:	Benjamin Kujavec
Studij, smjer:	Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	A 4373, 22.07.2016.
OIB Pristupnika:	99135162721
Mentor:	Doc. dr. sc. Venco Ćorluka
Sumentor:	,
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	doc. dr. sc. Goran Rozing
Član Povjerenstva 1:	Doc. dr. sc. Venco Ćorluka
Član Povjerenstva 2:	dr. sc. Krešimir Miklošević
Naslov završnog rada:	Vrste i karakteristike motora za električna vozila
Znanstvena grana završnog rada:	**Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)**
Zadatak završnog rada	
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (završnog rada):	Vrlo dobar (4)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	16.09.2023.

Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.
	Datum:

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 10.10.2023.

Ime i prezime studenta:	Benjamin Kujavec
Studij:	Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	A 4373, 22.07.2016.
Turnitin podudaranje [%]:	12

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**: Vrste i karakteristike motora za električna vozila**

izrađen pod vodstvom mentora Doc. dr. sc. Venco Ćorluka

i sumentora ,

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.
Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. ELEKTRIČNA VOZILA 2

2.1. Pogonski sustavi električnih vozila 5

2.2. Podjela elektromotora 8

2.3. Izbor motora 9

3. INDUKCIJSKI MOTORI 10

3.1. Princip rada i građa motora 11

3.2. Karakteristike 13

3.3. Primjena u električnim vozilima 16

4. SINKRONI MOTORI S PERMANENTNIM MAGNETIMA (PMSM) 17

4.1. Princip rada i građa motora 17

4.2. Karakteristike 18

4.3. Primjena u električnim vozilima 20

5. SINKRONI RELUKTANTNI MOTORI (SynRM) 21

5.1. Princip rada i građa motora 21

5.2. Karakteristike 23

5.3. Primjena u električnim vozilima 24

6. ISTOSMJERNI MOTORI BEZ ČETKICA (BLDC) 25

6.1. Princip rada i građa motora 26

6.2. Karakteristike 27

6.3. Primjena u vozilima 30

7. USPOREDBA MOTORA U ELEKTRIČNIM VOZILIMA 31

8. ZAKLJUČAK 32

LITERATURA 33

1. UVOD

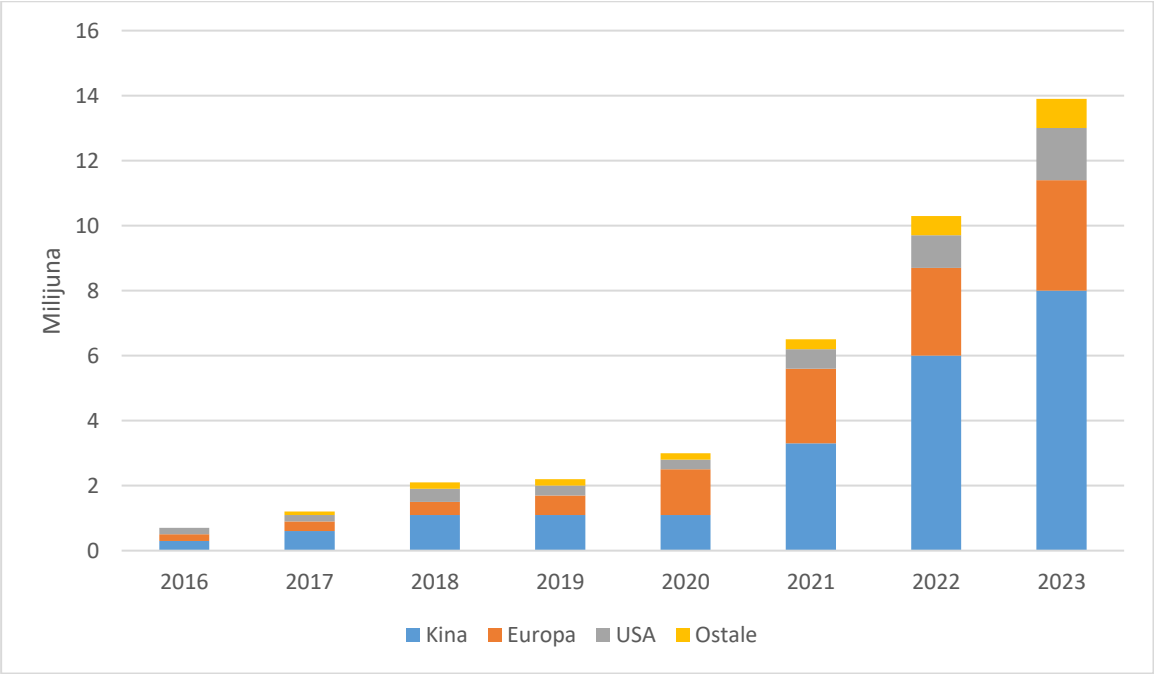
Zbog pogoršanja kvalitete zraka, globalnog zagrijavanja, smanjenja naftnih resursa te rastuće cijene goriva došlo je do usmjeravanja prema istraživanju i proizvodnji energetski učinkovitijih električnih vozila bez emisija štetnih plinova i unaprijeđenih performansi u usporedbi s konvencionalnim vozilima s motorima na unutarnje izgaranje.

U današnje vrijeme automobilska odnosno prometna industrija jedna je od najveći izvora emisija stakleničkih plinova. Istraživanja u ovom području izuzetno su značajan korak naprijed ka unapređenju performansi, učinkovitosti, dometa vožnje vozila pa naposljetku i smanjenju cijena električnih vozila. Sve navedeno rezultiralo bi do većim interesom, prodajom te smanjenjem emisija stakleničkih plinova. Kako bi se razvila unaprijeđena vozila potrebno je istraživati i razvijati komponente u elektroenergetskom sustavu električnih vozila kao što su baterije u kojima je pohranjena električna energija, pogonski sustav motora te upravljački dijelovi i dijelovi energetske elektronike. U ovom radu fokus je na pogonskom sustavu električnih vozila odnosno na električnim motorima. Izbor električnog motora za sustav električnog vozila je presudan korak u dizajniranju cjelokupnog sustava. Mnogobrojni kriteriji poput učinkovitosti, cijene, pouzdanosti, snage i upravljivost moraju se uzeti u obzir.

U ovom radu proučavaju se različiti elektromotori koji se koriste kao pogon električnih vozila, opisane su i uspoređene vrste motora te njihove karakteristike kako bi se istaknule prednosti i nedostaci svakog motora u svrhu donošenja odluke za kakva vozila su određene vrste prikladnije, a opisani su i principi rada te građa motora. Kao što je već poznato, postoje razne vrste elektromotora za industrijske primjene, a koriste se za pogon svih vrsta industrijskih uređaja. Što se tiče vožnje, gotovo sve vrste električnih motora bi se mogle koristiti za pogon električnih vozila. Međutim, neke karakteristike motora moraju se uzeti u obzir kada se elektromotori primjenjuju na vozila, poput učinkovitosti, težine, cijene, pouzdanosti, snage i dinamike obilježja električnih vozila.

2. ELEKTRIČNA VOZILA

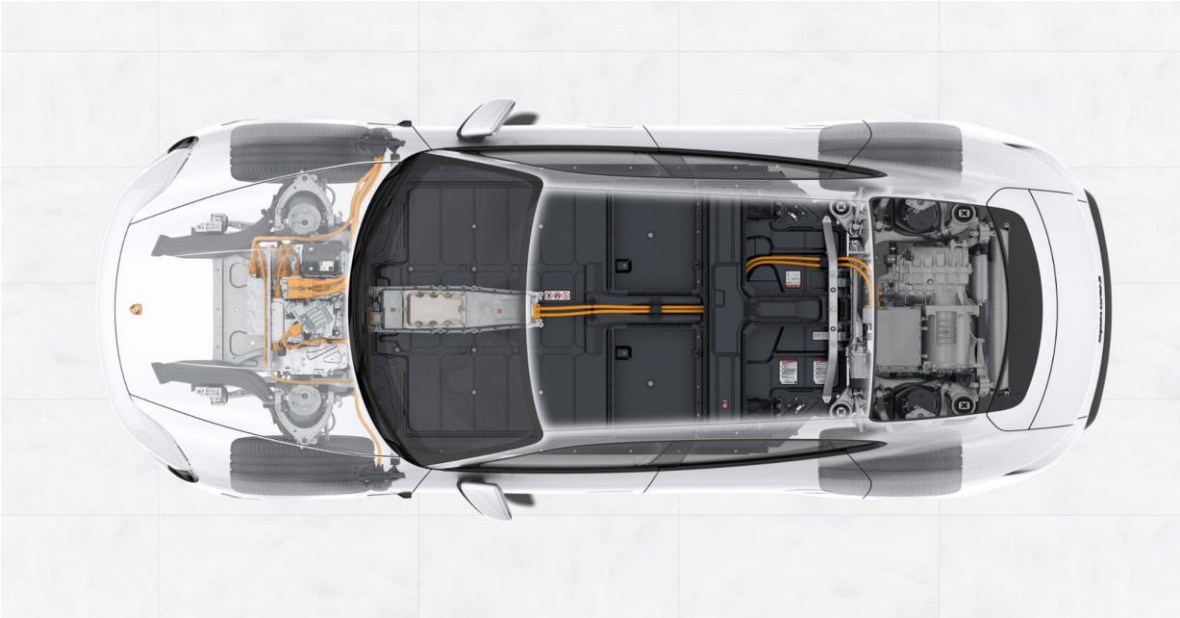
Električna vozila su vozila koja koriste jedan ili više električnih motora za pogon. Napajana su isključivo električnom energijom. Električna energija krajem 19. stoljeća bila jedna od preferiranih metoda za pogon motornih vozila. Međutim zbog tadašnjih nedostataka električnih vozila i unaprjeđenja motora s unutarnjim izgaranjem dovelo je do smanjenja korištenja vozila na električni pogon. Motori na unutarnje izgaranje bili su dominantna metoda pogona cestovnih vozila kroz 20. stoljeće, no električna energija je ostala česta u drugim vrstama vozila, poput vlakova, tramvaja i manjih vozila svih vrsta. U današnje vrijeme, zahvaljujući razvitku tehnologije posebice akumulaciji električne energije, odnosno baterija, ponovo dolazi do interesa za električna vozila. Osim električnih vozila na tržištu su se pojavila i hibridna vozila. Ona za pogon koriste više izvora energije, najčešće kombinaciju konvencionalnog motora s unutarnjim izgaranjem i elektromotora. Tržište električnih vozila raste sve više iz godine u godinu, kao što je vidljivo na dijagramu prodaje električnih automobila na slici. 2.1 što nije iznenađujuće s obzirom na prednosti električnih vozila naspram konvencionalnih vozila.



