

Mali i specijalni električni strojevi

Marković, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:874345>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-11**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



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

Sveučilišni studij

MALI I SPECIJALNI ELEKTRIČNI STROJEVI

Diplomski rad

Karlo Marković

Osijek, 2021.

| | |
|--|-----------|
| 1. UVOD | 1 |
| 1.1. Zadatak diplomskog rada | 2 |
| 2. PREGLED KORIŠTENE LITERATURE..... | 3 |
| 3. OSNOVNI PRINCIPI RADA ELEKTRIČNIH STROJEVA | 4 |
| 3.1. Magnetski tok..... | 6 |
| 4. DC MOTORI S ČETKICAMA | 8 |
| 4.1. DC motori s četkicama i trajnim magnetom na statoru | 9 |
| 4.2. DC motori s shunt uzбудnim namotom (paralelna uzbuđa) | 10 |
| 4.3. DC motori s serijskim uzbudnim namotom | 12 |
| 4.4. DC motori s dvostrukim uzbudnim namotom | 13 |
| 4.5. DC motori s četkicama i vanjskim rotorom..... | 14 |
| 5. DC MOTORI BEZ ČETKICA | 16 |
| 5.1. Podjela prema vrsti napajanja statorskih namota | 17 |
| 5.2. Koračni motori..... | 18 |
| 5.3. Servo motori..... | 21 |
| 5.4. DC reluktantni motori | 25 |
| 5.5. Hibridni koračni motori | 27 |
| 6. SINKRONI AC MOTORI | 29 |
| 6.1. Načini pokretanja sinkronih AC motora | 33 |

| | | |
|----------------------|---|------------|
| 6.2. | Histerezni motori | 35 |
| 6.3. | Sinkroni reluktantni motori | 39 |
| 6.4. | Sinkroni motori s trajnim magnetima | 41 |
| 7. | ASINKRONI MOTORI..... | 48 |
| 7.1. | Jednofazni asinkroni motori..... | 49 |
| 7.2. | Trofazni asinkroni motori | 52 |
| 8. | METODE KONTROLE RADA ELEKTROMOTORA | 59 |
| 8.1 | Metode regulacije rada DC motora | 59 |
| 8.2. | Metode regulacije rada AC motora | 62 |
| 9. | SIMULACIJE RADA ELEKTROMOTORA U PROGRAMU ANSYS ELECTRONICS | 67 |
| 9.1. | DC reluktantni motor | 67 |
| 9.2. | AC sinkroni reluktantni motor | 85 |
| 10. | ZAKLJUČAK..... | 101 |
| PRILOG P.6.4. | | 109 |
| PRILOG P.7.2. | | 121 |

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

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Osijek, 15.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

| | |
|---|---|
| Ime i prezime studenta: | Karlo Marković |
| Studij, smjer: | Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika |
| Mat. br. studenta, godina upisa: | D-1251, 06.10.2019. |
| OIB studenta: | 76177284893 |
| Mentor: | Prof. dr. sc. Tomislav Barić |
| Sumentor: | |
| Sumentor iz tvrtke: | |
| Predsjednik Povjerenstva: | Izv. prof. dr. sc. Marinko Barukčić |
| Član Povjerenstva 1: | Prof. dr. sc. Tomislav Barić |
| Član Povjerenstva 2: | Doc. dr. sc. Vedrana Jerković-Štil |
| Naslov diplomskog rada: | Mali i specijalni električni strojevi |
| Znanstvena grana rada: | Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika) |
| Zadatak diplomskog rada: | U dogovoru s mentorom odabrati primjere malih i specijalnih strojeva za analizu. Opisati zahtjeve koji se odnose na rad malih i specijalnih električnih strojeva. Za odabrane strojeve opisati fizikalna načela rada strojeva, opisati područja njihove primjene te prezentirati njihove modele. Za jednog ili više odabranih primjera strojeva prezentirati postupak modeliranja, simuliranja i određivanja parametara strojeva korištenjem programskog paketa ANSYS. Rezultate prema mogućnosti provjeriti analitičkim izrazima ili mjerenjem. Izlaganje je potrebno poduprijeti izračunima, grafičkim prikazima i shemama. |
| Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada): | Izvrstan (5) |
| Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova: | Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina |
| Datum prijedloga ocjene mentora: | 15.09.2021. |
| Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija: | Potpis: |
| | Datum: |

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 11.10.2021.

Ime i prezime studenta:

Karlo Marković

Studij:

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

Mat. br. studenta, godina upisa:

D-1251, 06.10.2019.

Turnitin podudaranje [%]:

6 %

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Mali i specijalni električni strojevi**

izrađen pod vodstvom mentora Prof. dr. sc. Tomislav Barić

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:

1. UVOD

Početak masovne uporabe DC i AC električnih strojeva predstavlja industrijsku revoluciju možda čak i veću od one prve otkrićem parnoga stroja. Razlog tome je opseg uporabe električnih strojeva koji je nebrojeno puta veći od onoga parnoga ili bilo kojeg drugog motora s unutarnjim izgaranjem. Izuzetci su slučajevi kao što su velike letjelice, veliki poljoprivredni i transportni strojevi gdje dolazi do izražaja jedina mana električnih strojeva, a to je izvor napajanja. Izvor napajanja pokretnih električnih strojeva je baterija koja se sve više razvija i postaje sve jeftinija svake godine, ali još uvijek ne pruža dovoljan kapacitet po volumenu s obzirom na njenu cijenu da se može opravdano masovno proizvoditi električne traktore koji bi imali baterije jako velikih kapaciteta, ali s obzirom da je nafta fosilno gorivo pitanje je vremena kada će električni traktori postati standard. Opseg uporabe električnih strojeva je teško izmjeriti budući da jedino ljudi do kojih električna energija nije došla ne koriste električne strojeve. Spektar volumena električnih strojeva kojih susrećemo je također teško izmjeriti od malih motora u mobitelima koji proizvode vibraciju do velikih motora korištenih za manipulaciju teretom kao što su kranovi i mlinovi. Jedna od velikih prednosti električnih strojeva je mogućnost regeneracije energije kočenjem što je omogućeno vrstom goriva i principom rada električnih strojeva. U ovome radu napravljena je podjela električnih strojeva po vrsti napajanja te za svaku vrstu napajanja napravljena je podjela motora po konstrukciji i dizajnu rotora. Pomoću slika je prikazana unutarnja konstrukcija motora te na kraju je napravljeno poglavlje gdje je ukratko objašnjen način upravljanja i kontrole rada električnih strojeva. Za završetak diplomskog rada su konstruirani električni strojevi u Ansys-u te simuliran njihov rad i zalet na temelju čega možemo vidjeti kako se mijenjaju električne varijable koje omogućuju rad električnih strojeva.

1.1. Zadatak diplomskog rada

U dogovoru s mentorom odabrati primjere malih i specijalnih strojeva za analizu. Opisati zahtjeve koji se odnose na rad malih i specijalnih električnih strojeva. Za odabrane strojeve opisati fizikalna načela rada strojeva, opisati područja njihove primjene te prezentirati njihove modele. Za jednog ili više odabranih primjera strojeva prezentirati postupak modeliranja, simuliranja i određivanja parametara strojeva korištenjem programskog paketa ANSYS. Rezultate prema mogućnosti provjeriti analitičkim izrazima ili mjerenjem. Izlaganje je potrebno poduprijeti izračunima, grafičkim prikazima i shemama.

2. PREGLED KORIŠTENE LITERATURE

U trećem poglavlju korištena je literatura [1] gdje je pomoću maxwelov-ih jednadžbi objašnjen rad motora i dano matematičko objašnjenje na temelju kojega oni generiraju moment na osovini. U četvrtom poglavlju korištena je literatura [2-8] gdje se relativno detaljno opisuje konstrukcija, rad i karakteristike DC motora s četkicama te njihove podvrste s obzirom na konstrukciju rotora i statora. U petom poglavlju korištena je literatura [9-18] u tome poglavlju je na isti način kao u prošlom poglavlju opisan rad, konstrukcija i podjela DC motora bez četkica koji se razlikuju od onih iz prošloga poglavlja po tome što se napajanje polova obavlja elektronički te se može kontrolirati i podešavati što daje veću učinkovitost. U šestome poglavlju korištena je literatura [19-47] gdje se obrađeni sinkroni AC motori tako što je opisana razlika u statorima u odnosu na DC motore, objašnjen način rada koji ima razlike u odnosu na DC motore iako svi motori imaju isti princip rada kao i njihove DC izvedbe zbog frekvencije napajanja. Konstrukcija je također objašnjena kao i njihova podjela. U sedmome poglavlju korištena je literatura [30-55] gdje su opisani asinkroni motori, njihova podjela i podvrste s obzirom na konstrukciju. Objasnen je princip njihovog rada te način na koji se regulira njihova momentna karakteristika. U osmome poglavlju korištena je literatura [31-34] gdje je navedeno na kojem principu kontroliramo AC i DC motore, kako funkcioniraju elektronički sklopovi koji upravljaju radom motora i koji su njihovi osnovni elementi te vrste kontrola motora da bi se ostvario najveći moment motora uz najveću učinkovitost.

3. OSNOVNI PRINCIPI RADA ELEKTRIČNIH STROJEVA

Rad električnih motora omogućuju fizikalni zakoni elektriciteta i magnetizma, neki od tih zakona su Faraday-ev zakon indukcije, Amperov kružni zakon, Lenzov zakon i Lorentzova sila. Faradayev i Amperov zakon uključeni su u Maxwelllove jednadžbe koje zajedno s Lenzovim zakonom i Lorentzovom silom čine osnovne principe elektromagnetizma [1].

Elektromagnetska indukcija je pojava induciranja napona to jest razlike potencijala na krajevima vodiča koji se nalazi u promjenjivom magnetskom polju što opisuje dobivanje električne energije kod generatora. Promjena magnetskog okruženja može biti uzrokovana promjenom jačine magnetskog polja, pomicanjem magneta prema zavojnici ili od nje, pomicanjem zavojnice, pomicanjem vodiča u ili izvan magnetskog polja ili okretanjem zavojnice, vodiča u polju. Ove pojave se mogu opisati s 2 zakona. Prvi zakon je Faraday-ev zakon koji povezuje promjenu magnetskog toka u vremenu što za posljedicu ima pojavu elektromotorne sile koja djeluje na vodič i glasi [1]:

$$\varepsilon = \frac{d\varphi}{dt} . \quad (3-1)$$

Pri čemu je ε iznos dobivene elektromotrne sile, $d\theta$ je promjena magnetskog toka, a dt je promjena vremena.

Faradayev zakon indukcije je temeljni je princip na kojem rade elektromotori koji je Maxwell matematički opisao i upotrijebio kao temelj svoje kvantitativne elektromagnetske teorije 1860-tih [2].

Budući da se elektromotorna sila odnosi na razliku potencijala krajeva vodiča koji se nalazi u polju, iz toga proizlazi da mjernu jedinicu za elektromotornu silu koristimo Volt [1].

Lenz-ov zakon je posljedica pretvorbe energije u elektromagnetskoj indukciji. Ovaj zakon nam govori koji će biti smjer struje inducirane u vodiču. Smjer struje koja se inducira biti će suprotan od smjera promjene magnetskog toka koji ju je stvorio. To znači da će polje koje bi nastalo od te inducirane struje bilo suprotnog smjera od originalnog polja kako bi magnetski tok ostao konstantnim. Lenz-ov zakon se najčešće ukomponira u Faraday-ev zakon s minus predznakom što omogućuje da se koristi isti koordinatni sustav i za promjenjivi magnetski tok i za elektromotornu

silu. Ovaj zakon se često zove Farraday-Lenz-ov zakon koji glasi [1]:

$$\varepsilon = -\frac{d\varphi}{dt}. \quad (3-2)$$

Pri čemu je ε iznos dobivene elektromotrne sile, $d\theta$ je promjena magnetskog toka, a dt je promjena vremena.

U praksi ovaj zakon se primjenjuje na strojeve kao što su transformatori i elektromotori koji imaju velik broj namota oko istog pola te se iz toga ova formula prilagođava za takav slučaj [1]:

$$\varepsilon = -N\frac{d\varphi}{dt}. \quad (3-3)$$

Pri čemu je ε iznos dobivene elektromotrne sile, N broj namota oko istog pola, $d\theta$ je promjena magnetskog toka, a dt je promjena vremena.