Sl. 2.1 Prodaja električnih automobila [1]

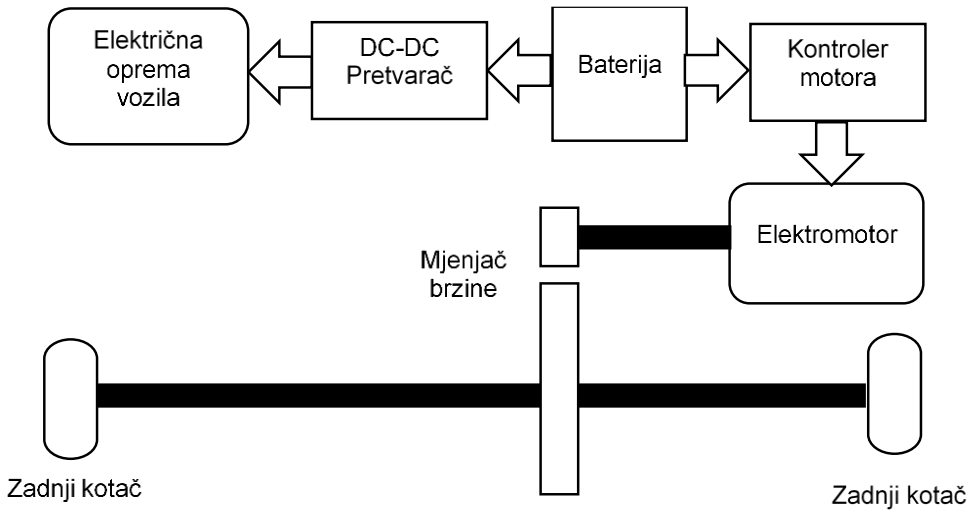
Unatoč brojnim prednostima električnih vozila postoje i nedostatci kao što su visoka cijena električnih vozila u usporedbi s konvencionalnim vozilima čemu najviše pridonosi cijena litijskih ćelija od kojih se sastoje baterije u električnim vozilima. Nadalje veliki problemi su ograničena akumulacija energije te nedostatak javne i privatne infrastrukture za punjenje vozila električnom energijom. Ovi problemi mogu se riješiti daljnjim ulaganjima te razvojem tehnologije električnih vozila. Na svijetu trenutno većinu električnih vozila tvore vozila na dva i tri kotača i lakša električna vozila koja su jednostavnija za proizvodnju i prodaju. Ali u ovom radu fokus je uglavnom na pogonskim sistemima automobila zato što su proizvođači automobila najčešće oni koji razvijaju pogonske sisteme svojih vozila.

Neki od trenutno najboljih proizvođača električnih automobila na svijetu su Tesla Motors i Porsche i Audi odnosno Volkswagen grupa, ali treba spomenuti i kineske proizvođače poput BYD i NIO koji bilježe vrlo velike poraste prodaja. Gotovo svi poznatiji proizvođači automobila se okreću prema razvoju i proizvodnji električnih automobila te njihovih komponenti zbog povećanog interesa za električne automobile.



Sl. 2.2 Porsche Taycan Turbo S s vidljivim komponentama [2]

Prije je spomenuto kako električna vozila koriste električne motore za pogon, u daljem tekstu bit će opisano na koji način funkcioniraju električna vozila. Shema sustava električnog vozila prikazana je na sl. 2.3.



Sl. 2.3 Shema sustava električnog vozila [3]

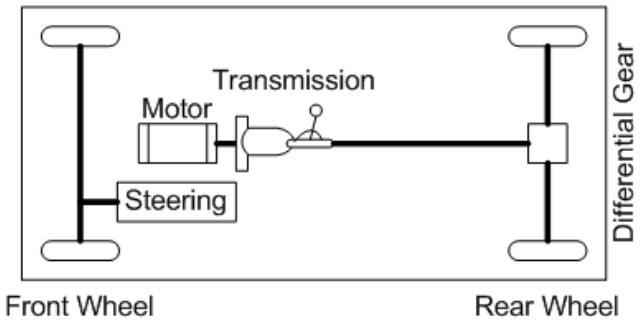
Osnovni princip rada električnih vozila leži u pretvaranju električne energije iz baterije u mehaničku energiju koja pokreće vozilo. Baterija pohranjuje električnu energiju u kemijskom obliku. Baterijski sustavi kod modernijih električnih vozila najčešće se sastoje od litij-ionskih ćelija te sadrže BMS, ili sustav upravljanja baterijom (eng. *Battery Management System*), čija je glavna uloga nadzirati, upravljati i štititi bateriju kako bi se osigurala njezinu sigurnost, produžio vijek trajanja i povećala učinkovitost. Baterija napaja električni motor preko kontrolera koji kontrolira protok električne energije iz baterije prema motoru. On je najčešće komponenta energetske elektronike, izmjenjivač (*inverter*) zato što konvertira istosmjernu struju (*DC*) iz baterije u izmjeničnu struju (*AC*) potrebnu za napajanje električnih motora koji su najčešće izmjenični kod automobila. Baterija također preko istosmjernog pretvarača (DC-DC) koji smanjuje napon i napaja akumulator niskog napona ako ga vozilo sadrži zatim i cijeli niskonaponski sustav vozila uključujući i upravljačku elektroniku koja nadzire i kontrolira rad svih ključnih komponenata u električnom vozilu, uključujući bateriju, motor i kontroler. Također omogućuje vozaču da kontrolira brzinu i smjer kretanja vozila.

2.1. Pogonski sustavi električnih vozila

Vrste pogonskih sustava u električnim vozilima uključuju uglavnom: pogonski način kao što su pogon na prednje kotače, pogon na stražnje kotače ili pogon na sva četiri kotača; broj elektromotora u vozilu; pristup vozilu, na primjer, neizravni ili izravni pogon; i broj stupnjeva prijenosa mjenjača. Stoga, razvrstati ćemo pogonske sustave u električnim vozilima na sljedećih šest konfiguracija;

1. Konvencionalni tip

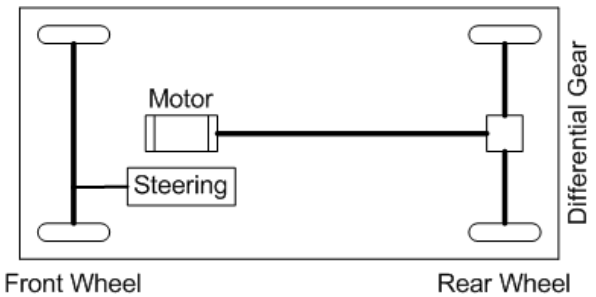
Za konvencionalni tip pogonskog sustava u električnim vozilima, konvencionalni motor s unutrašnjim izgaranjem zamjenjuje se električnim motorom. Mjenjač brzine kontrolira profil brzine i snage odnosno okretni moment kako bi odgovarao zahtjevima opterećenja. kao što je prikazano na sl. 2.4. Ovakav tip nalazi se uglavnom u preradama vozila na električni pogon. [3]



Sl. 2.4 Konvencionalni tip [3]

2. Konvencionalan tip bez kvačila i mjenjača brzine

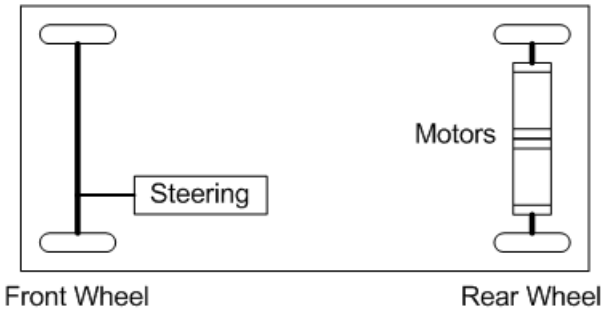
Tip pogonskog sustava bez prijenosa u električnim vozilima pojednostavljuje konvencionalni tip. Uklanjanjem kvačila i zamjenom mjenjača brzine s fiksnim prijenosnikom, ne samo da se smanjuje veličina i težina mehaničkih dijelova, nego se također pojednostavljuje pogonski sklop i povećava pouzdanost. Slika 2.5 prikazuje tip bez prijenosa sustav pogonskog sklopa. [3]



Sl. 2.5 Konvencionalni tip bez kvačila i mjenjača brzine [3]

3. Tip izravnog pogona

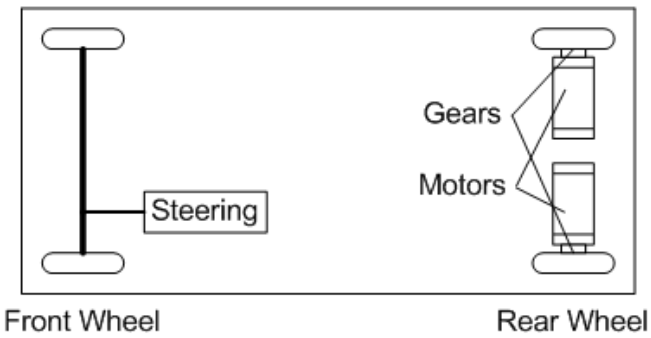
Konvencionalan tip bez kvačila i mjenjača može se pojednostaviti na tip bez diferencijala ako je uklonjen diferencijal, kao što je prikazano na slici 2.6. Na strani karoserije ugrađena su dva motora i imaju zglobove za prijenos snage na kotače. Ovaj tip se smatra se tipom izravnog pogona. Ovim tipom se jednoliko raspoređuje težina te se ostavlja prostor u sredinu za primjerice bateriju i ostale komponente. Eliminacija mjenjača brzine, prijenosnika i diferencijala ne samo da smanjuje broj komponenata pogonskog sustava, gubitak energije u prijenosu, održavanje i težinu, ali i poboljšava ukupnu pouzdanost i učinkovitost sustava. [3]



Sl. 2.6 Tip izravnog pogona [3]

4. Tip pogona s dva motora i dva mjenjača

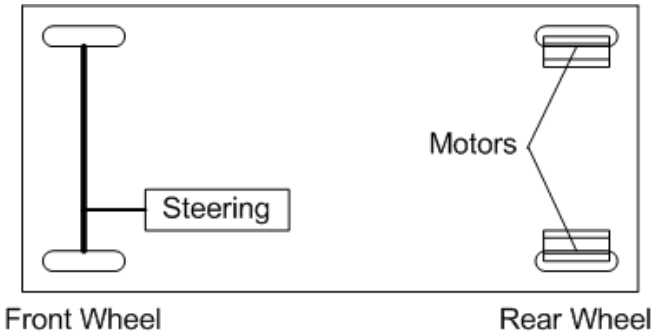
Dva su motora pričvršćena na stranu kotača s pripadajućim mjenjačima brzine kako je prikazano na slici 2.7. Mjenjači se koriste za raspodjelu snage, poboljšavanje brzine te performansi vozila pri određenom broju okretaja motora. Mnogi proizvođači odlučuju se baš za ovaj tip pogonskog sistema. [3]



Sl. 2.7 Tip pogona s dva motora i dva mjenjača [3]