Postoje neslaganja oko toga je li Lorentzovu silu izvorno izveo James Clerk Maxwell ili Oliver Heaviside, ali zasluga se obično daje Heavisideu. Hendrik Lorentz izveo je moderni oblik jednadžbe 1891. godine [2].

Lorentzova sila je sila koju čestica doživljava uslijed električnog i magnetskog polja. Električna polja djeluju na česticu silom kreće li se ona ili ne, dok magnetska polja djeluju na silu samo kad se čestica kreće. Suma sila električnog i magnetskog polja opisana je prema formuli [1]:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} + q \cdot \vec{v} \times \vec{B} [N]. \quad (3-4)$$

Gdje je \vec{F} suma sila električnog i magnetskog polja, q je naboj čestice, \vec{E} jakost električnog polja, \vec{v} brzina okomita na magnetsko polje i \vec{B} jakost magnetskog polja.

Sila električnoga polja je sila koja djeluje privlačno ili odbojno ovisno o polaritetu naboja čestica koje promatramo, a tu silu računamo prema:

$$\vec{F} = \frac{q_1 q_2 \hat{r}}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r r^2} [N]. \quad (3-5)$$

Gdje su q_1 i q_2 naboji čestica između kojih se stvara privlačna odnosno odbojna sila, ε_0 je relativna permeabilnost vakuuma, r udaljenost između čestica, \hat{r} je jedinični vektor smjera i ε_r je relativna permeabilnost medija u kojemu se nalaze čestice.

Prethodno navedena formula (3-4) se odnosi na pojedinu česticu, u elektrotehnici se često bavimo strujama za koju ovaj zakon vrijedi prema formuli [1]:

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B} \text{ [N].} \quad (3-6)$$

Gdje je \vec{F} sila koja djeluje na vodič, \vec{B} jakost magnetskog polja, I jakost struje kroz vodič i \vec{l} duljina vodiča predstavljena vektorom na koje djeluje magnetskog polje.

Kada želimo odrediti smjer u kojem će sila djelovati na vodič stavimo palac u smjeru struje kroz vodič, kažiprst u smjeru magnetskog polja koje djeluje na vodič i srednji prst će nam pokazivati smjer sile na vodič [1].

Amperovim zakonom određujemo jakost magnetskog polja koje djeluje na vodič kojim teče struja:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r} \text{ [T].} \quad (3-7)$$

Gdje je B jakost magnetskog polja, μ_0 magnetska permeabilnost vakuumu, I jakost struje kroz vodič i r udaljenost vodiča od mjesta na koje mjerimo jakost polja [1].

3.1. Magnetski tok

Magnetski tok je umnožak prosječnog magnetskog polja u nekom ograničenom prostoru s promatranom okomitom površinom kroz koju prodire. Jedna je od ključnih veličina kod električnih strojeva i nužna je veličina u pretvorbi električne u mehaničku energiju i obrnuto [2]. Količina magnetskog toka u magnetskom polju govori nam koliko je magnetizma prisutno. Tok možemo najlakše zamisliti kao nevidljive crte koje povezuju suprotne polove magneta i određuju smjer okretanja rotora stroja. Budući da je jedinica za jakost magnetskoga polja Tesla (T) jedinica za magnetski tok bila bi Tm^2 , a umjesto te jedinice koristimo ekvivalentnu jedinicu Weber (Wb) [1, 2], i formula za to glasi:

$$\varphi = B \cdot A \cdot \cos(\alpha) \text{ [Wb].} \quad (3-8)$$

Gdje je B jakost magnetskoga polja, A površina promatrane plohe izražena u m^2 , $\cos(\alpha)$ je veličina kuta između silnica magnetskoga polja i vektora okomitog na promatranu plohu.

Budući da elektromotorna sila koja djeluje na promatranu plohu odnosno vodič ovisi o brzini promjene magnetskoga polja potrebno je to uzeti u obzir pa formula za elektromotornu silu glasi:

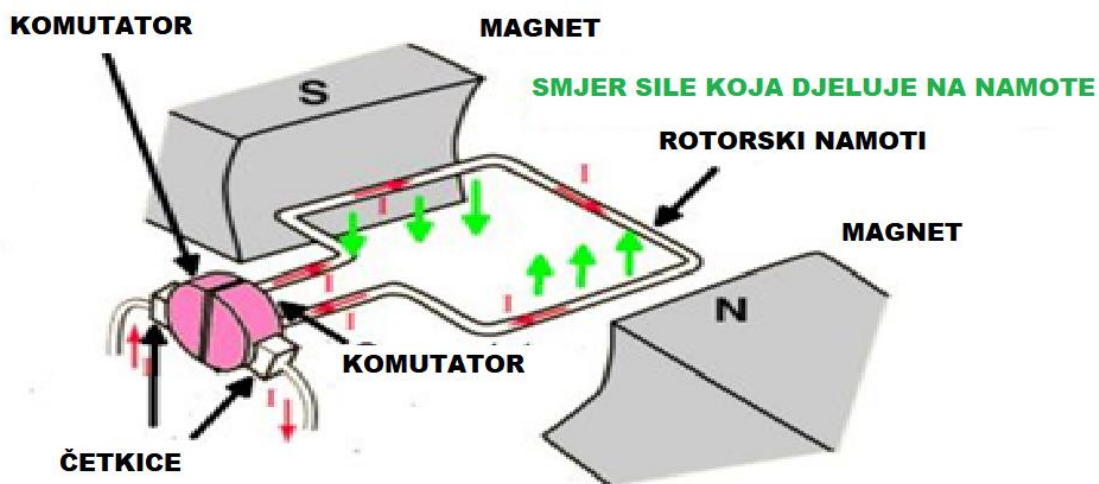
$$U_{EMF} = -\frac{\Delta B \cdot A \cdot \cos(\alpha)}{\Delta t} [V]. \quad (3-9)$$

Gdje je ΔB promjena jakosti magnetskoga polja u promatranom vremenu, A površina promatrane plohe izražena u m^2 , $\cos(\alpha)$ je veličina kuta između silnica magnetskoga polja i vektora okomitog na promatranu plohu i Δt je vremenski period koji promatramo.

Elektromotorna sila na plohu će biti maksimalna kada se njen vektor preklapa s vektorom magnetskoga polja čime će kut između njih biti 0 stupnjeva i $\cos(\alpha)$ biti 1 [1, 2].

4. DC MOTORI S ČETKICAMA

Najjednostavniji i najstariji oblik elektromotora, DC (istosmjerni) napon se spaja na četkice koje preko komutatora napajaju bakrene namote rotora dok se na statoru nalaze trajni magneti. Četkice i komutator zajedno omogućuju promjenu smjera struje rotacijom rotora svakih 180 stupnjeva za jedan par polova i pola manje za svaki par polova više rotora da bi smjer struje ostao isti s stajališta trajni magneti na statoru. Prikaz rada takvog motora prikazan je na slici 4.1. [2, 4, 5]. Bitan nedostatak u odnosu na motore bez četkica je potreba za održavanjem četkica i komutatora zbog toga što oni mehanički mjenjaju smjer struje kroz armature rotora te se time troše i gube svojstva [2].



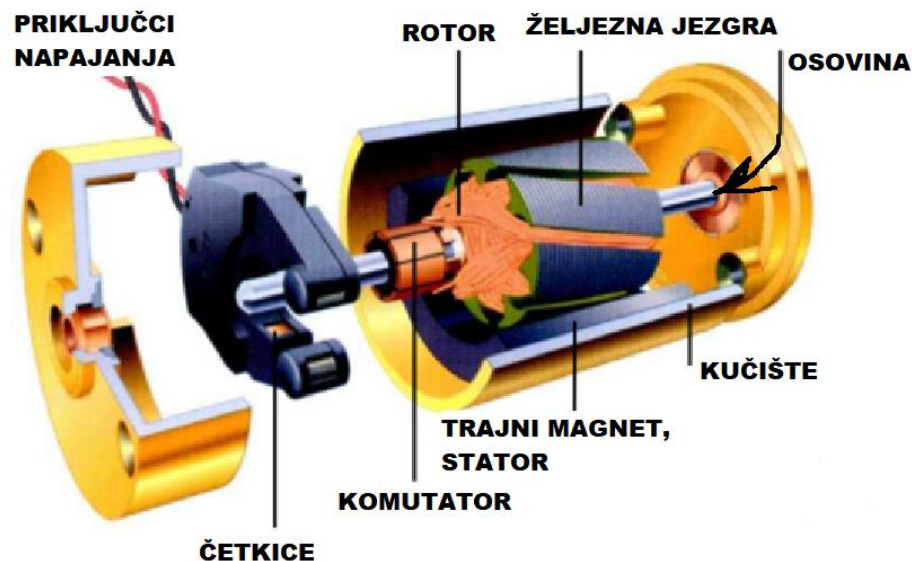
Slika 4.1. Princip rada DC motora s četkicama i trajnim magnetom [5].

Glavne prednosti ovog tipa motora su manja cijena od motora za jednostavne zadatke bez velikih zahtjeva, veliki vršni moment, linearni odnos brzine i momenta što pojednostavljuje upravljanje. Ove karakteristike čine ovaj tip motora pogodnim za masovnu serijsku proizvodnju i uporabu za jednostavne manipulacije teretom i predmetima dizalice uspinjače pomične stepenice, industrija malih motora za pogon igračaka kao što su autići i sličnog [2, 3, 4, 5].

Sve ove navedene uporabe DC motora s četkicama podrazumijevaju rad u otvorenoj petlji tj. motor nema nikakvu povratnu informaciju o svojoj brzini i položaju te je njegov rad kontroliran unaprijed zadanim parametrima tereta ili se kontrolira u trenutnom vremenu regulira napon na statoru [2, 3].

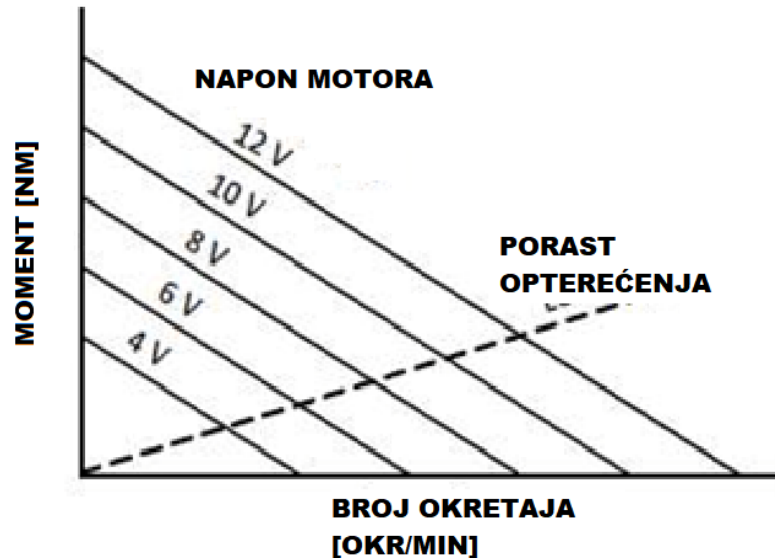
4.1. DC motori s četkicama i trajnim magnetom na statoru

Najzastupljenija vrsta DC četkastih motora zbog najniže prosječne cijene po jedinici snage i momenta zbog korištenja trajni magneta na statorima za stvaranje magnetskog polja te su zato snagom ograničeni magnetskim poljem statora koji s vremenom korištenja i starenja gubi magnetska svojstva te time opada maksimalna snaga motora kao i njegova korisnost [2, 5]. Građa DC motora s četkicama i trajnim magnetom za statorsku uzbudu prikazan je na slici 4.2. [5].



Slika 4.2. Građa DC motora s četkicama [5].

Imaju velik moment pri malim brzinama, ali pri većim brzinama imaju manji moment u usporedbi s ostalim DC motorima [6]. Njihova momentna karakteristika prikazana je na slici 4.3. [6]. Zajednička osobina motora s trajnim magnetima je jaki potezni moment koji odmah ili ubrzno pada prema nuli porastom broja okretaja.