5. Tip s motorima u kotačima

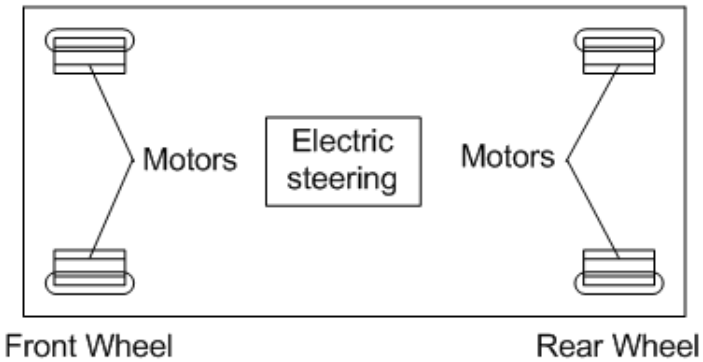
Na slici 2.8, stražnji kotači i motori integrirani su tako da rotacije mogu biti uzrokovane izravno bez mehaničkog mijenjanja brzine. Ovo je tip pogonskog sustava s izravnim pogonom. Ova izvedba s motorima u kotačima koristi se u vozilima koja ne zahtijevaju veće snage motora zbog ograničenih dimenzija kotača i najčešće se koriste istosmjerni motori. Vozila poput električnih bicikala, romobila, mopeda i slično. [3]



Sl. 2.8 Tip s motorima u kotačima [3]

6. Tip s četiri motora u kotačima

Četiri motora u kotačima koriste se za izravan pogon na četiri kotača, odnosno kako je prikazano na slici 2.9. Moguće je da se električno upravljanje se koristi za kontrolu smjera električnog vozila. Ovakav tip pogonskog sistema koristi se u vozilima za specijalne potrebe. [3]



Sl. 2.9 Tip s četiri motora u kotačima [3]

Kako napreduje razvoj sa slike 2.4 na sliku 2.9, pogonski sustav zauzima kompaktnije dimenzije i smanjuje gubitke u prijenosu energije. Za svaki pogonski sistem potrebno je izabrati prikladnu vrstu elektromotora. Primjerice sustav pogonskog sklopa s izravnim pogonom zahtijeva motor koji je lagan, manjih dimenzija, ali i snažan te razvija veliki okretni moment. Međutim motori takvih karakteristika su često skuplji pa neki proizvođači biraju druge vrste motora koji zadovoljavaju njihova jeftinija vozila.

2.2. Podjela elektromotora

Električni motor je stroj koji pretvara električnu energiju u mehaničku. Danas je gotovo neizostavni dio svakog postrojenja, kućnih uređaja, industrije, ali i vozila. Osim električnih motora postoje i motori s unutarnjim izgaranjem, motori na hidraulični pogon, mlazni motori i brojni drugi. Ovdje će biti riječ samo o električnim motorima i to onim za električna vozila. Kod električnih motora postoji puno podjela, a ovdje će biti rečeno samo osnovne podjele. Pod osnovnim podjelama podrazumijeva se podjela električnih motora prema napajanju, prema struji, prema uzbudi i sl. Prema vrsti napajanja električni motori se dijele na istosmjerne i izmjenične, dalje postoji podjela i svakog od njih. Primjerice izmjenični se dijele još na jednofazne i trofazne, na sinkrone i asinkrone, izmjenične kolektorske i drugi. Kod istosmjernih motora osnovna podjela je prema vrsti uzbude pa tako postoje nezavisno uzbuđeni istosmjerni motori, paralelni, serijski, kompaudni i uzbuda putem permanentnih magneta. [4]

Kao što je gore već navedeno izmjenični motori danas su najkorišteniji, koristi ga gotovo svaka industrija. Relativno je jednostavne konstrukcije, a osobito kad se uspoređuje sa istosmjernim. Prema broju faza takvi motori mogu biti jednofazni i trofazni, a glavna podjela takvih motora je na sinkrone i asinkrone. [4]

U električnim vozilima zastupljeni su asinkroni odnosno indukcijski motori, sinkroni motori s permanentnim magnetima, sinkroni reluktantni motori te kombinacije istih.

Istosmjerni motori koji su zastupljeni u električnim vozilima su uglavnom istosmjerni bezkomutatorski motori, odnosno motori bez četkica. A istosmjerni komutatorski motori, s četkicama su se često koristili u starijim električnim vozilima, međutim zbog neučinkovitosti i razvitka drugih vrsta motora ostali su relevantni samo za neke druge primjene.

2.3. Izbor motora

Izbor pogona elektromotora za električna vozila je vrlo važan korak koji zahtijeva posebnu pozornost. Zapravo, automobilska industrija još uvijek traži najprikladniji elektromotorni pogon za električna vozila. Osnovni zahtjevi pri odabiru motora su:

Velika trenutna snaga i velika gustoća snage; visoki okretni moment pri maloj brzini za pokretanje i penjanje, kao i velika snaga pri velikim brzinama za kretanje brzim cestama; vrlo širok raspon brzina s područjem konstantne snage; brzi odziv okretnog momenta; visoka učinkovitost u širokom rasponu brzina s konstantnim zakretnim momentom i područjem stalne snage; visoka učinkovitost za regenerativno kočenje; smanjenje veličine, smanjenje težine i niži moment tromosti; visoka pouzdanost i robusnost za razne uvjete rada vozila; razumni trošak; tolerancija kvara; i suzbijanje elektromagnetskih smetnji regulatora motora.

Kako je ranije objašnjeno električni motori mogu se podijeliti u dvije skupine, ovisno o prirodi električne energije koja se koristi, istosmjerna i izmjenična električna energija. Obje skupine, istosmjerni i izmjenični motori imaju svoje prednosti i nedostatke, a primjenu su pronašli prema zahtjevima opterećenja. Izmjenični motori posebno sinkroni motori s permanentnim magnetima (PMSM) i sinkroni reluktantni motori (SynRM) koriste za vozila koja zahtijevaju veće brzine i bolje performanse. Tesla, Rimac i Porsche neki su od proizvođača koji koriste takve motore. Ostali proizvođači automobila uglavnom koriste indukcijske motore odnosno asinkrone motore zbog isplativosti. A istosmjerni motori se obično koriste u lakšim vozilima s manjim opterećenjima poput manjih električnih automobila i hibridnih vozila, električnih bicikala, mopeda i slično zato što su relativno lagani, jeftini i regulacija broja okretaja je jednostavnija nego kod izmjeničnih motora. I to su uglavnom istosmjerni motori bez četkica (BLDC).

3. INDUKCIJSKI MOTORI

Indukcijski odnosno asinkroni stroj je rotirajući električni stroj izmjenične struje kojem se brzina rotora n pri određenoj frekvenciji mreže na koju je priključen mijenja u uskom području s promjenom opterećenja. Asinkroni strojevi tipični su predstavnici strojeva izmjenične struje male snage, a s obzirom na široku primjenu, proizvode se serijski. Pretežno se upotrebljavaju kao motori, a rjeđe kao generatori. Asinkroni motori izvode se kao trofazni i kao jednofazni, a dijele se na kliznokoultne i kavezne. [4]

Asinkroni motor otkrio je 1883. Nikola Tesla. On je prvi došao do zaključka da se u višefaznom namotu izmjenične struje stvara okretno magnetsko polje, na čemu se zasniva rad asinkronog motora. Poslije tog pronalaska asinkroni motor naglo se razvio i potisnuo iz šire upotrebe do tada vodeći istosmjerni motor. [4]

Izmjenični indukcijski motori su najčešći motori koji se koriste u različitim industrijama kao pogonski strojevi. Jednostavan i robustan dizajn, jeftini, niski troškovi održavanja i izravna povezanost s izvorom izmjenične struje glavne su prednosti izmjeničnih indukcijskih motora.

Postoji više vrsta asinkronih motora. Različite vrste motora prikladne su za različite namjene. Iako je indukcijske motore na izmjeničnu struju lakše dizajnirati od istosmjernih motora, reguliranje brzine i okretnog momenta u raznim vrstama istosmjernih indukcijskih motora zahtijeva veće razumijevanje dizajna i karakteristike ovih motora.

U ovom poglavlju ima riječi o osnovnom principu rada indukcijskih motora; različite vrste, njihove karakteristike, kriteriji odabira za u električnim vozilima i osnovne tehnike upravljanja.

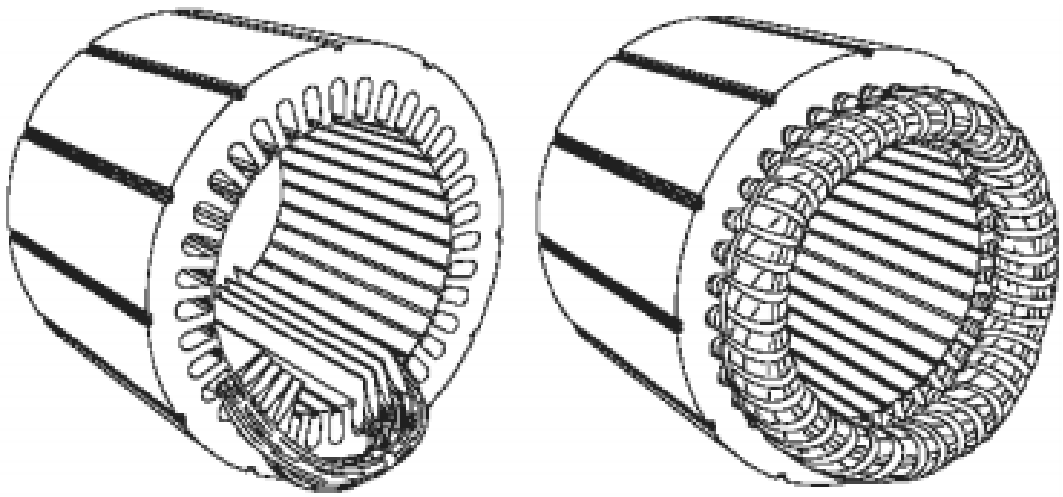
Asinkroni motor kao i svaki stroj sastoji se iz dva osnovna djela rotora na kojemu su smješteni rotorski namoti i stator na kojemu su smješteni statorski namoti koji mogu biti spojeni u spoj zvijezda ili trokut u slučaju trofaznog asinkronog motora. [4]

3.1. Princip rada i građa motora

Kao i većina motora, izmjenični asinkroni motor ima fiksni vanjski dio, stator i rotor, dio koji se vrti iznutra s pažljivo projektiranim zračnim razmakom između statora i rotora. Gotovo svi električni motori koriste rotaciju magnetskog polja za vrtnju svojih rotora. Trofazni izmjenični indukcijski motor je jedini tip kod kojeg se rotacijsko magnetsko polje prirodno stvara u statoru zbog prirode napajanja. Istosmjerni motori ovise ili o mehaničkoj ili elektroničkoj komutaciji kako bi stvorili rotirajuća magnetska polja. Jednofazni izmjenični indukcijski motor ovisi o dodatnim električnim komponentama za stvaranje ovog rotirajućeg magnetskog polja.

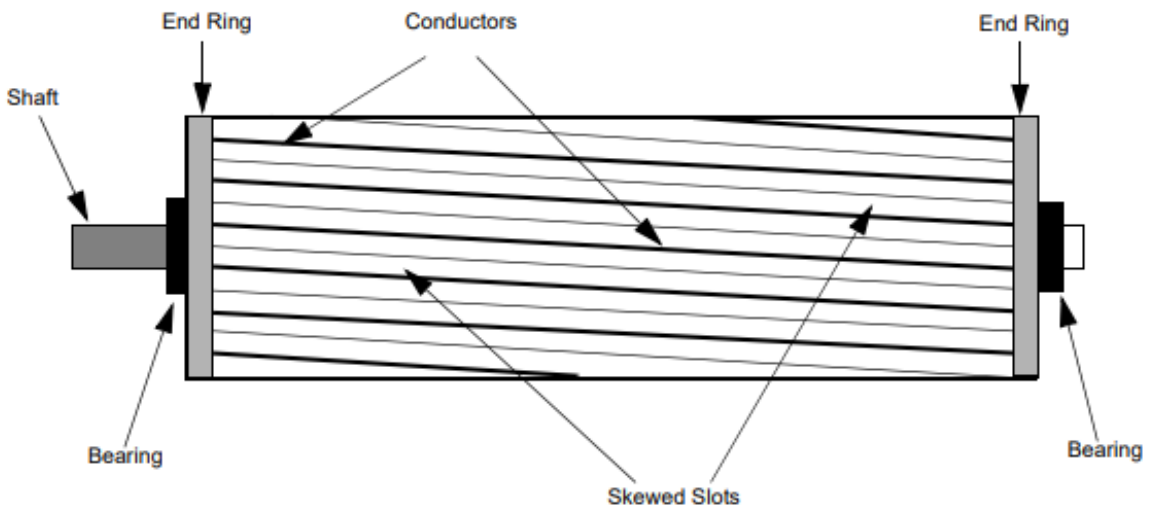
Unutar bilo kojeg elektromotora formirana su dva kompleta elektromagneta. U istosmjernim asinkronim motorima jedan je set elektromagneta nastao u statoru zbog priključenog izmjeničnog napajanja na namote statora. Izmjenična priroda napona napajanja inducira elektromagnetsku silu u rotor stvarajući tako još jedan set elektromagneta; otuda i naziv – indukcijski motor. Interakcijom između magnetskih polja ti elektromagneti stvaraju silu uvijanja, odnosno okretni moment. Kao rezultat, motor se okreće u smjeru rezultantnog okretnog momenta.

Stator se sastoji od nekoliko tankih slojeva aluminija ili lijevanog željeza. Isprešani su i stegnuti da zajedno tvore šuplji cilindar (jezgru statora) s utorima kako je prikazano na slici 3.1. Zavojnice izoliranih žica su umetnute u ove utore. Svaka grupa zavojnica, zajedno s jezgrom koju okružuje, tvori elektromagnet (par polova). Broj polova izmjeničnog asinkronog motora ovisi o unutarnjem povezivanju namota statora. Statorski namoti su spojeni izravno na izvor napajanja. Interno su povezani u tako da je pri primjeni izmjeničnog napajanja rotirajuće magnetsko polje stvoreno. [5]



Sl. 3.1 Stator asinkronog motora [5]

Rotor se sastoji od cilindrične laminirane jezgre s uzdužno postavljenim paralelnim prorezima za nošenje vodiča. Svaki utor nosi bakrenu, aluminijsku ili legiranu šipku. Ove šipke rotora su trajno kratko spojene na oba kraja pomoću krajnjih prstenova, kao što je prikazano na slici 3.2. Prorezi rotora nisu točno paralelno s osovinom. Umjesto toga, oni su iskrivljeni iz dva glavna razloga. Prvi razlog je mirniji rad motora te smanjenje magnetskog zujanja i smanjenje utora harmonika. Drugi razlog je pomoć u smanjenju tendencije zaključavanja rotora. Zubi rotora obično ostaju zaključani ispod zuba statora zbog izravne magnetske privlačnosti između to dvoje. To se događa kada se broj zubi statora jednaki su broju zuba rotora. [5]



Sl.3.2. Rotor asinkronog motora [5]

Rotor je postavljen na osovinu pomoću ležajeva na svakom kraju; jedan se kraj osovine normalno duži nego drugi zbog osovine za pogon tereta. Neki motori mogu imati pomoćno vratilo na neopterećenom kraju za uređaje za prepoznavanje brzine ili položaja. Između statora i rotora, postoji zračni razmak iz kojeg se uslijed indukcije prenosi energija sa statora na rotor. Stvoreni zakretni moment prisiljava rotor, a zatim teret za rotiranje. Bez obzira na vrstu korištenog rotora, princip koji se koristi za rotaciju ostaje isti.

Magnetsko polje stvoreno u statoru rotira se sinkronom brzinom (n_s). [4]

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

(3-1) [4]

gdje je: n_s -sinkrona brzina; f -frekvencija izvora ; p -broj pari polova

Magnetsko polje nastalo u rotoru zbog induciranog napon izmjenične je naravi. Da bi se smanjila relativna brzina u odnosu na stator, rotor se počinje okretati u istom smjeru kao i tok statora i pokušava sustići rotacijski tok. Međutim, u praksi rotor nikad ne uspije sustići statorsko polje. Rotor radi sporije nego brzina polja statora. Ova brzina se zove osnovna brzina (n_b). Razlika između n_b i n_s naziva se klizanje. Klizanje ovisi o opterećenju. Povećanje opterećenja će uzrokovati rotor da uspori ili poveća klizanje. Smanjenje u opterećenje će uzrokovati da rotor ubrza ili smanji klizanje. Klizanje se izražava u postocima i može se određivati sljedećom formulom [4]:

$$s_{\%} = \frac{n_s - n_b}{n_s} \times 100$$

(3-2) [4]

gdje je: n_s -sinkrona brzina; n_b -osnovna brzina; $s_{\%}$-klizanje

3.2. Karakteristike

Zbog svoje konstrukcije indukcijski motori su poznati po svojoj visokoj pouzdanosti. Oni imaju jednostavnu konstrukciju opisanu u prethodnom poglavlju, što smanjuje potencijalne kvarove i održavanje. Indukcijski motori imaju dobru prosječnu razinu učinkovitosti, manja je nego kod ostalih vrsta motora, ali je često čak unatoč tome isplativiji proizvođačima vozila. Indukcijski motori omogućuju širok raspon brzina rada. To je važno za električna vozila koja moraju prilagoditi brzinu motora kako bi se postigla optimalna učinkovitost i performanse. Indukcijski motori imaju visok moment pri niskim brzinama, što je posebno važno za pogon vozila pri pokretanju i ubrzanju. To omogućuje bolju vuču i performanse vozila. Imaju jednostavno upravljanje i kontrolu. Upravljačke strategije poput vektorne kontrole momenta omogućuju precizno upravljanje brzinom i momentom motora. Indukcijski motori su otporni na visoke temperature koje mogu nastati tijekom rada. To je posebno važno u električnim vozilima gdje se motor može zagrijati uslijed dugotrajnog rada ili visokih opterećenja. Često jeftiniji u usporedbi s drugim vrstama električnih motora kao što su sinkroni motori s permanentnim magnetima. To ih čini atraktivnim izborom za mnoge proizvođače električnih vozila koji žele postići dobru ravnotežu između performansi i cijene.

Karakteristike te prednosti i nedostatci indukcijskih motora bit će objašnjeni kroz jedan od primjera ovakvog električnog motora iz privatnog iskustva s električnim vozilima.

Primjer ovog indukcijski električni motor je Siemens 1PV5135-4WS14 prikazan na slici 3.1 inicijalno je namijenjen za električno kombi vozilo Ford Transit razvijano u između Forda i tvrtke Azure Dynamics. Zbog financijskih poteškoća tvrtke, proizvodnja električnog kombija je zaustavljena te električni motori su završili na stečajnoj dražbi te tako postali lako dostupni za primjerice prerade vozila na električni pogon koristeći ove električne motore.

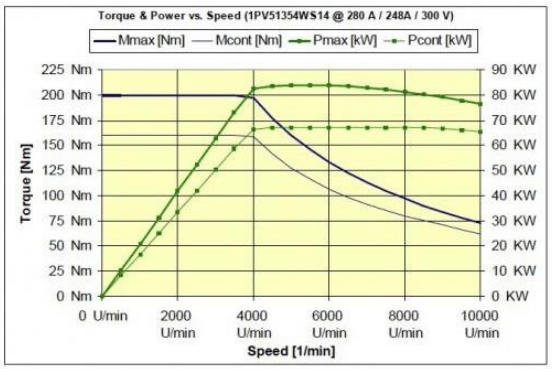
Sl. 3.1 Siemens 1PV5135-4WS14 [6]

Na prvi pogled primjećuje se kako je ovaj motor vrlo masivan i robusnog dizajna što nije čudno s obzirom da proizvođač Siemens često proizvodi motore za teške uvjete. Prednost robusne konstrukcije i jednostavnog dizajna ovog motora je visoka pouzdanost u usporedbi s drugim vrstama motora koji imaju kompliciraniju konstrukciju. Nedostatak ovog motora su relativno velike dimenzije i masa motora s obzirom na snagu odnosno gustoća snage ovog motora je manja u usporedbi s drugim vrstama motora. Iz specifikacije motora koje su vidljive na slici 3.2. mogu se vidjeti spomenute dimenzije i masa motora, ali i ostale vrijednosti poput nazivnog napona i struje, nazivne snage i momenta, brzine vrtnje motora i ostalo. Indukcijski motori često postižu visoke brzine vrtnje motora te je to još jedna prednost ovih motora i jedan od razloga zašto je izabran.

SIEMENS

Drive Motor 1PV5135-4WS14

Type	AC Induction Motor
Cooling Media	Water-Glycol
Rated Voltage DC	300 V
Rated Power	67 KW
Rated Torque	160 Nm
Max. Torque	200 Nm @ 280A
Rated Current	248 A
Max. Speed	10,000 rpm
Weight	90 kg
Dim. (LxWxH)	425 x 245 x 245 mm
Ambient Temperature	- 30 °C to 70 °C
Degree of Protection	IP 65 / 9k



Sl. 3.2 Specifikacije motora Siemens 1PV5135-4WS14 [6]

Električni indukcijski motor Siemens 1PV5135-4WS14 korišten je u svrhu prerade konvencionalnog automobila BMW E39 na električni pogon. Izabrana je ova vrsta motora zbog prednosti navedenih u tekstu prije, ali i zbog relativno niske cijene indukcijskih motora u usporedbi s ostalim vrstama motora korištenim u električnim vozilima. Motor je montiran prema konvencionalnom sustavu pogona iz poglavlja 2.1 prema slici 2.4 što omogućava promjenu prijenosnog omjera pogonskog sustava vozila mehaničkim mjenjačem brzine.