Slika 4.3. Momentna karakteristika DC motora s četkicama [6].

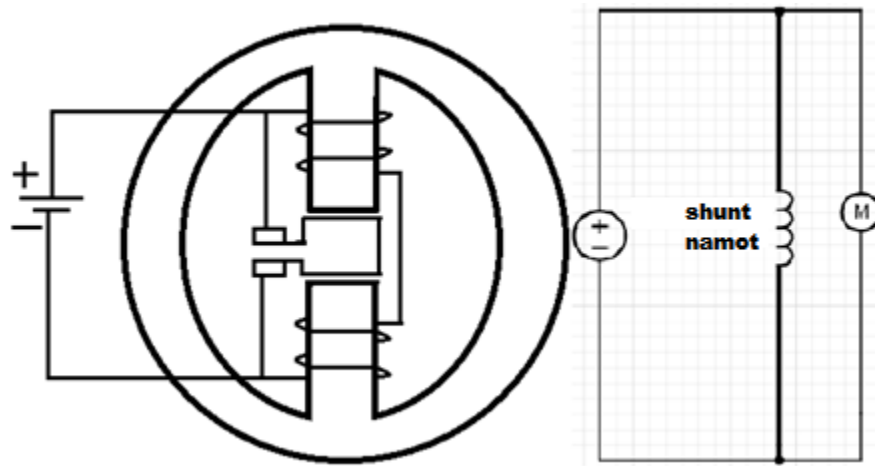
Prednost im je jako jednostavno i brzo upravljanje brzinom promjenom napona rotorskih namota.

Koristi se u aplikacijama relativno malih snaga kao što su igračke, automati za posluživanje, pokretne trake i slično [6].

4.2. DC motori s shunt uzbudnim namotom (paralelna uzbuda)

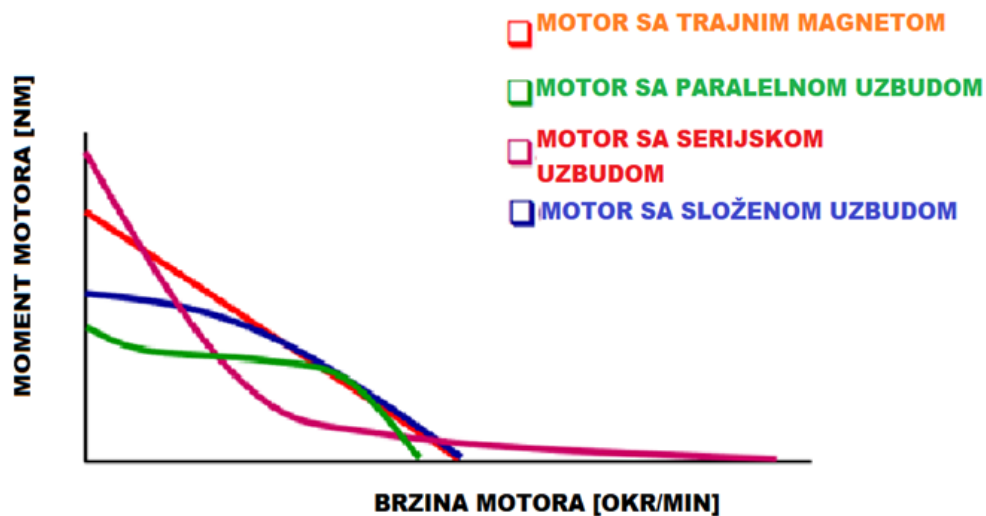
Kod ovih motora umjesto trajnih magneta na statoru imamo shunt (paralelni) namot koji služi za stvaranje magnetskog polja koji se napaja paralelno s namotima rotora istosmjernim naponom čijim se mijenjanjem povećeva ili smanjuje polje statora i rotora. U trenutku kada se motor optereti teretom struja rotora će se povećati, a s njime i jakost rotorskog polja dok će se istovremeno smanjiti struja shunt namota statora zajedno s statorskim poljem što za posljedicu ima smanjenje brzine motora i povećanje momenta koji se stvara na statoru [2, 7]. Električna shema koja prikazuje kako su spojeni statorski uzbudni namoti na terminale tako da budu paralelno s komutatorskim izvodima prikazana je na slici 4.4. Brzina shunt motora vrlo malo varira s promjenama u iznosu opterećenju. Kad se ukloni sav teret, poprima brzinu malo veću od opterećene brzine. Ovaj je motor

posebno prikladan za upotrebu kada se želi stalna brzina i kada nije potreban veliki potezni moment [2, 7].



Slika 4.4. Električna shema DC shunt motora.

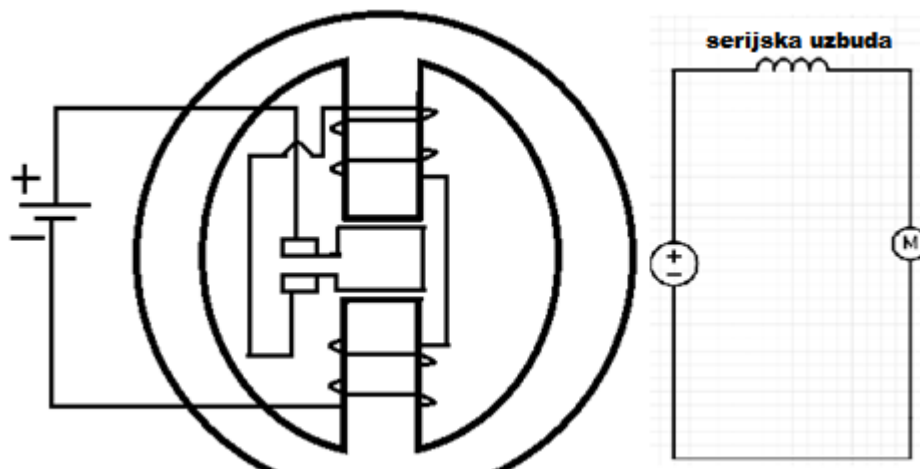
Kao i kod DC motora s permanentnim magneto brzina se lako mijenja mijenjanjem napona. za razliku od motora s trajnim magnetom ne gube magnetska svojstva statora vremenom, ali ako se povećanjem opterećenja shunt struja spusti na nulu motor se dovodi u nedopušteno stanje koje može dovesti do oštećenja motora. Skuplji su za proizvodnju od motora s trajnim magnetom i najčešća im je uporaba u auto industriji i industriji radnih strojeva (mehanizacija) [2, 7]. Na slici 4.5. [7] prikazane su momentne karakteristike svih tipova četkastih DC motora koje će mo opisati.



Slika 4.5. Usporedba idealnih momentnih karakteristika DC četkastih motora [7].

4.3. DC motori s serijskim uzбудnim namotom

Ovaj tip DC motora s četkicama također ima namot na statoru kao i shunt motori, ali kod ovih motora statorski namot je u seriji spojen s rotorskim namotom. Kao posljedice takve konstrukcije struja statora i rotora su jednake u svakom trenutku što se odnosi i na statorska i rotorska polja koja zajedno rastu i padaju kada se motor opetereti teretom [2, 7]. Pošto su statorska i rotorska struja uvijek jednake kontrola brzine nije toliko precizna kao kod ostalih motora. Ovaj tip motora ima najveći okretni moment pri malim brzinama od svih DC motora s četkicama, ali taj moment brzo opada i veći dio svoje karakteristike ima manji moment od ostali DC motora s četkicama. Na slici 4.6. prikazana je električna shema motora koja pokazuje da je statorski namot spojen prije rotora motora.



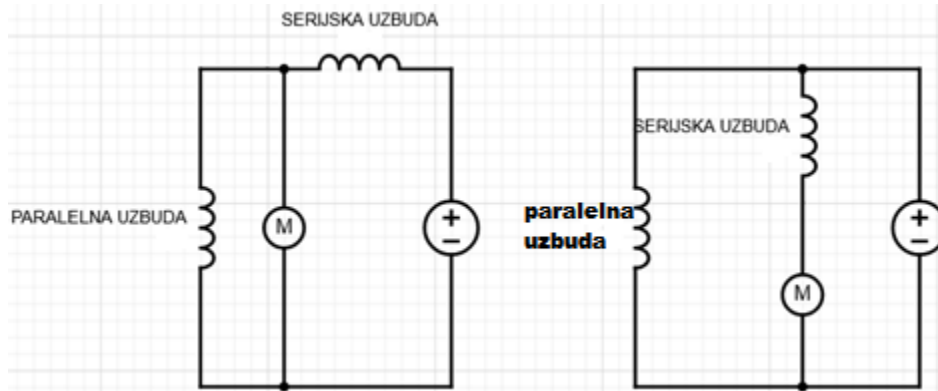
Slika 4.6. Shema DC motora sa serijskim namotom.

Kao i DC motor s shunt namotom i ovi motori imaju nedopušteno stanje, a to je da ne smije doći do kratkog spoja serijskog namota što nastaje kada je motor u praznom hodu inače će se motor oštetiti zato se ovi motori često drže pod opterećenjem da nebi došlo do kvara uslijed velikih brzina vrtnje. Zbog svojih karakteristika najpogodniji je za manipulaciju teškim teretima gdje ne postoji mogućnost stanja praznog hoda kao što su dizalice i kranovi [2, 7].

4.4. DC motori s dvostrukim uzбудnim namotom

Ovaj tip motora je kombinacija DC motora s serijskom i paralelnom (shunt) uzbuđom, znači da posjeduje i paralelnu i serijsku uzbuđu koje obje rade u isto vrijeme (dvostruka uzbuđa). Pri povećanju opterećenju motora smanjuje se struja kroz paralelni uzbuđni namot, a povećava se struja kroz serijsku uzbuđu što za posljedicu ima povećanje okretnog momenta motora i smanjuje brzine vrtnje motora. Karakteristika ovog motora je kombinacija motora s serijskom i paralelnom uzbuđom. Ima veliki potezni moment kao motor s serijskom uzbuđom i precizno upravljanje brzinom kao motor s paralelnom uzbuđom. Nedopušteno stanje motora je puno teže postići zato što da bi do njega došlo motor mora u isto vrijeme imati kratki spoj na serijskoj uzbuđi i struja na paralelnoj uzbuđi mora biti nula [2, 7]. Najveći nedostatak ovog tipa motora je cijena koja je po Watt-u snage najveća od svih motora s četkicama. Na slici 4.7. prikazane su sheme 2 izvedbe motora s složenom uzbuđom razlika je u mjestu gdje se spaja serijska uzbuđa prije ili poslije čvorišta. U izvedbi kratkog spojenog shunta naziva se kumulativnim složenim motorom i ima kombinirane karakteristike serijskih motora i shunt motora: veliki zakretni moment dobra regulacija brzine. Suprotno tome, ako je serijski namot spojen između čvorišta i pozitivnog pola napajanja oni se nazivaju diferencijalno složeni motori [2, 7].

Kumulativni složeni motori koriste se u širokom spektru primjena, od transporterata do teške opreme kao što su kuglični mlinovi. Motori s diferencijalnim složenim namotajima imaju malo praktične primjene, jer imaju tendenciju prekomjerne brzine kada se opterećenje smanji i značajni pad brzine kada se poveća opterećenje [2, 7].