Podešavanjem radnog ciklusa (omjer vremena uključeno/isključeno) pretvarač može kontrolirati efektivni napon isporučen motoru. U ovom sustavu električni motor upravljan je modificiranim kontrolerom, odnosno inverterom koji je korišten u hibridnom električnom vozilu Toyota Prius. Cijela upravljačka elektronika invertera je zamijenjena s novom elektronikom i sustavom otvorenog izvora (*open source)* koji omogućava kontrolu motora poput ovog. Također su napravljene modifikacije na inverteru koje mu dopuštaju siguran rad na većem naponu. Motor je napajan iz litij-ionske baterije nazivnog napona 345V. Modificirani inverter podržava napon do 450V te struju pražnjenja do 350A kontinuirano te 600A vršno.

Upravljanje indukcijskim motorima je složenije od upravljanja ostalim vrstama motora zbog njihove asinkrone prirode i potrebe za kompenzacijom klizanja rotora. Inverterski sustavi često koriste tehniku nazvanu pulsno-širinska modulacija (PWM) za upravljanje izlaznim naponom i frekvencijom isporučenom električnom motoru. Strategija upravljanja kod ovakvih i sličnih invertera često je vektorsko upravljanje (ili upravljanje orijentirano prema polju, FOC). Ova tehnika upravljanja uključuje kontrolu struja motora u dvije ortogonalne osi: d-os (usklađena s magnetskim poljem rotora) i q-os (okomita na magnetsko polje rotora). Neovisnim upravljanjem ovim strujama pretvarač može postići preciznu kontrolu okretnog momenta i brzine.

Kod asinkronih motora često je prisutna visoka struja pokretanja što može rezultirati lošijom upravljivosti vozila i utjecati na ukupnu efikasnost sustava. Visoka struja pokretanja bila je problem kod testiranja ovog vozila prije namještanja parametara kontrolera i "Soft-start" sustava koji postupno povećava struju tijekom pokretanja kako bi se izbjegli nagli udari i opterećenja na električnom sustavu. Tijekom testiranja mjerena je temperatura motora koristeći temperaturni senzor KTY 84-130 implementiran u motor. Uočeno je kako motor brzo postiže visoke temperature, što je još jedan od nedostataka indukcijskih motora. Motor je hlađen mješavinom vode i glikola u omjeru 50-50 pri protjecanju od 8 litara po minuti. Ali s druge strane indukcijski motori su otporni na visoke i niske radne temperature što je velika prednost ovih motora. Pa tako maksimalna temperatura namota ovog motora iznosi 175°C.

3.3. Primjena u električnim vozilima

Indukcijski motori imaju široku primjenu u električnim vozilima zbog svojih karakteristika i prednosti. Indukcijski motori se često koriste kao glavni pogonski motori u električnim vozilima. Pružaju dovoljno snage i momenta za pogon vozila u različitim uvjetima vožnje. Mnogi proizvođači električnih automobila, ali i proizvođači većih i težih vozila poput autobusa i kamiona odlučuju se za ovu vrstu električnog motora u svojim vozilima. Ova vrsta motora pogodna je za vozila kojima veće dimenzije i mase motora ne predstavljaju problem zato što ne zahtijevaju visoke performanse vozila. Neki od velikih proizvođača koji koriste indukcijske motore u svojim vozilima su Mercedes-Benz, Ford, General Motors i to ih koriste uglavnom u većim vozilima poput terenaca i vozila za transport. Tesla je također koristila indukcijske motore u svojim prvim vozilima, dok u novijim vozilima koriste druge vrste motora za pogon poput sinkronih motora s permanentnim magnetima te sinkronih reluktantnih motora koji će biti objašnjeni u sljedećim poglavljima.

4. SINKRONI MOTORI S PERMANENTNIM MAGNETIMA (PMSM)

Sinkroni strojevi pripadaju obitelji električnih rotacijskih strojeva koje karakterizira okretno magnetsko polje u zračnom rasporu stroja, čija sinkrona brzina okretanja ovisi o frekvenciji struja armaturnog namota. Da bi se ostvarila pretvorba električne energije u mehanički rad potrebno je osigurati uzbudno magnetsko polje. Uzbuda u obliku permanentnih magneta postavlja se na rotor, odnosno mirno polje uzbude rotora vuče okretno magnetsko polje statorskog armaturnog namota.

Konstrukcija PMSM-a u osnovi se sastoji od statora na kojemu se nalazi armaturni namot i od rotora na kojemu se nalaze magneti koji stvaraju uzbudno protjecanje. Armaturni statorski namot protjecan je višefaznim strujama koje uz prikladan geometrijski raspored u provrtu stroja stvaraju okretno magnetsko polje. To okretno magnetsko polje s nepromjenjivim uzbudnim protjecanjem rotora stvara zakretni moment, odnosno vrtnju rotora koja se upravlja statorskim strujama. Zbog ograničenja permanentnih magneta u pravilu se ovi strojevi izvode za manje snage, ali s druge strane imaju bolju učinkovitost i manje gubitke u usporedbi s ostalim tipovima električnih strojeva.

Razvoj permanentnih magneta u proteklom stoljeću bio je u skladu s razvojem tehnologije materijala, a unaprjeđenje alata za izradu i za numeričko modeliranje, koji materijale proučavaju na razini molekula, doprinijeli su eksponencijalnom rastu uporabe permanentnih magneta.

4.1. Princip rada i građa motora

Struktura statora sinkronog motora s permanentnim magnetima je slična strukturi indukcijskog motora opisanog u trećem poglavlju. Namoti statora su zavojnice namotane na statorskom željezu. Struja koja prolazi kroz ove zavojnice generira elektromagnetsko polje koje međudjeluje s magnetskim poljem rotora, što uzrokuje rotaciju. Rotor sadrži trajne magnete koji generiraju stalno magnetsko polje. Rotor može biti sastavljen od različitih oblika trajnih magneta, ovisno o dizajnu. Trajni magneti mogu biti smješteni na površinu rotora (SPM) ili unutar rotora (IPM).

Princip rada PMSM-a temelji se na interakciji između statorskog magnetskog polja generiranog električnom strujom i magnetskog polja rotora koji sadrži trajne magnete. Kada se struja primjeni na statorske zavojnice, stvara se rotirajuće magnetsko polje u statoru.

Magnetsko polje rotora reagira na rotirajuće polje statora. Zbog magnetskih privlačnih i odbijajućih sila, rotor će pokušati poravnati svoje magnetsko polje s rotirajućim magnetskim poljem statora. Taj proces stvaranja momenta uzrokuje rotaciju rotora.

Sinkrona brzina rotora (ωr) određuje se pomoću frekvencije napajanja (f) te broja pari polova motora (p). [4]

$$\omega r = \frac{2\pi f}{p}$$

(4-1) [4]

Kontrola brzine i momenta PMSM-a često se postiže prilagodbom amplituda i faze struja koje prolaze kroz statorske namote. To se može postići sofisticiranim upravljačkim tehnikama poput vektorskog upravljanja (FOC) ili direktnog upravljanja momentom (DTC).

4.2. Karakteristike

Sinkroni motori s permanentnim magnetima su poznati po visokoj razini energetske učinkovitosti. To je zbog magnetskog polja koje stvara trajni magnet u rotoru, što smanjuje gubitke energije u motoru. PMSM-ovi mogu pružiti visoku snagu i moment, što ih čini pogodnima za zahtjevne aplikacije, poput električnih vozila i industrijskih pogona. Snaga i moment su linearno proporcionalni veličini i magnetskoj jačini trajnih magneta. Također imaju visoku gustoću snage, što znači da mogu pružiti visoku snagu i moment u malim i kompaktnim dimenzijama. To je posebno važno u električnim vozilima gdje je prostor za motor često ograničen. Sinkroni motori s permanentnim magnetima omogućuju preciznu kontrolu brzine i pozicije rotora. To je zbog točne sinkronizacije između magnetskog polja trajnog magneta i rotacijskog magnetskog polja statora, što omogućuje precizno pozicioniranje i kontrolu brzine motora. Imaju brzi odziv na promjene opterećenja i zahtjeve za momentom. To ih čini pogodnima za aplikacije koje zahtijevaju brzo ubrzanje ili promjenu smjera vrtnje. Važno je napomenuti da sinkroni motori s permanentnim magnetima također imaju neke nedostatke, kao što su veća cijena i složenost upravljanja u usporedbi s indukcijskim motorima. Također, magnetski materijali korišteni u trajnim magnetima mogu biti skupi i osjetljivi na visoke temperature.

Više o karakteristikama te prednostima i nedostatcima ove vrste motora biti će objašnjeno na motorima koji su korištenih u vozilu Rimac Nevera te u potencijalnom budućem Bugatti projektu hibrindnog superautomobila. Proizvođač ovih motora je Cascadia Motion, odnosno BorgWarner Grupa. Osim za Rimca, proizvode električne motore, invertere, prijenosne sustave te ostale komponente za većinu električnih superautomobila te za motosportove poput Forumule E.

Jedan od sinkronih motora s permanentnim magnetima koji proizvode ćemo uzeti za primjer. Naziva se DS-250-115 i prikazan na slici 4.1 ispod.

Sl. 4.1 Električni motor DS-250-115 [7]

Proizvođač navodi kako ovaj motor mase svega 57kg razvija vršnu snagu od gotovo 400kw i vršni moment od 500 Nm. Učinkovitost mu je iznad 95%. Postiže brzinu vrtnje do 12k o/min. Podržava napon do 850V. Motor je hlađen uljem protjecanjem od 8 do 15 litara po minuti te tipična temperatura ulja je do 90°C. [7]

Karakteristika PMSM-ova je da mogu pružiti visoku snagu i moment u odnosu na svoju veličinu i masu što je i slučaj kod ovog motora. Za usporedbu s indukcijskim motorom iz prošlog poglavlja, ovaj primjer PMSM-a je čak 60% lakši od indukcijskog dok u isto vrijeme razvija nekoliko puta veću snagu. Za ovakvu izrazito visoku gustoću snage ovog motora zaslužni su permanentni magneti. Magnetski materijal trajnog magneta omogućuje veću magnetsku gustoću i time veću snagu motora. To je posebno važno u aplikacijama s ograničenim prostorom, poput sportskih električnih vozila. Također magnetski materijal jednim dijelom je zaslužan i za visoku učinkovitost ovih motora. Još jedna prednost ovog motora je također ta što može raditi na višem naponu od primjerice BLDC motora koji će biti objašnjeni u nastavku rada. Može se primijetiti kako je temperatura koju navodi proizvođač niska u usporedbi s indukcijskim motorima koji

podržavaju više temperature. No PMSM se ne zagrijavaju u takvoj mjeri kao indukcijski motori. Povišena temperatura može dovesti do smanjenja magnetske snage i trajnosti magneta, što može utjecati na performanse motora. Što znači da su potrebne jače metode hlađenja poput hlađenja uljem u ovom slučaju. A glavni nedostatak motora s permanentnim magnetima je cijena koju diktiraju trajni magneti. Naime trajni magneti koji su korišteni u ovim motorima su vrlo rijetki i drže visoku cijenu. Često sinkroni motori s permanentnim magnetima postižu i nekoliko puta veću cijenu od ostalih vrsta motora.

4.3. Primjena u električnim vozilima

Sinkroni motori s permanentnim magnetima nalaze široku primjenu u električnim vozilima zbog svojih karakteristika i prednosti. Zbog visoke gustoće snage pogodni su za vozila koja imaju ograničen prostor u vozilu, a zahtijevaju visoke performanse i upravljivost vozila. Neki od proizvođača koji koriste PMSM-ove za pogon svojih vozila u svrhu postizanja visokih performansi su Porsche, Audi i Rimac u vozilima Taycan, e-tron GT i Nevera. Bolidi Formule E također koriste sinkrone motore s permanentnim magnetima gdje postižu gustoće snaga od 14.7 konjskih snaga po kili motora. Osim vozila visokih performansi ovi motori koriste se često i u hibridnim vozilima gdje se uz konvencionalni motor mora implementirati i električni sustav, a zbog karakteristika PMSM je često najbolji odabir. Najveći proizvođač automobila Tesla također koristi sinkrone motore u nekim od svojih vozila, ali u posljednje vrijeme zbog visokih cijena PMSM-ova okreću se drugim vrstama poput sinkronih reluktantnih motora (SynRM) te kombinaciju PMSM i SynRM kako bi se postigla još bolja učinkovitost sustava.

5. SINKRONI RELUKTANTNI MOTORI (SynRM)

U novije vrijeme nedostatak trajnih magneta te njihova visoka cijena učinio je SynRM zanimljivom alternativom PMSM-u i IM u primjeni za pogon električnih vozila. Pogonski sustavi sa sinkronim reluktantnim motorima privlače sve veći interes i prepoznaju se kao vrlo potencijalni za primjene u električnim vozilima.

Prvi teorijski i tehnički uvod u ovaj motor s generiranjem obrtnog momenta reluktancijom i sinusoidalnom magnetskom elektromotivnom silom koristeći konvencionalni stator asinkronog motora napravio je Kostko 1923. godine. Međutim, postoje neki nedostaci u konceptu. Taj motor je imao problema sa stabilnošću i nedostatkom početnog obrtnog momenta tijekom izravnog pokretanja. [8] Kako su poboljšanja pretvarača stvorila mogućnosti upravljanja naponom i učestalost do stroja učinkovitija, poboljšanje ukupnih performansi, postignuta je gustoća snage i faktor snage. SynRM je sličan u dizajnu prema PMSM-u, ali se sastoji od istaknutog rotora bez magneta. Općenito, to može se reći da SynRM ima nekoliko korisnih svojstava, od kojih su neka visoka učinkovitost i veliki okretni moment. Odsutnost namota u rotoru smanjuje ukupnu proizvodnju topline SynRM i PMSM što znači da su oba s ove perspektive posebno pogodna za primjenu u automobilima.

Unatoč gore spomenutim korisnim svojstvima, bitno je istaknuti neke nedostatake SynRM-a. Kao što su valovitost okretnog momenta, nizak faktor snage i potreba malog zračnog razmaka sve doprinosi ograničenoj uporabi SynRM-a u vozilima.

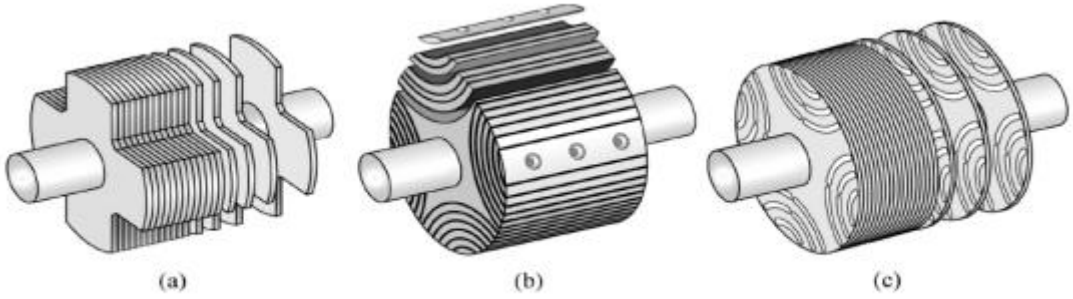
5.1. Princip rada i građa motora

Osnovna ideja iza SynRM-a je da se iskoristi princip reluktancije, tj. težnja magnetskog kruga da zauzme položaj najmanjeg magnetskog otpora. Kada se električna struja primijeni na stator, ona stvara magnetsko polje koje pokušava "privući" rotor prema sebi. Rotor se automatski pozicionira tako da minimizira magnetski otpor, što rezultira rotacijom rotora. Ovaj princip omogućava visoku energetsku učinkovitost i kontrolu brzine motora.

Načelno, SynRM je sličan konvencionalnom sinkronom motoru s istaknutim polovima, ali nema namotaj za pobudu u rotoru. U ovom motoru rotor je izgrađen od pregrada (zraka) i segmenata (čelika). Na temelju strukturne geometrije rotora, rotor SynRM-a može se podijeliti u tri različite kategorije:

1. Tradicionalni jednostavni rotor
2. Aksijalno laminirani rotor
3. Poprečno laminirani rotor

Slika 5.1 prikazuje različite strukture rotora SynRM-a. [9]



Sl. 5.1 Prikaz različitih struktura rotora SynRM-a, (a) tradicionalno jednostavni rotor, (b) aksijalno laminirani rotor, (c) poprečno laminirani rotor [9]

U osnovi, SynRM stator ima tri fazna sinusno distribuiranog namota. Tri fazna namota stvaraju magneto-motivnu silu (MMF) rotirajući se sinkrono s frekvencijom napajanja. Elektromagnetski zakretni moment tada nastaje varijacijama induktiviteta zbog rotacije rotora. Prema rotirajućem MMF-u, rotor se kreće na takav način da je magnetska reluktancija minimalna.

Kada struje koje uzbuđuju stator stvaraju sinusno promjenjivi tok magnetskog polja u zračnom rasporu, rotor će se okretati kako bi poravnao svoju d-os s primijenjenim poljem zbog zakretnog momenta koji na njega djeluje. Neprekidno rotirajuće polje statora uzrokovat će kontinuirano okretanje rotora.

5.2. Karakteristike

Sinkroni reluktantni motori imaju neke od izuzetno dobrih karakteristika zbog kojih postaju zastupljeni u električnim vozilima. Kao što su jednostavna i robusna konstrukcija te otpornost na kvarove. SynRM pogonski sustavi mogu raditi u izuzetno širokom području konstantne snage. Karakteristike obrtnog momenta i brzine SynRM pogonskih sustava izvrsno se podudaraju s opterećenjem električnih vozila. Imaju sposobnost postizanja visokih brzina s širokim područjem konstantne snage. Motor ima visoki početni obrtni moment i visoki omjer obrtnog momenta i inercije. Struktura rotora je izuzetno jednostavna bez namota, magneta, komutatora ili četkica. Otpornost na kvarove motora također je izuzetno dobra. Zbog svoje jednostavne konstrukcije i niske inercije rotora, SynRM ima vrlo brzo ubrzanje i izuzetno visoke brzine rada. Zbog širokog područja rada brzine, posebno pogodan za rad bez prijenosa u pogonu električnih vozila. Osim toga, odsutnost magnetskih izvora (tj. namota ili trajnih magneta) na rotoru čini SynRM relativno jednostavnim za hlađenje i otpornim na visoke temperature. Ovo je posebno važno u automobilskim aplikacijama koje zahtijevaju rad u teškim uvjetima okoline. Korištenjem odgovarajuće kontrole obično je moguće postići prošireni raspon brzine od 2-3 puta u odnosu na nazivnu brzinu.

Glavne prednosti SynRM-a leže u eliminaciji gubitaka bakra u rotoru što omogućava veći kontinuirani obrtni moment u odnosu na istih dimenzija kao kod asinkronog motora (IM), ali i jednostavnoj strukturi rotora koja rezultira nižim troškovima u usporedbi s IM i PMSM-ovima. Sinkrona reluktantna rješenja predstavljaju moguću alternativu za izmjenične pogone u električnim vozilima.

SynRM-ovi imaju nešto manju specifičnu snagu i specifični okretni moment u usporedbi s motorima s trajnim magnetima, generiraju veću buku i imaju niži faktoru snage. Unatoč ovim nedostacima, moguće je dobiti motore visoke gustoće obrtnog momenta i visoke učinkovitosti putem optimizirane konstrukcije rotora. Također dodavanje odgovarajuće količine jeftinih trajnih magneta za pojačavanje faktora snage SynRM-a može biti dobra opcija. Trajni magneti na rotoru ne samo da povećavaju faktor snage već i povećavaju učinkovitost i gustoću okretnog momenta. Ovakav tip motora naziva se PMSynRM i iskorištava najbolje karakteristike obje vrste motora.

5.3. Primjena u električnim vozilima

Ideja sinkroni reluktantnih motora u električnim vozilima u posljednje vrijeme postaju sve više zastupljena. Na to ponajviše utječe jeftinija cijena te bolje karakteristike u usporedbi s drugim vrstama motora korištenih u električnim vozilima. Naime, cijena PMSM-a je uvijek visoka zbog visokih cijena trajnih magneta. Iako indukcijski motori imaju nisku cijenu, njihova učinkovitost nije visoka kao rezultat gubitaka u rotoru. To je SynRM čini perspektivnim i atraktivnim kandidatom za primjenu u električnim vozilima.

Kao što je već spomenuto, dodavanje jeftinijih trajnih magneta odnosno u manjim količinama nego kod konvencionalnih PMSM-ova je odlično rješenje. Proizvođač Tesla je razvio ovakve motore te počeo implementirati u svojim Model 3 vozilima. Ovi motori u povećavaju učinkovitost naspram indukcijskih motora koje su koristili u prijašnjim modelima i smanjuje troškove motora s permanentnim magnetima koje koriste u sadašnjim modelima. Pošto u nekim modelima koriste dva motora, jedan za prednji pogon, jedan za zadnji. Odlična opcija je kombiniranje više vrsta motora na istom vozilu. Primjerice kombinacija SynRM-a za prednji pogon i PMSM-a za zadnji pogon. Na takav način se mogu ispuniti zahtjevi momenta i snage pri niskim i visokim brzinama, a u isto vrijeme optimizirati troškovi proizvodnje.