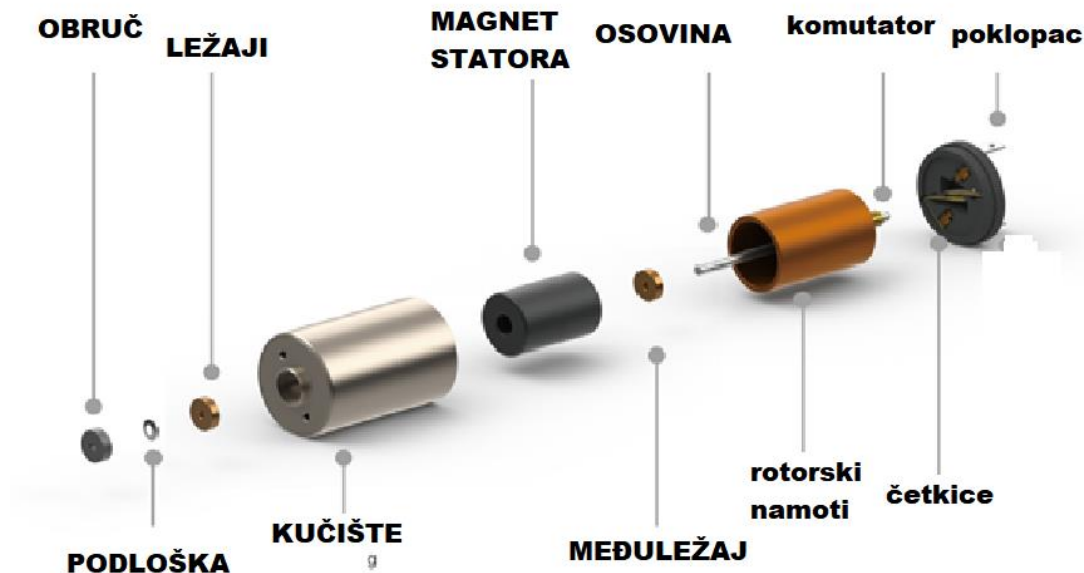
Slike 4.7. Električne sheme motora sa složenom uzbuđom.

Najčešće se primjenjuju u istim aplikacijama kao i motori s paralelnom uzbudom u slučajevima gdje je potreban veći moment na nižim okretajima motora i za pomicanje teških tereta s mogućnošću vrlo precizne regulacije brzine [2, 7].

4.5. DC motori s četkicama i vanjskim rotorom

Posebna vrsta DC motora s četkicama kojima su zamjenjena mjesta rotora i statora tako da se rotor stroja nalazi s vanjske strane ispod kućišta. Stator s trajnim magnetima kod ovih motora je smješten između osovine i rotorskih namota. Rotorski namoti nisu namotati na željezne polove već su povezani izolacijskim ljepilom i umetnuti između pernametnog magneta i kućišta motora koji su mehanički povezani i nepomični pri radu motora dok su namoti rotora mehanički spojeni na komutator i osovinu motora. Ovakva konstrukcija mu omogućuje jako dobra ubrzanja i brza kočenja zbog male inercije rotora uz visoku učinkovitost koja može biti do 90% [2, 8].

Budući da rotori nemaju željeznu jezgru induktivnost namota je manja, a time se smanjuje iskrenje između četkica i komutatora što smanjuje troškove održavanja motora i povećava njegov životni vijek. Na slici 4.8. [8] prikazani su dijelovi i građa koja je specifična za motor s vanjskim rotorom.



Slika 4.8. Građa DC motora s vanjskim rotorom [8].

Motor ima jako preciznu kontrolu brzine promjenom napona i nema titranja momenta čak ni pri malim brzinama što ga čini jako mirnim u radu, dok mu je brzina-moment karakteristika ista kao i kod motora s trajnim magnetom [2, 8].

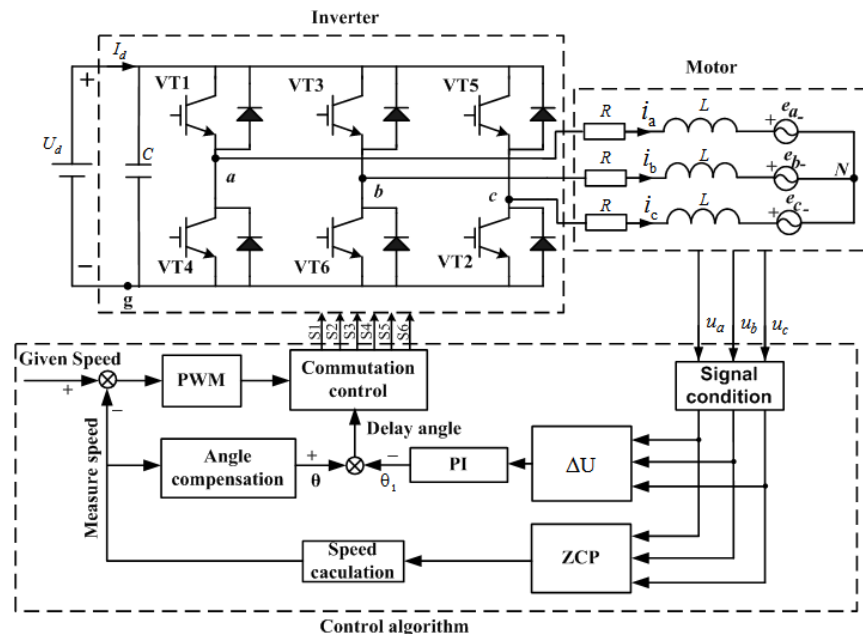
Najveći nedostatak ovih motora je pregrijavanje uslijed većih opterećenja pošto rotori nemaju željezne jezgre polova koji bi preuzeli toplinu. Uslijed velikih opterećenja motor se brzo pregrijava što može dovesti do toga da ljepilo koje drži namote rotora spojene popusti i motor se pokida iz toga razloga se često na kućištima ovih motora nalaze otvori za zračno hlađenje i pazi da motor ne prelazi nazivnu temperature [2, 8].

Ovakvi mali i lagani motori s obzirom na svoju veliku snagu jako su dobar odabir za uporabu s baterijom kao izvor napajanja kao kod ručnih alata, medicinske opreme, dječiji i hobi igračkaka kao daljnjski upravljani vlakovi, automobili, brodovi i dronovi [8].

5. DC MOTORI BEZ ČETKICA

Istosmjerni motori bez četkica su konstrukcijski jednostavniji od motora s četkicama zbog manje mehaničkih dijelova, razlog tome je taj što se napajanje postiže elektroničkim sklopom pri čemu nema iskrenja kao niti četkica i komutatora kao kod četkastih motora [9].

Kod ovih motora zamjenjena su uloge rotora i statora u odnosu na četkaste motore. Na rotoru se nalaze trajni magneti koji rotacijom u magnetskom polju stvaraju moment na rotoru. Na statoru se nalaze namoti omotani oko polova koji se naizmjenice napajaju strujom nebi li se postigao ravnomjeran moment i rad motora [9]. Na slici 5.1. [9] vidimo elektroničku shemu kontrole rada trofaznog DC bez senzora s povratnom vezom napona faza i upravljačkim sklopom.



Slika 5.1. Elektronička shema kontrole rada trofaznog DC motora [9].

S obzirom na izvedbu statora i napajanje stroja imamo jednofazne, dvofazne i trofazne motore. Najčešće se koriste jednofazni i trofazni motori koje možemo lako razlikovati po broju namota i polova statora [9].

Kontrolu napajanja kao i sinkronizacije s brzinom rotora kod ovih motora ima elektronički sklop koji se sastoji od poluvodičkih elemenata. To se može ostvariti u zatvorenoj petlji za koju je potrebno znati trenutnu brzinu rotora i kutni položaj magneta na rotoru. To se postiže mjerenjem elektromotorne sile na osovini i korištenjem Hallovih senzora s enkoderima za izravno mjerenje položaja magneta ili u otvorenoj petlji bez precizne kontrole položaja rotora i brzine što je slučaj kod motora s velikim brojem polova statora i rotora. Ti zahtjevi čine ove motore skupljim i težim za kontrolu u odnosu na motore s četkicama [9].

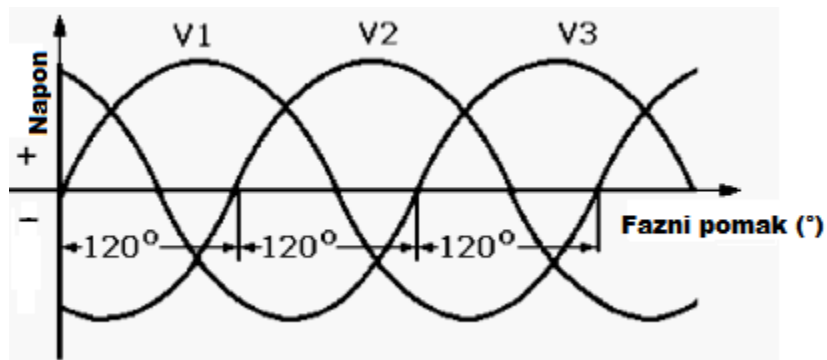
5.1. Podjela prema vrsti napajanja statorskih namota

U suštini glavna podjela motora bez četkica je na DC i AC (izmjenični) i oba tipa su zastupljena u područjima u kojima su njihove karakteristike pogodne za rad. DC bez četkica i AC sinkroni motori su konstrukcijski isti u pogledu uloge osnovnih dijelova motora jedino se razlikuje valni oblik napona napajanja i upravljački dio stroja. Oba tipa motora imaju isti princip rada, sinkroni rad kod istosmjernog stroja se ostvaruje tako što se prvu polovicu periode pušta na stator pozitivna DC struja četverokutnog ili nekog složenijeg oblika s više kuteva, a u drugoj polovici negativna struja simetričnog oblika [10].

Bitna razlika AC sinkronih i DC motora bez četkica je u startu. Brzina rotacije magnetskog polja AC motora ako nemamo frekvencijskog pretvarača je zadana frekvencijom ulaznog napona tj. 50 ili 60 Hz što je pre brzo za rotor da bi sam bez tereta mogao dovoljno brzo ubrzati te iz tog razloga AC sinkroni motor ne može startati sam. S druge strane kod DC motora bez četkica ulazni napon je istosmjernan i frekvenciju okretnog polja tj. brzinu motora određuje elektronički sklop za kontrolu rada motora. To daje mogućnost ovome motoru da starta sam pod uvjetom da je potezni moment veći od onoga na osovini rotora [10].

Kod AC sinkronih motora zbog sinusnog oblika upravljačke struje potrebna je jako precizna koordinacija položaja rotora i iznosa struje u namotima statora (naponi su međusobno fazorski pomaknuti za 120 stupnjeva) kao što je prikazano na slici 5.2. [11] što iziskuje preciznije uređaje za praćenje položaja rotora i kontrolu rada nego kod DC motora. Na temelju toga dolazimo do zaključka da učinkovitost AC motora ovisi o preciznosti mjernih uređaja i brzini regulacije rada, a

pošto preciznost opada povećanjem brzine motora tako opada i učinkovitost nakon određenoga broja okretaja što ovaj tip motora čini dobrim za brzine do kojih je moguća precizna kontrola rada. Još jedna bitna prednost ovog tipa motora koja se odnosi i na male i velike brzine jest izostanak titranja momenta motora koji susrećemo kod DC motora bez četkica što je nuspojava nesinusoidnoga oblika struje statora [11].

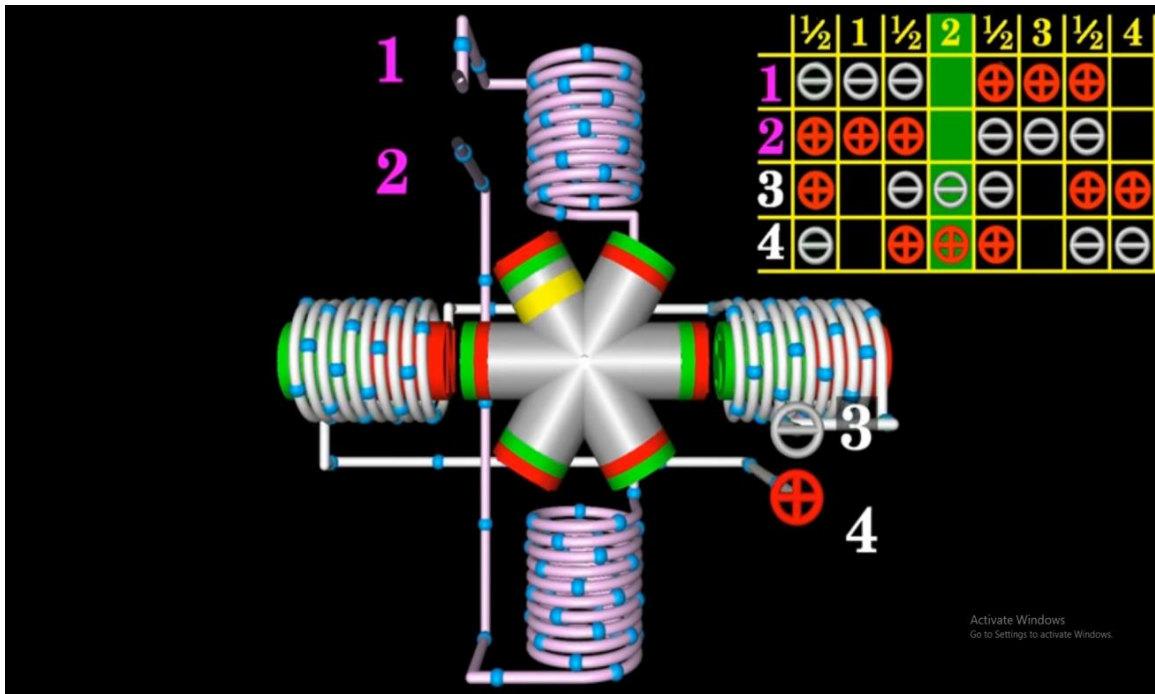


Slika 5.2. Fazorski pomak napona trofaznih AC i DC motora [11].

5.2. Koračni motori

Koračni motori su istosmjerni motori bez četkica koji se kreću diskretnim koracima. U odnosu na ostale DC motore imaju više statorskih polova koji su organizirani u skupine nazvane "faze" pri čemu su faze nasuprotni statorski polovi. Uključujući svaku fazu uzastopno, motor će se okretati, korak po korak. Kod ovih motora se teži prema većem broju statorskih polova da bi se dobio veći broj koraka po rotaciji. Na slici 5.3. [12] vidimo redosljed napajanja faza pri radu koračnog motora s bipolarnim namotima. Rotor ovih motora je napravljen od trajnih magneta koji se okreću u smjeru okretnog magnetskog polja određenog statorom [3].

Koračni motori su najčešće dizajnirani za rad na visokim temperaturama zbog njihove česte upotrebe za rad u otvorenoj petlji. Budući da koračni motor s otvorenom petljom radi bez bilo kakve povratne informacije o struji (ili povratne informacije o brzini ili položaju), struja koja napaja motor je konstantna bez obzira na opterećenje motora. Budući da se ovi motori često koriste za rad u otvorenoj petlji proizvode se s boljim izolacijom na namotima i boljim hlađenjem tako da mogu raditi na većim temperaturama [2, 3].



Slika 5.3. Rad bipolarnog koračnog motora s prikazom koraka napajanja namota polova [12].

Prednosti koračnih motora:

Vrlo precizna kontrola pozicije rotora određena brojem koraka pri jednom okretu motora. Omogućuje precizno pozicioniranje tereta što je korisno u uređajima kao što su 3D printer, kamere, CNC strojevi [2, 3].

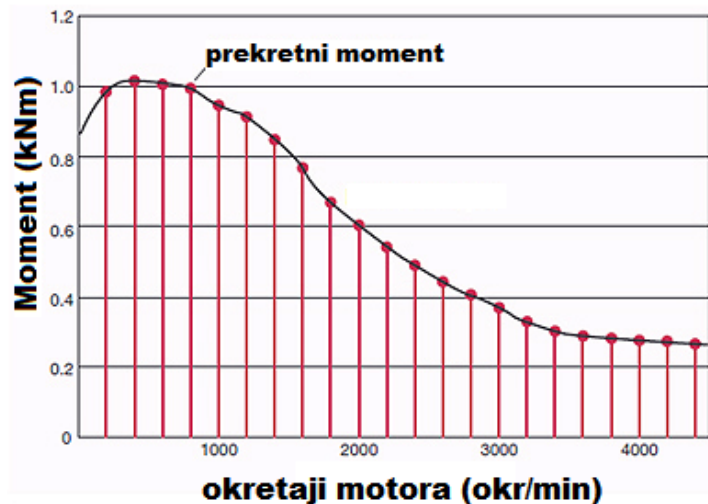
Vrlo precizna kontrola brzine rotacije također je određena brojem koraka pri svakoj rotaciji što je osobina potrebna u područjima kao što su robotika i automaizirani procesi u tvornicama.

Veliki moment pri malim brzinama zbog čega su ovi motori dobar izbor za manipulaciju velikim teretima.

Mane koračnih motora:

Manja učinkovitost u usporedbi s ostalim DC motorima, posebice je mala učinkovitost pri malim opterećenjima što ograničava njihovu uporabu na manje i srednje brzine kada je motor opterećen te okolinu rada koja im omogućuje adekvatno hlađenje [3].

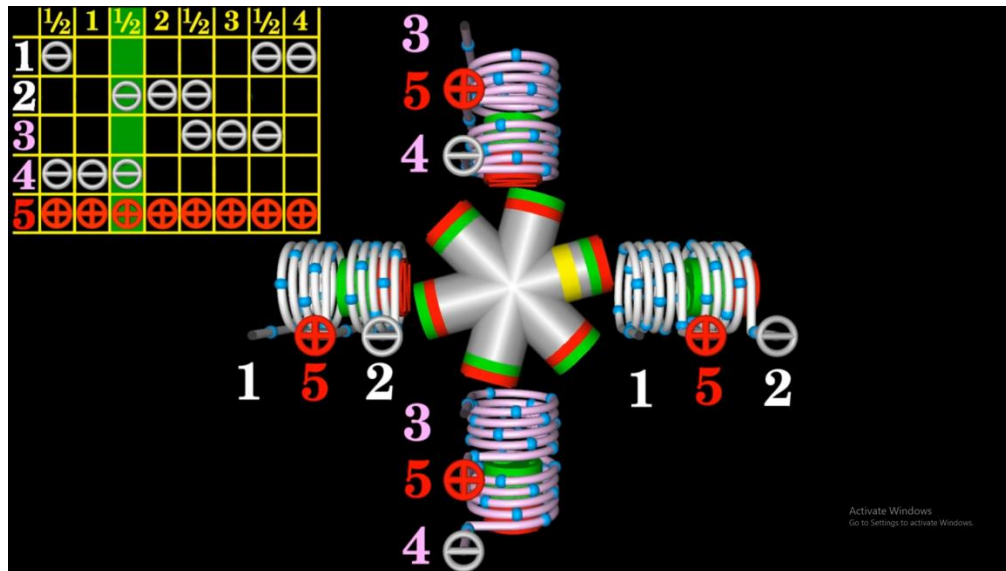
Donekle se moment na većim brzinama može povećati pojačalima u krugu za napajanje namota statora. Funkcija tih pojačala je da povećavaju napon na namotima da bi brže postigli nazivnu struju namota statora što diže karakteristiku moment-brzina gore tj. povećava moment na svim okretajima po cijenu većeg zagrijavanja [2, 3]. Na slici 5.4. [50] vidimo oblik momentne karakteristike koračnih motora gdje vidimo nagli pad momenta porastom broja okretaja motora.



Slika 5.4. Momentna karakteristika koračnog motora s trajnim magnetima [50].

Rad u otvorenoj petlji gdje nema povratnih informacija o položaju rotora i brzine vrtnje ne znači nužno da su ovi tipovi motora neprecizni, ali ovaj način rada ograničava njihovu preciznost. Iz sigurnosnih razloga moguće su ugradnje senzora za određivanje referentnog položaja rotora [2,3].

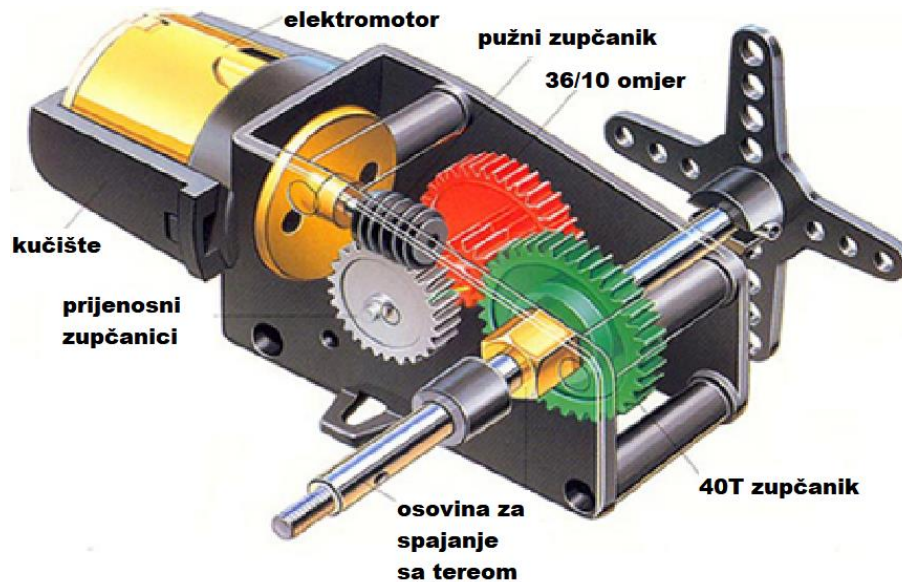
Podjela koračnih motora s obzirom na izvode namota statora, možemo ih podijeliti na unipolarne i bipolarne. Bipolarni koračni motori imaju spojene nasuprotne statorske namote te iz toga slijedi da njima teče ista struja i zajedno su pod naponom. Unipolarni motori imaju kontrolu svakog namota zasebno u oba smijera, ali u svakom smijeru kroz pola namota teče struja pošto su namoti podijeljeni u dva jednaka dijela za dva smjera struje. Samo jedan od dva namota može raditi u isto vrijeme te je zbog toga moment ovakvih motora manji u odnosu na bipolarne. Postoje izvedbe motora koje mogu raditi u oba načina rada bipolarno i unipolarno [2, 3]. Ovo može biti slučaj samo kod unipolarni izvedbi jer neki unipolarni koračni motori mogu raditi kao bipolarni bez fizičkih izmjena statora, a bipolarni motori ne mogu raditi kao unipolarni. Na slici 5.5. [12] možemo vidjeti redoslijed napajanja faza pri radu koračnog motora s trajnim magnetom s unipolarnim statorskim namotima.



Slika 5.5. Rad unipolarnog koračnog motora s trajnim magnetom [12].

5.3. Servo motori

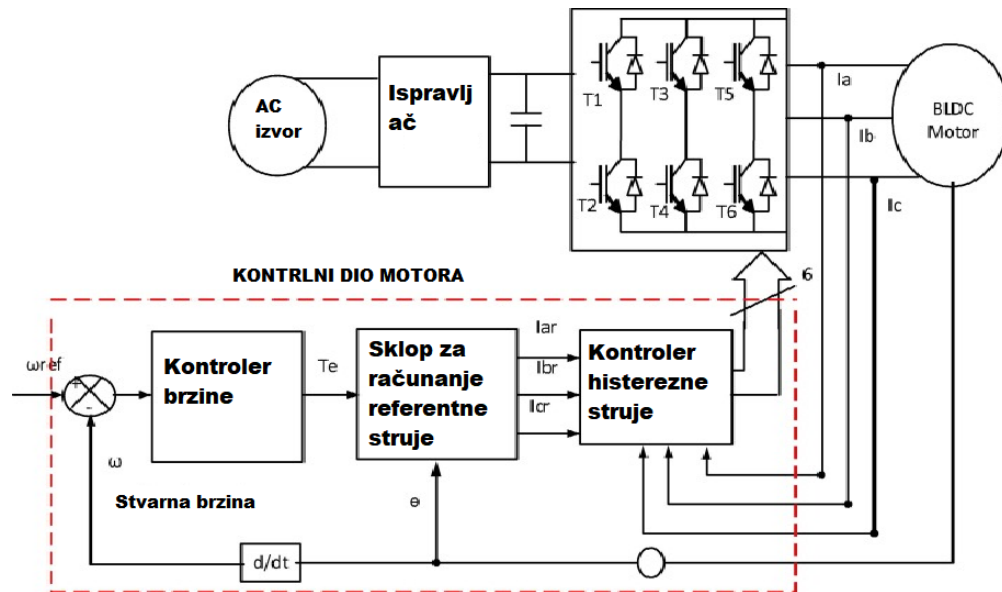
Servo motori sami po sebi nisu zasebna kategorija motora u pogledu konstrukcije. Servo motor može biti bilo koji motor AC ili DC ili univerzalni motor (modificirani DC motor s četkicama s serijskom uzбудom). Ono što čini neki motor servo motorom je upravljački sklop, servo motori imaju povratnu petlju koja spaja upravljački sklop motora i senzore koje služe mjerenje parametara motora te položaj rotora. Ti senzori su povratna veza na temelju koje upravljački sklop mijenja signal kojim upravlja radom motora odnosno njegovom brzinom [3, 13]. Takav način rada omogućuje jako veliku preciznost rotacije motora. Najčešći motori koji se koriste za servo motore su DC koračni motori s 2 do 6 para magnetski polova na rotoru. Na slici 5.6. [13] možemo vidjeti građu jednoga DC servo motora i uočiti dodatne zupčanike za smanjenje brzine i povećanje okretnog momenta.