6. ISTOSMJERNI MOTORI BEZ ČETKICA (BLDC)

Istosmjerni motor je stroj koji istosmjernu električnu energiju pretvara u mehaničku. Razvijani su kroz 19. stoljeće te su ovi motori bili su prvi oblik motora koji su se široko koristili, budući da su se mogli napajati iz postojećih sustava za distribuciju izravne struje tog vremena. Sve do početka 20. stoljeća bili su ključni za razvoj industrije, tehnologije i transporta. Primijenjeni su u mnogim aplikacijama, uključujući tramvaje i druga vozila. Razvoj izmjeničnih motora i napredak u sustavima za prijenos energije putem izmjenične struje postupno su doveli do opadanja popularnosti istosmjernih motora. Unatoč tome, istosmjerni motori nisu nestali. Oni se i dalje koriste u mnogim aplikacijama koje zahtijevaju preciznu kontrolu brzine, visoki početni okretni moment ili rad u ekstremnim uvjetima. Moderni elektronički sustavi za kontrolu i poboljšane tehnologije omogućuju optimizaciju i prilagodbu performansi istosmjernih motora suvremenim potrebama. U posljednje vrijeme primjena raste u automatiziranim pogonima i svugdje gdje je potrebno ekonomično mijenjati broj okretaja u širokom području kao što je primjer u električnim vozilima.

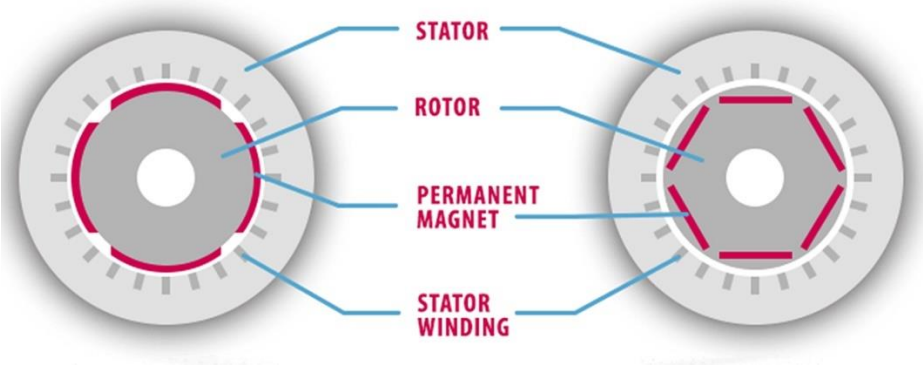
Istosmjerni motori dijele prema načinu komutacije na istosmjerne motore s četkicama i bez četkica. Istosmjerni motori s četkicama dobro su poznati po svojoj sposobnosti da postižu veliki okretni moment pri maloj brzini te njihova karakteristika prikladna je za zahtjeve vuče. Zbog sposobnosti da lako pokreću vozilo i da ih je lako kontrolirati korišteni su u električnim vozilima. Međutim, pogoni istosmjernih motora s četkicama su glomaznih konstrukcija, niske učinkovitosti, niske pouzdanosti i s većom potrebom za održavanje, uglavnom zbog prisutnosti komutatora i četica. Također, trenje između četkica i komutatora ograničava maksimalnu brzinu motora. Zbog tih loših karakteristika istosmjerni motori s četkicama korišteni su u starijim električnim vozilima sve do pojave i razvoja drugih vrsta električnih motora. Često se još koriste u tramvajima i električnim viličarima. No i u tim aplikacijama ih zamjenjuju druge vrste.

U ovom poglavlju fokus će biti samo na istosmjernim motorima bez četkica (BLDC), na njihovoj građi i principu rada te na karakteristikama i primjeni ovih motora.

6.1. Princip rada i građa motora

Istosmjerni električni motor bez četkica (BLDC) je sinkroni motor koji koristi izravno istosmjerno napajanje. Kod BLDC-a komutacija se odvija elektronički umjesto četkicama. Koristi elektronički kontroler za prekidanje istosmjerne struje prema namotajima motora, stvarajući magnetska polja koja se efektivno rotiraju u prostoru, a za kojima slijedi rotor s trajnim magnetima. Kontroler prilagođava fazu i amplitudu impulsa istosmjerne struje kako bi kontrolirao brzinu i okretni moment motora. Ovaj sustav upravljanja je alternativa mehaničkom komutatoru (četkicama) koji se koristi u istosmjernim motorima s četkicama. Ovakav dizajn bez četkica pruža nekoliko prednosti u odnosu na motore s četkicama, uključujući poboljšanu učinkovitost, pouzdanost, smanjenje potrebe za održavanjem i dulji životni vijek.

Konstrukcija sustava BLDC motora obično je slična konstrukciji sinkronog motora s permanentnim magnetima (PMSM) koji je objašnjen u prošlim poglavljima. Kao i svaki motor sastoji se od statora i rotora. Na rotoru ili unutar rotora se nalaze permanentni magneti. Kao što je prikazano na slici 6.1. Ako se trajni magneti nalaze unutar rotora nazivamo ih IPM (engl. *internal permanent magnet*), a ako se nalaze na površini rotora SPM (engl. *surface permanent magnet*). Stator se sastoji od željezne jezgre i namotaja. U namotaju se stvara magnetsko polje kada kroz njega prolazi istosmjerna struja. Ovakvi motori sadrže i hall senzore koji se nalaze na statoru. Ti senzori omogućuju kontroleru da precizno odredi trenutačni položaj rotora i pravilno prekida struju prema namotajima statora. Neki proizvođači BLDC motora umjesto hall senzora koriste enkodere.



Sl. 6.1 Prikaz SPM (lijevo) i IPM (desno) izvedbe rotora

Istosmjerni motori bez četkicama koji su prisutni u električnim vozilima dolaze u dvije izvedbe.

Izvode se kao motori koji imaju rotor s unutarnje strane te motori kod kojih se rotor nalazi s vanjske strane. Oni s unutarnjim rotorom su građom sličniji ostalim vrstama motora. Kod onih s vanjskim rotorom na osovini se rotira vanjski dio motora, dok je središnji dio motora stator sa armaturnim namotima. Ovakvu izvedbu često koriste tzv. hub motori odnosno motori koji se nalaze u samom kotaču. Hub motori su ograničeni s prostorom i masom pošto se nalaze u kotačima vozila pa iz tog razloga su često to motori manjih snaga primjerenih za lakša električna vozila.

6.2. Karakteristike

Istosmjerni motori bez četkica često imaju vrlo visoku učinkovitost, to je zahvaljujući njihovom dizajnu s permanentnim magnetima. Pružaju značajne obrtne momente i snage s obzirom da često dolaze u kompaktnim dimenzijama i s manjim masama. To je posebno važno u električnim vozilima gdje je prostor za motor često ograničen. BLDC motori se mogu precizno kontrolirati putem elektroničke upravljačke jedinice, kontrolera. Ovo omogućava postizanje visoke preciznosti u kontroli brzine vrtnje i pozicije rotora. Budući da nemaju mehaničke četkice koje se troše, BLDC motori imaju dulji životni vijek u usporedbi s klasičnim istosmjernim motorima s četkicama. Odsutnost trenja četkica također smanjuje habanje i održavanje motora, povećavajući ukupnu pouzdanost sustava. Kao što je i slučaj kod PMSM, i BLDC su također osjetljivi na visoke temperature zbog korištenja trajnih magneta. Također trajni magneti utječu i na nešto višu cijenu ovih motora.

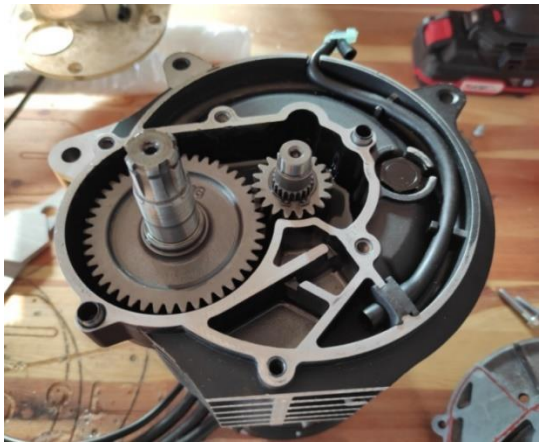
Za primjer iz prakse kroz koji će biti dodatno opisani ovi motori koristiti će se istosmjerni motor s permanentnim magnetima koji je korišten u izradi prototipa električnog motocikla kroz ProStudent projekt. Električni motocikl Grom prikazan je na slici 6.2 ispod.

Sl. 6.2 Grom električni motocikl

Naziv ovog motora koji je korišten u ovoj preradi konvencionalnog motocikla na električni pogon je QS 138 70H V3 proizvođača QS Motors. Promjer statora je 138mm kao što se može zaključiti iz naziva, a 70H označava duljinu magneta od 70mm. Permanentni magneti su smješteni unutar rotora i to u V obliku što čini ovaj motor IPM izvedbom. Stator i rotor prikazani su na slici 6.3. Masa motora je nešto ispod 10kg.

Sl. 6.3 Stator i rotor motora QS138 70H

Ovaj motor razvija maksimalnu snagu > 25 kW i vrti se na 10000 o/min. Može se primijetiti kako ovaj motor ima dosta dobru gustoću snage s obzirom na kompaktne dimenzije što je jedna od karakteristika BLDC motora i to je ponajviše utjecalo na odabir ovog motora. Za električne motocikle i slična vozila vrlo je bitno da je motor manjih dimenzija i manje mase, a s druge strane da može pružiti adekvatnu snagu zahtjevima vozila. Također je bitan broj okretaja motora zato što motor pogoni zadnji kotač pa je potrebno prilagoditi prijenosni omjer. U tome je pomogla i karakteristika verzije ovog motora s jednostepenim mjenjačem brzine u omjeru 1:2.35 što eliminira potrebu za vrlo velikim pogonjenim lančanicima odnosno vrlo malim pogonskim lančanikom. Na ovaj način optimizirao se prijenosni omjer vozila. Jednostepeni mjenjač iz motora QS138 70H V3 prikazan je na slici 6.4 ispod.



Sl. 6.4 Prikaz mjenjača brzine motora QS138 70H V3

Motor je napajan litij ionskom baterijom nazivnog napona 72V, dok ovaj motor može raditi na maksimalnom naponu do 120V. Jedna od loših karakteristika BLDC motora je to da često nisu efektivni pri višim naponima kao ostale vrste motora. No većina vozila za koja su namijenjeni BLDC motori rade na nižim naponima tako da to i nije veliki problem. Motor je upravljan kontrolerom ND72530 proizvođača Far Driver, odlično upravlja brzinom vrtnje motora i pruža mnoštvo karakteristika poput povezanosti mobilnom aplikacijom preko koje se mogu prilagođavati parametri. Također posjeduje auto learn funkciju kojom kontroler automatski prepoznaje parametre motora te se prilagođava prema tome. Jedna od bitnih funkcija je soft start odnosno ograničavanje struje pri niskim okretajima kako bi se optimiziralo pokretanje vozila odnosno smanjio okretni moment pri startu koji je kod BLDC motora poprilično velik. Za određivanje položaja rotora ovaj motor koristi hall senzore smještene na statoru.