Slika 5.6. Građa DC servo motora s reduktorom [13].

Ovi motori se konstruiraju tako da imaju relativno mali promjer u odnosu na duljinu što uz mali broj polova rezultira puno većim nazivnim brojem okretaja u usporedbi s klasičnim koračnim motorima istih dimenzija koji imaju dvostruko ili manje nazivnog broja okretaja. Budući da servo motor ima veći broj okretaja ima i manji moment u odnosu na koračni motor to se kompenzira reduktorom koji uz moment povećava i preciznost rotacije motora pošto se preko reduktora manje osjete na teretu titraji moment pri radu motora [3, 13]. Generalno govoreći servo motori su zbog svojih senzora složeniji od klasičnih koračnih motora te uz to skuplji i skloniji kvarovima. Ovi motori u svom najjednostavnijem DC izdanju imaju 3 žice: plus, minus i upravljački signal za pulsno širinsku modulaciju brzine motora. Upravljački signal nastaje obradom signala s senzora i usporedbom s referentnim signalom na temelju čega se dobiva pravokutni impuls čija duljina impulsa određuju koliko će se dugo motor okretati [3, 13].

Senzori su uređaji koji služe za mjerenje određenih parametara motora u svrhu regulacije momenta motora. Neki od parametara koji se najčešće nadziru su pozicija polova rotora, struje statorskih faza i brzina vrtnje osovine motora. Uređaji kojima dobivamo te signale su Hall-ov efekt senzori za određivanje pozicije rotora motora, AC ili DC tahogenerator spojen na osovinu servomotora pomoću čijeg generiranog napona određujemo brzinu servomotora te digitalni i apsolutni enkoderi za određivanje pozicije rotora [3, 13]. Na slici 5.7. [14] možemo vidjeti električnu shemu koja prikazuje princip rada povratne veze servomotora koja regulira njegovu histereznu struju.



Slika 5.7. Logička shema upravljanja DC servo motorom [14].

Podjela servo motora prema upravljačkom signalu:

Analogni servo motori

Analognim servo pogonima upravlja se preko PWM (engl. *Pulse Width Modulation*) signala. Raspon signala je od 4,8 V do 6 V. Također, analogni servo može slati samo 50 impulsa u sekundi pošto je to frekvencija napona kojim se napaja preko pretvarača [15].

Digitalni servo motori

Korištenjem malih mikroprocesora servo motor prima signal i djeluje na visokofrekventne impulse napona. Digitalni servo može poslati 300 impulsa u sekundi, što je puno više u odnosu na analogni servo. Digitalni servo daje glatki odziv i okretni moment s manje titranja od analognog zbog većeg broja impulsa. Digitalni servo uređaji troše više energije nego analogni servo [15].

Podjela servo motora prema vrsti napajanja:

DC servo motor

DC servo uređaji koriste se za dobivanje brze reakcije okretnog momenta, a najkorišteniji su istosmjerni motori s trajnim magnetom i nezavisno uzbuđeni istosmjerni motori. Ovi tipovi motora

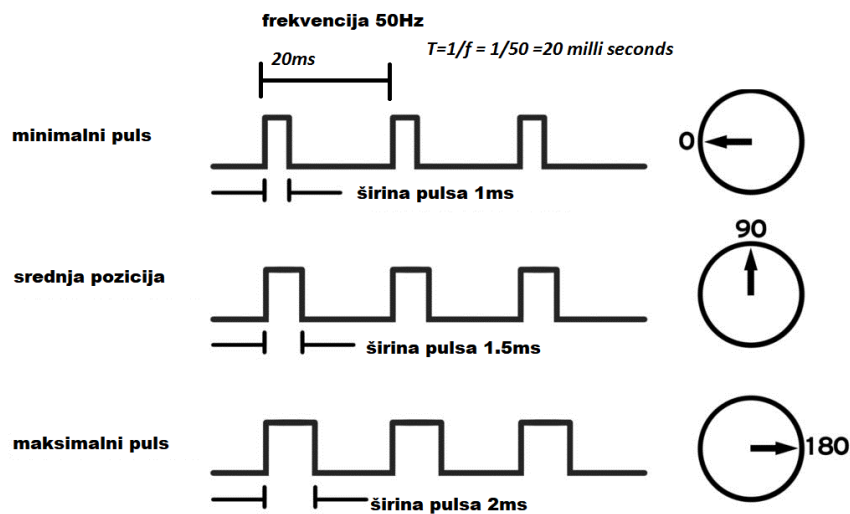
su pogodni za ovu svrhu zato što nezavisna uzbuda osigurava da mala varijacija napona ili struje armature proizvodi značajan i brz odziv motora. DC servo motori su najčešće korišteni servo motori među svim vrstama [15].

AC servo motor

AC servo motori se koriste rjeđe od DC motora. Motori koji se koriste su jednofazni i trofazni kavezni asinkroni motori. Za manja opterećenja se koriste jednofazni motori dok se za veće koriste trofazni asinkroni motori [15].

Upravljanje servo motorom:

Servo motorima se upravlja metodom PWM tj. pulsno širinska modulacija. Upravljački sustav motoru šalje električne signale različite duljine. Širina impulsa varira u rasponu od 1 milisekunde do 2 milisekunde i šalje ga na servo motore frekvencijom od 50 puta u sekundi [15]. Širina impulsa kontrolira kutni položaj rotirajuće osovine. Signal je logičke vrijednosti 0 ili 1 tj. 0 ili 5 volti koji se prenosi posebnim vodičem. Na slici 5.8. [15] imamo prikaz upravljačkih signala primjera upravljanja PWM metodom.



Slika 5.8. PWM signal upravljanja servo motorom koji određuje referentni položaj rotora [15].

Prema slici 5.8. [15], servo se kreće s impulsom od 1 milisekunde za okretanje motora prema 0°, dok se impulsom od 2 milisekunde vrši okretanje motora prema 180°. Između kutnih položaja širina impulsa se sama regulira s preciznošću samoga upravljačkoga sustava. Stoga se servo okreće na 90°

s impulsom regulatora širine 1,5 milisekunde. Prije nego što se pošalje signal upravljački sustav uzima u obzir trenutni položaj rotora te na temelju toga pravi korekciju signala da bi na kraju motor došao u željeni položaj [15].

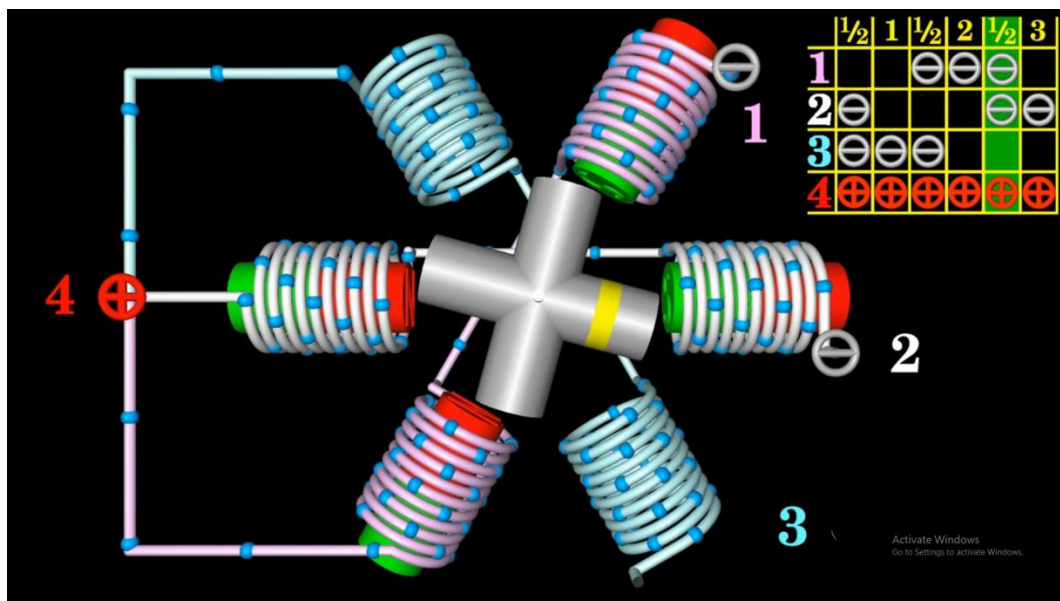
5.4. DC reluktantni motori

Ova vrsta motora svojom konstrukcijom i primjenom najbližija koračnim motorima. Razlikuju se od koračnih motora po tome što umjesto rotora od trajnoga magneta imaju rotor izrađen cijeli od čelika bez namota i magneta oblikovan tako da ima istaknute polove. Da bi se izbjegla situacija da se svi polovi rotora i statora poravnaju istovremeno (i samim time prestane rotacija i stvaranje momenta), ovi motori imaju manje polova na rotoru nego na statoru [16]. Broj polova rotora ovisi o broju polova statora, motor mora biti napravljen tako da u svakom položaju rotora jednak broj polova statora i rotora je poravnat. Kad su polovi rotora i statora izvan poravnanja magnetski krug kroz njih ima veliku reluktanciju. Pošto su faze statora pod naponom rotor se okreće kako bi se poravnao s polovima statora koji su izvor magnetskog polja čime se minimizira reluktancija magnetskog kruga [16]. Ova tendencija rotora da se pomakne na točku minimalnog magnetskog otpora stvara ono što se naziva momentom reluktancije. Na slici 5.9. [16] vidimo prikaz izgleda rotora s osovinom te statora s kućištem reluktantnog DC motora.



Slika 5.9. Rotor i stator s kućištem reluktantnoga DC motora [16].

Strujno magnetiziranje polova statora mora se precizno odrediti kako bi se osiguralo da se događa dok se pol rotora približava poravnanju s polom statora i prestaje netom prije poravnanja polova rotora i statora. Za razliku od koračnih motora, koji mogu, a u većinu slučajeva i rade u načinu otvorene petlje, motori s promjenjivom reluktancijom zahtijevaju povratnu informaciju o položaju rotora od koda ili senzora hallovog efekta da bi kontrolirali napajanje polova statora na temelju precizno određenog položaja rotora. Razlog tome je manji broj polova rotora u odnosu na koračne motore čime se povećava mogućnost ispadanja iz sinkronizma kao i titranja momenta pri nepreciznom napajanju polova statora [3, 16]. Budući da ovi motori imaju rotore bez magneta ili namota oni imaju manju inerciju i stoga mogu postići veća ubrzanja i brzine od motora s rotorima s trajnim magnetima poput koračnih motora. Nedostatak magneta na rotoru pruža i druge prednosti uključujući sposobnost podnošenja viših temperatura (a time i veća trajna opterećenja) i jednostavnu, jeftiniju konstrukciju od motora s trajnim magnetima [3, 16]. Konstrukcija statora ovih motora se razlikuje u jednome detalju od koračnih motora. Kod ovih motora nema preklapanja zavojnica između uzastopnih faza, drugim riječima faze su neovisne jedna o drugoj što znači da je kod ovih motora nužna bipolarna izvedba namota statora. To znači da će, ako dođe do kvara jedne ili više faza, motor i dalje raditi, ali s smanjenim izlaznim momentom [3, 16]. Na slici 5.10. [12] vidimo prikaz simulacije rada reluktantnog motora te u kutu raspored napajanja polova statora motora.

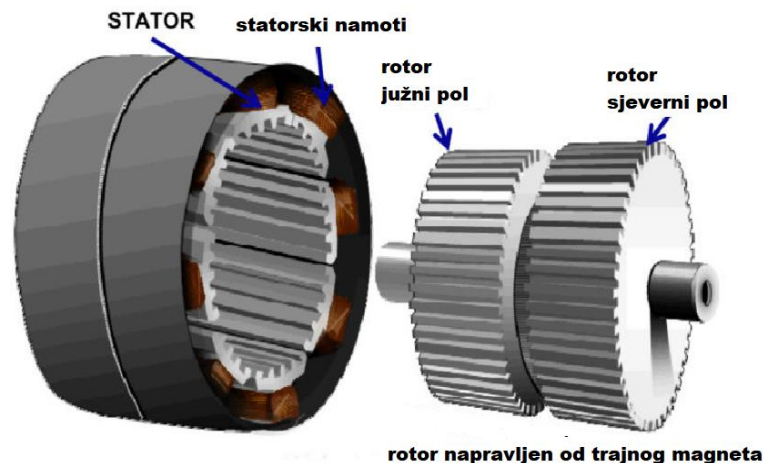


Slika 5.10. Bipolarni namoti i tablica napajanja namota polova pri radu reluktantnog motora [12].

Loše strane ovoga motora u odnosu na koračni motor je veća buka kod rada ovih motor koja nastaje zbog distorcije statora uslijed radijalnih sila koje nastaju pri napajanju statorskih polova. Distorcija statora nastaje zbog jake radijalne sile kojom se privlače parovi polova pod naponom pri radu stroja. Veliki problem ovih motora pri radu je vibracija i titranje momenta koje je veće nego kod koračnih motora zbog manjeg broja polova rotora kao i statora. Titanje momenta se može smanjiti povećanjem broja polova rotora i statora, ali će se u tome slučaju povećati kompleksnost motora i smanjiti srednji moment [3, 16].

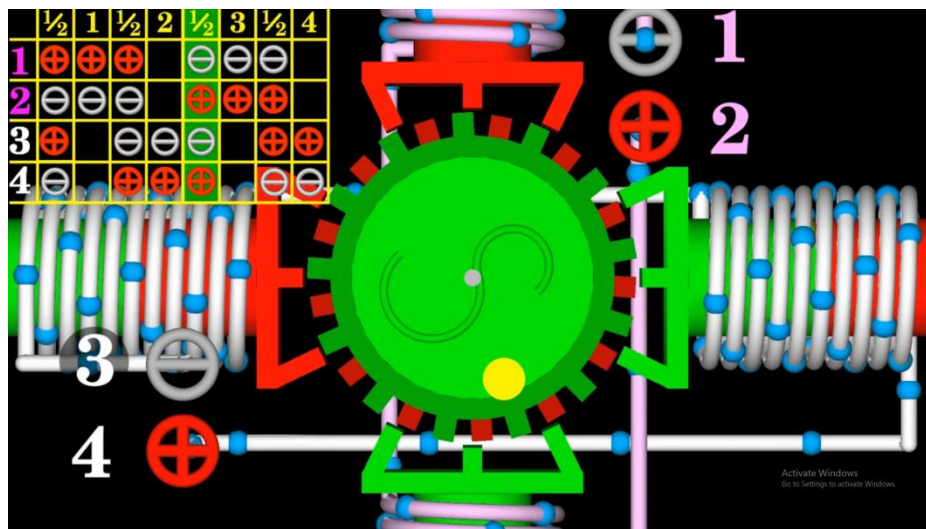
5.5. Hibridni koračni motori

Ovaj motor je svojom konstrukcijom kombinacija klasičnog koračnog motora i motora s promjenjivom reluktancijom iz čega proizlazi naziv hibridni motor. Rotor ovoga motora je specifičan, sastoji se od dva jednaka nazubljena komada trajnog magneta kružnog oblika pri čemu je svaki dio jedan pol magneta i postavljeni su tako da zubi jednoga pola vizualno prolaze između zubiju drugoga pola magneta čime se postiže da stroj može raditi dijelove koraka umjesto da pravi puni korak čime se povećava preciznost motora [3, 17]. Stator motora ima koncentrirane namote na polovima te može imati i nazubljene vrhove polova da bi se postigao što manji zračni razmak rotorskih i statorskih polova, a time i gubici što se može i vidjeti na slici 5.11. [17] hibridnog DC motora točnije njegov rotor i stator s kućištem.



Slika 5.11. Građa hibridnog koračnog motora [17].

Novije kontrolne tehnike poput polukoraka i mikrokoraka omogućuju precizniju rotaciju od ostalih koračnih motora (kod kojih se ne može ostvariti mikro korak). Hibridni koračni motori također imaju veće omjere okretnog momenta i dimenzija i veće nazivne brzine od ostalih koračnih motora [3, 17]. Također su tiši od motora s promjenjivom reluktancijom. Najveća mana ovim motora je znatno veća cijena u odnosu na ostale koračne i motore s promjenjivom reluktancijom. Učinkovitost i brzina odziva ovih motora također je bolja od ostalih DC motora, ali po cijenu visoke inercije i mase po snazi zbog trajnog magneta u rotoru [3, 17]. Na slici 5.12. [12] imamo prikaz simulacije rada hibridnog motora s prikazom toka struje polova faza po koracima i polukoracima motora.



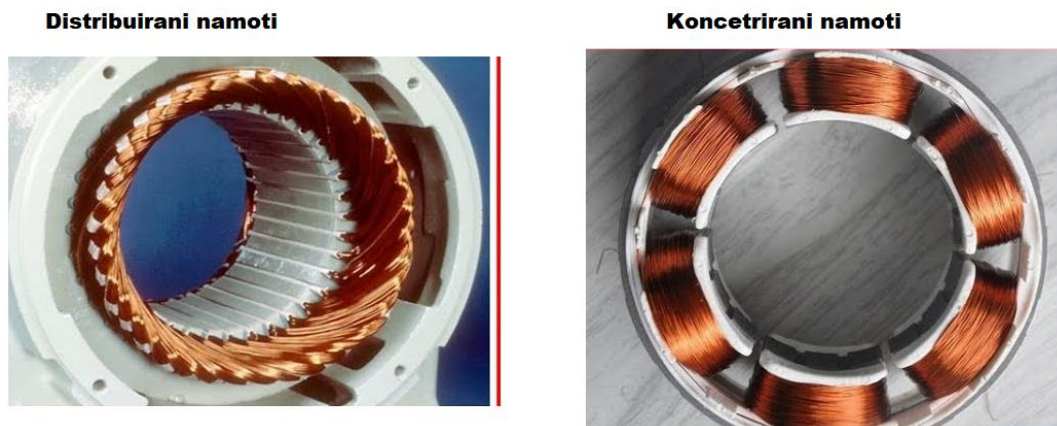
Slika 5.12. Bipolarni namoti i tablica napajanja namota pri radu hibridnog motora [12].

Na slici 5.12. [12] možemo vidjeti da za pune korake motor radi u klasičnom bipolarnom režimu. Kada želimo napraviti polukorake ili još manje dijelove koraka potrebno je istovremeno uzбудiti više parova statorskih polova tako da broj koraka koji možemo imati u jednoj rotaciji ovisi o broju statorskih polova i broju zubi rotora. Nakon što motor ostane bez uzbude na statoru on ostaje zakočen u trenutnoj poziciji zbog toga što su se trajni magneti rotora magnetski povezali s polovima statora [3, 17].

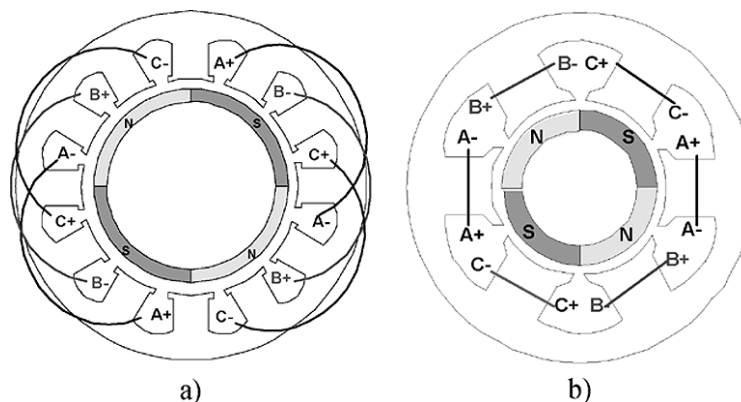
Veliki moment po volumenu ovoga motora kao i velika preciznost ostvarena mogućnošću rada u mikrokoracima čini ih pogodnim u granama industrije kao što je robotika, 3d printeri, dizala osjetljivih tereta.

6. SINKRONI AC MOTORI

Najlakši način na koji možemo prepoznati AC motore je statorski namot. Statorski namoti kod AC motora su najčešće distribuirani za razliku od DC motora gdje se koriste koncentrirani namoti. Za razliku od koncentriranih namota distribuirani namoti zahvaćaju sve polove u svakome namotu što uvelike smanjuje parazitne kapacitete te zbog toga kod ovakvih motora možemo koristiti veće frekvencije rada uz prikladnu naponsku izolaciju [19, 20]. Prednost koncentriranih namota je veći izlazni moment pri radu AC motora uzrokovano većom gustoćom struje u namotima i momentom po amperu. Količina harmonika u doljnjoj elektromotornoj sili kod AC motora s koncentriranim namotima je nešto manja u odnosu na isti motor s distribuiranim namotima što rezultira manjom oscilacijom momenta i manjim zateznim momentom. Distribuirani namoti postaju bolji izbor od koncentriranih s povećanjem frekvencije rada pošto im učinkovitost raste s frekvencijom. Razlika u gubitcima između dvije vrste statorskih namota varira od motora do motora, ali prosječno kod sinkronih motora na frekvencijama preko 60 Hz su oko 8% manji gubici zagrijavanja bakrenih vodiča i oko 4% manji gubici u željezu u odnosu na isti motor s koncentriranim namotima što nije toliko puno, ali velika je razlika u gubitcima vrtložnih struja koji su znatno manji kod distribuiranih namota [19, 20]. Na slici 6.1. [20] imamo prikaz kako izgledaju koncentrirani i distribuirani namoti na statorima motora, dok na slici 6.2. [24] vidimo kako su namotani statorski namoti gdje su im krajevi i gdje početci pod a) distribuiranih i pod b) koncentriranih namota.



Slika 6.1. Izvedbe distribuiranih i koncentriranih namota statora [20].



Slika 6.2. Prikaz principa namotavanja namota pod a) distribuirano i b) koncentrirano [24].

Prema broju faza AC motori dijele na jednofazne i trofazne motore, dok DC motori mogu biti jednofazni i višefazni. Kada statorske namote trofaznog motora postavimo u krug tako da su struje koje njima teku u svakom trenutku razmaknute 120 stupnjeva električno generiramo okretno magnetsko polje koje se rotira frekvencijom određenom frekvencijom napona napajanja i ta brzina se zove sinkrona brzina [19, 24]. Ako se u tom okretnom magnetskom polju nađe elektromagnet, trajni magnet ili feromagnetski materijal koji se rotiraju istom brzinom kao i magnetsko polje doći će do zaključavanja polova statora i rotora i samostalnoga rada stroja. Prema tome ovaj motor ima samo jednu brzinu kojom može raditi, a ona se regulira frekvencijom napajanja i ovisi o broju pari polova motora [19, 24].

Formula za sinkronu brzinu AC motora glasi:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \left[\frac{\text{okr}}{\text{min}} \right]. \quad (6-1)$$

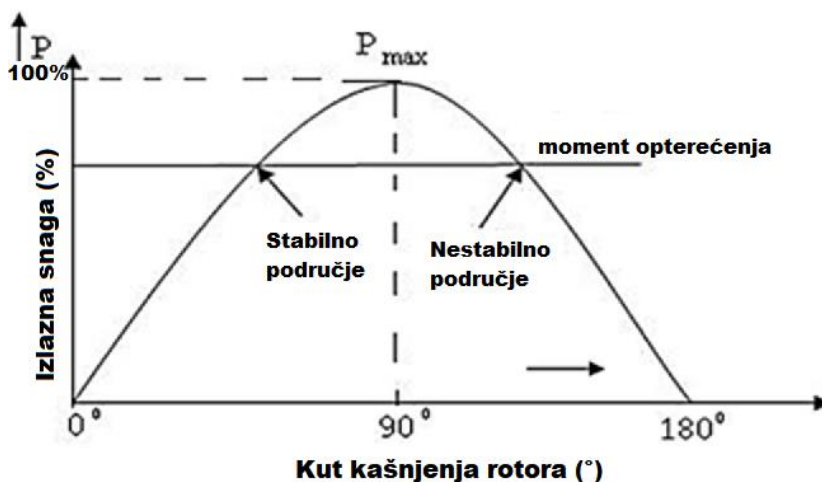
Pri čemu je p broj parova polova motora, a f frekvencija napajanja statorskih namota.