Sl. 6.5 Električni motor QS138 70H V3

Proizvođač navodi maksimalnu učinkovitost iznad 93% što je za umjerenu cijenu ovog motora odlična karakteristika. BLDC motori su inače po korisnosti između PMSM-a koji imaju najveću korisnost i između IM i SynRM koji imaju nešto manju učinkovitost s obzirom da ne koriste trajne magnete. Također se navodi radna temperatura između 70°C i 120°C, a maksimalna temperatura 150°C. Za mjerenje temperature koristi se KTY83/122 senzor smješten u motoru. Kao i kod PMSM-a povišena temperatura može dovesti do smanjenja magnetske snage i trajnosti magneta. U ovom slučaju motor je prirodno hlađen zrakom što je adekvatno na vozilima poput motocikala. Proizvođač također nudi ovakve motore koji imaju kućište optimizirano za vodeno hlađenje. To je pogodno za vozila koja nemaju pristup hlađenju zrakom ili za vozila koja planiraju često koristiti maksimalan potencijal vozila poput sportskih vozila

6.3. Primjena u vozilima

Zbog svojih karakteristika istosmjerni motori bez četkica zastupljeni su u velikom broju električnih vozila. Vozila koja u svojim pogonskim sustavima koriste BLDC motore su najčešće vozila na dva ili tri kotača te lakša vozila na četiri kotača. U najvećem broju koriste se u električnim biciklima i to u izvedbi hub motora gdje je motor smješten u prednji ili zadnji kotač. Zbog masovne serijske proizvodnje motora za primjenu na biciklima postali su vrlo pristupačni te se koriste u sve većoj mjeri. hub motori nude prednosti i kod mopeda i motocikala, pozicija motora omogućava više prostora za primjerice baterije u sredini i mjesta za stvari. Pa su tako ovi motori postali često korišteni u mopedima za dostave. Hub motor proizvođača QS Motors nalazi se na slici ispod. Mnoštvo proizvođača koristi ga u električnim motociklima i mopedima.

Sl. 6.6 QS 273 70H

Zbog zadovoljavajuće snage i momenta s obzirom na dimenzije motora koriste se i u električnim motociklima te ATV i UTV električnim vozilima za svladavanje teških terena. Pošto na svijetu trenutno većinu električnih vozila tvore vozila na dva i tri kotača i lakša električna vozila koja su jednostavnija za proizvodnju i prodaju. Ovaj podatak čini BLDC motore najzastupljenijim u električnim vozilima. Ali obično se ne koriste kao glavni pogoni u električnim automobilima i većim vozilima osim u hibridnim električnim vozilima gdje karakteristike BLDC motora zadovoljavaju potrebe vozila.

7. USPOREDBA MOTORA U ELEKTRIČNIM VOZILIMA

Usporedba gustoće snage i momenta

Kada se radi o najvećoj snazi i mogućnosti generiranja najvećeg momenta u najkompaktnijim dimenzijama motora i s najmanjom masom vrste motora koje su iznad svih drugih su one vrste koje sadrže permanentne magnete u rotoru. A to su PMSM-ovi i BLDC motori s permanentnim magnetima. Kako se u praksi izmjenični motori češće koriste za sisteme jačih snaga za razliku od BLDC motora koji su primijenjeni u sustavima manjih snaga, PMSM-a smatramo vrstom motora koja ima najveću gustoću snage. Iza PMSM-ova slijede BLDC motori pa zatim SynRM i IM-ovi koji ne sadrže permanentne magnete. Osim u slučaju kod PMSynRM-a koji imaju bolje gustoće snage i momenta od SynRM i IM.

Usporedba učinkovitosti

PMSM-ovi imaju daleko najveći postotak učinkovitosti iza kojih slijede BLDC motori pa SynRM-ovi, a na začelju po učinkovitosti se nalaze IM-ovi. Učinkovitost ponajviše ovisi o građi motora pa tako motori s permanentnim magnetima imaju veću učinkovitost od motora s namotajima na rotoru.

Usporedba temperaturnih karakteristika

Odsutnost namotaja u rotoru smanjuje ukupno generiranje topline kod SynRM-a, PMSM-a i BLDC-a za razliku od IM-a koji sadrži namotaje u rotoru. Ali IM koji se zagrijava brže od ostalih ima veću maksimalnu otpornost na temperaturu od motora koji sadrže permanentne magnete poput PMSM-a i BLDC-a. Zaključuje se kako SynRM ima najbolju temperaturnu karakteristiku iz razloga što ne sadrži namotaje na rotoru niti permanentne magnete.

Usporedba cijene

PMSM-ovi su vrsta koja ima najbolje karakteristike u gotovo svim područjima, ali te i prednosti dolaze s cijenom. Naime zbog korištenja permanentnih magneta u motorima postižu najviše cijene od svih vrsta motora. BLDC motori također sadrže permanentne magnete, ali ovi motori su primijenjeni za vozila manjih snaga te se serijski proizvode u velikim količinama pa tako zadržavaju cijenu. A kod vrsta motora bez permanentnih magneta situacija je takva da SynRM motori mogu biti potencijalno najjeftiniji zbog njihove jednostavne građe, ali potreban je daljnji razvoj proizvodnih procesa kako bi dostigli najnižu cijenu. Trenutno su IM najjeftiniji.

8. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu opisane su vrste i karakteristike motora za primjenu u električnim vozilima. Također su generalno opisana električna vozila i njihovi pogonski sistemi te je istraženo i tržište istih. Vrste motora korištene u električnim vozilima su podijeljene u dvije skupine, izmjenične i istosmjerne. Izmjenični motori koji se primjenjuju za pogon električnih vozila su indukcijski motori, sinkroni motori s permanentnim magnetima te sinkroni reluktantni motori, a predstavnik istosmjernih motora je istosmjerni motor bez četkica. Opisani su njihovi principi rada, građa motora, konstrukcije rotora i statora, karakteristike, prednosti i nedostatci te njihova primjena u električnim vozilima. Zaključuje se kako su sinkroni motori s permanentnim magnetima superiorni ostalim vrstama motora zbog njihovih mnogih prednosti, ali veliki nedostatak im je da su skuplji od ostalih. Iz tog razloga su primjereni uglavnom samo za skuplja električna vozila koja su orijentirana na performanse vozila, te za sportska vozila. Ali koriste ih i proizvođači koji žele imati tehnički najbolja i najučinkovitija vozila. Indukcijski motori su široko primijenjeni u električnim vozilima, unatoč lošijim karakteristikama od ostalih motora. Imaju najnižu cijenu što ih čini najprivlačnijima za proizvođače vozila. Zbog svoje robusne građe, većih dimenzija i masa najpogodniji su za transportna vozila te za veća i teža terenska vozila. Ali i za one proizvođače koji proizvode jeftinija vozila. Sinkroni reluktantni motori postaju sve popularniji i imaju potencijal da budu široko primijenjeni kao indukcijski. No potrebno ih je još razvijati njihov dizajn te proizvodne procese kako bi se poboljšale karakteristike te smanjila cijena. Jedno takvo poboljšanje napravio je proizvođač Tesla implementirajući određenu količinu permanentnih magneta u njih te ih tako optimizirao za upotrebu u svojim vozilima. Istosmjerni motori bez četkica proizvode se u najvećim količinama, ali obično u manjim snagama. Najjednostavniji su za primjenu i proizvodnju te se koriste uglavnom za manja električna vozila.

LITERATURA

[1] IEA, Electric car sales, 2016-2023, IEA, Paris https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-car-sales-2016-2023, IEA. Licence: CC BY 4.0.

[2] »Porsche Newsroom,« Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, 2023. [Mrežno]. Available: https://newsroom.porsche.com/en/products/taycan/powertrain-18555.html.

[3] K. W. E. C. a. N. C. C. X. D. Xue, Selection of Electric Motor Drives for Electric Vehicles, Hong Kong, China: Department of Electrical Engineering, the Hong Kong Polytechnic University, 2008.

[4] J. Jureković, Električni strojevi, Zagreb, 2008..

[5] R. P., AC Induction Motor Fundamentals.

[6] E. o. a. I. v. -. S. F. o. ResearchGate.. [Mrežno]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Specifications-Siemens-1PV5135-4WS14-motor-All-other-available-specifications-are_fig87_313770104.

[7] »Cascadia Motion,« Borg Warner, [Mrežno]. Available: http://www.cascadiamotion.com/motors.

[8] J. Kostko, Polyphase Reaction Synchronous Motors, Journal of the American.

[9] S. Taghavi, Design of Synchronous Reluctance Machines for Automotive Applications.

[10] V. Ćorluka, Modeliranje sinkronog motora s unutarnjim permanentnim magnetima i koncentriranim namotom, 2018.

[11] J. Zekic, Modeling and analysis of SynRM for hybrid electric vehicle application.

SAŽETAK

U ovom završnom radu opisane su vrste i karakteristike motora za primjenu u električnim vozilima. Također su generalno opisana električna vozila i njihovi pogonski sistemi te je istraženo i tržište istih. Vrste motora korištene u električnim vozilima su podijeljene u dvije skupine, izmjenične i istosmjerne. Izmjenični motori koji se primjenjuju za pogon električnih vozila su indukcijski motori, sinkroni motori s permanentnim magnetima te sinkroni reluktantni motori, a predstavnik istosmjernih motora je istosmjerni motor bez četkica. Opisani su njihovi principi rada, građa motora, konstrukcije rotora i statora, karakteristike, prednosti i nedostatci te njihova primjena u električnim vozilima. Na temelju usporedbe električnih motora i njihovih karakteristika moguće je zaključiti i donijeti odluku za kakva su vozila određene vrste motora prikladnije.

ABSTRACT

In this final thesis, the types and characteristics of motors for use in electric vehicles are described. Electric vehicles and their propulsion systems are also generally explained, and the market for them is explored. The types of motors used in electric vehicles are divided into two groups, alternating current (AC) and direct current (DC). AC motors used for electric vehicle propulsion include induction motors, permanent magnet synchronous motors, and synchronous reluctance motors, while a representative of DC motors is the brushless DC motor. Their operating principles, motor construction, rotor and stator designs, characteristics, advantages, disadvantages, and their application in electric vehicles are described. Based on a comparison of electric motors and their characteristics, it is possible to conclude and make a decision about which types of motors are more suitable for specific types of vehicles.

_____

Potpis autora