Dok kod DC motora s četkicama brzinu rotacije računamo prema [22]:

$$n = \frac{U - I_a \cdot R_a}{k \cdot \Phi} \left[\frac{\text{okr}}{\text{min}} \right]. \quad (6-2)$$

Gdje je: U je napon napajanja motora [V], I_a je struja koja prolazi rotorskim namotima, R_a je otpor rotorskog namota, k je konstanta određena građom motora i \emptyset magnetski tok koji je izražen u Weberima [Wb].

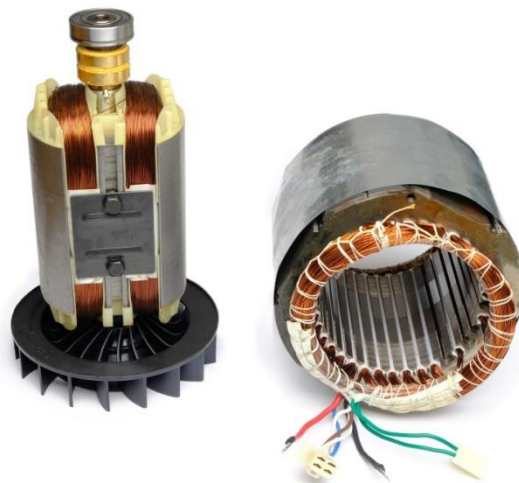
Ova vrsta motora ne može startati sama i potrebna je modifikacija rotora ili utjecaj izvana za zalijetanje. Zalijetanje se odnosi na ubrzanje rotora do brzine magnetskog polja do maksimalnog dopuštenog kutnog kašnjenja rotora koje ovisi o broju pari polova i tipu sinkronoga motora i za motore s jednim parom polova i jednim izvorom momenta iznosi 90 stupnjeva, a za svaki idući par duplo manje. Treba imati na umu da sinkroni motori s više izvora momenta imaju širu momentnu karakteristiku s većim dopuštenim kašnjenjem rotora koje motor može podneti, a da ne ispadne iz sinkronizma [18]. Kašnjenje rotora opisuje opterećenje sinkronog motora pri čemu kod praznog hoda motora rotor kasni približno 0 stupnjeva u odnosu na okretno magnetsko polje statora i motor ima minimalni moment dok pri maksimalnom dopuštenom kašnjenju motor ima maksimalni moment i ne smije više od toga opteretiti ili će ispasti iz sinkronizma i zakočiti rotor [18]. Na slici 6.3. [18] vidimo prikaz momentne karakteristike jednog sinkronog motora koja kod ovih motora ne ovisi o brzini nego o kutu kašnjenja rotora za okretnim magnetskim poljem statora [18].



Slika 6.3. Momentna karakteristika jednog sinkronog motora [18].

Specifičnost ovog tipa motora da ima uvijek isti broj okretaja neovisno o opterećenju čini ga pogodnim za reguliranje faktora snage i za korištenje kao generatora. Sinkroni AC generator se sastoji od trofaznog statorskog namota s kojeg dobivamo trofazni napon tj. struju i rotora s elektromagnetima napajanim DC izvorom koji se rotiraju pod utjecajem vanjske sile na osovini

rotora. Brzina rotacije određuje frekvenciju dobivene snage dok regulacijom DC izvora napajanja rotorskih elektromagneta reguliramo jalovu energiju, a time i iznos izlaznog napona sinkronog generatora [27]. Na slici 6.4. [21] vidimo prikaz rotora s DC uzбудom i jednofaznog statora jednoga AC sinkronog stroja (generatora).



Slika 6.4. Rotor i stator sinkronog AC generatora s jednim parom polova elektromagnetnog rotora [21].

Sinkroni motori s elektromagnetima se najčešće koriste kao generatori, ali mogu se koristiti i za pogon drugih velikih strojeva kao što su pumpe i mlinovi te u rijetkim slučajevima za pogon električnih automobila. Faktor snage sinkronog motora s elektromagnetima ovisi o uzbuđnoj struji rotora. U ovisnosti o iznosu uzbuđne struje moguće su tri tipa uzbuđe: nazivna uzbuđa, s nazivnom strujom pri čemu imamo faktor snage 1 i nazivni napon na izvodima statora, poduzbuđen rotor kojim teče struja manja od nazivne i pri tome na statoru nastaje struja koja kasni za dobivenim naponom, a generator uzima iz mreže jalovu energiju i na kraju naduzbuđen rotor kojim nastaje struja koja na statoru prethodi naponu i generator gura u mrežu jalovu energiju čime se može podići napon mreže [27].

6.1. Načini pokretanja sinkronih AC motora

Kao što je prethodno objašnjeno za razliku od sinkronih DC motora tj. DC motora bez četkica kojima upravljački dio zadužen za statorsku uzbudu određuje frekvenciju rada, a time i trenutnu brzinu, frekvencija rada sinkronih AC motora ukoliko nemamo VFD (engl. *variable frequency drive*) je određena frekvencijom mreže. Ovo znači da bih ovakav motor trebao iz stanja mirovanja trebao doći do brzine određene frekvencijom mreže trenutno što nije moguće niti u praznome hodu. Iz toga razloga razvijene su tehnike da se ovaj motor zaleti do brzine približne sinkronoj nakon čega se on može sam odvesti u sinkronizam te održavati na sinkronoj brzini [27].

1. Pokretanje pomoću dodatnog motora

Kod ove vrste pokretanja sinkroni stroj se pokreće kao generator, na osovinu motora se spoji pomoćni motor koji služi za pokretanje i zalijeće sinkroni motor do brzine na kojoj on sam može održavati sinkronizam. Nakon toga pomoćni motor se odspaja, uključuje se DC uzbuda rotora ako je riječ o AC sinkronom motoru s elektromagnetima na rotoru i sinkroni motor se spaja na mrežu.

Kod sinkronih motora manjih snaga za zalijetanje se koristi asinkroni motor dok se kod većih snaga za zalet koristi DC motor koji se napaja s istoga izvora kao i uzbuda sinkronoga motora ako je riječ o motoru s elektromagnetima [27]. Na slici 6.5. [36] možemo vidjeti primjer gdje je sinkroni AC motor spojen remenom s zaletnim motorom.



Slika 6.5. Primjer sinkronoga motora koji se zalijeće pomoćnim motorom [36].

2. Pokretanje pomoću rotorskog kaveza

Ovaj način pokretanja motora se ostvaruje pomoću rotorskog kaveza koji sinkroni motor ima ugrađen, to praktički znači da se motor zalijeće kao asinkroni motor bez potrebe da se na osovinu spaja dodatni motor. Budući da brzina asinkronog motora ovisi o opterećenju teret s kojim se sinkroni motor može na ovaj način zaletiti je donekle ograničen. Kada se rotor zaleti do brzine dovoljne za sinkronizaciju uključi se DC uzbuda rotorskih namota i motor se prebaci u sinkroni rad [27]. Kada se to dogodi magnetski tok statorskih namota više ne prolazi kroz vodiče rotorskog kaveza i samim time prestaje indukcija struje i momenta u njima. Moguće su i složenije izvedbe gdje umjesto rotorskog kaveza imamo snopove vodiča motora s kliznim prstenovima koji su preko četkica spojen na vanjski otpornik što omogućuje veći potezni moment i manju startnu struju u odnosu na start s kaveznim rotorom. Struja startanja motora se može još dodatno smanjiti s prespajanjem zvijezda-trokut, autotransformatorom, *soft* starterom i pomoću frekvencijskog pretvarača o čemu će biti riječ kasnije [27]. Na slici 6.6. [37] imamo prikaz jednog sinkronog motora s elektromagnetima koji ima ugrađeni kavez asinkronog motora za zalet.



Slika 6.6. Sinkroni motor s kavezom asinkronog motor za zalet [37].

3. Pokretanje pomoću frekvencijskog pretvarača (VFD)

Ova metoda ostvaruje pokretanje AC sinkronog motora na način da se mijenja frekvencija napajanja statorskih namota, a time i sinkrona brzina motora. Promjena frekvencije napajanja mijenja brzinu magnetskog polja statora prema tome ako dovoljno smanjimo frekvenciju AC napajanja možemo

magnetski povezati rotor s magnetskim poljem statora i postepeno povećavati frekvenciju i ubrzavati motor do željene brzine. Ako motor radi na frekvenciji manjoj od nazivne njegova stražnja elektromotorna sila se proporcionalno smanjuje, iz toga razloga uz smanjenje frekvencije moramo smanjiti i napon na statoru motora da bi struja kroz namote bila u dopuštenim granicama. Pošto strujne granice nisu za svaki motor iste frekvencijski pretvarači smanjuju napon proporcionalno frekvenciji da bi omjer napona i frekvencije uvijek bio isti [27].

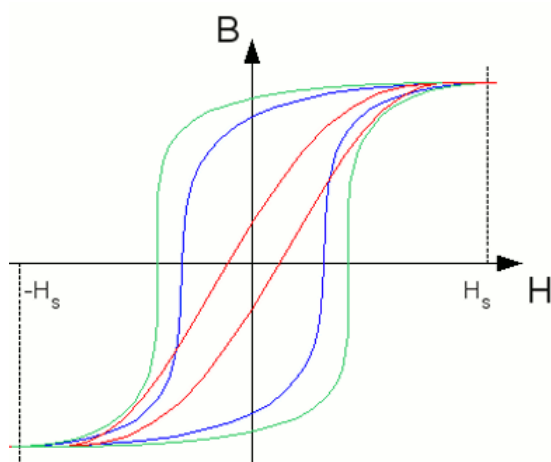
6.2. Histerezni motori

Ovo je posebna vrsta motora koji za razliku od svih ostalih AC sinkronih motora mogu sami startati bez ikakvih vanjskih pobuda i bez rotorskog kaveza. On može raditi na brzinama manjim od sinkrone, ali krajnja brzina mu je sinkrona i motor se nastoji ubrzati do sinkrone brzine i magnetski se spojiti s okretnim magnetskim poljem statora. Iz toga razloga ovaj motor spada u sinkrone motore. Stator ovoga motora ima distribuirane namote kao i ostali sinkroni motori dok mu se cilindrični rotor sastoji iz dva sloja, unutarnji sloj od nemagnetskog materijala s malom petljom histereze kao što je mesing ili aluminij i vanjski sloj od feromagnetskog materijala s velikim histereznim gubitcima (tvrdi feromagnetici) kao što je krom, nikal, alnico i legure kao što je kobalt – čelik koji je često izveden u prstenovima oko unutarnjeg sloja [26, 38]. Na slici 6.7. [38] je prikazan izgled rotora sinkronog histereznog AC motora gdje vidimo unutanji sloj od mekog feromagnetika i vanjski sloj od tvrdoga feromagnetika.



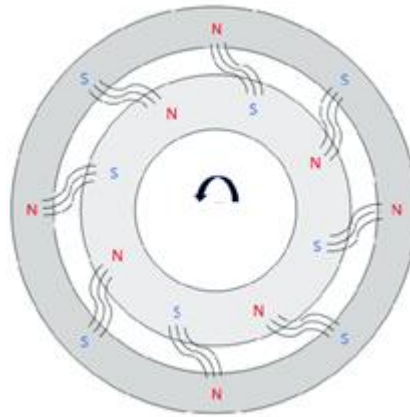
Slika 6.7. Rotor histereznog sinkronog motora [38].

Rad ovoga motora se zasniva na 2 principa to jest ima 2 izvora momenta na osovini. Prvi izvor momenta pomoću kojega i starta su vrtložne struje kao kod asinkronih motora koje se induciraju u rotoru te se rotor počinje okretati u smjeru okretnog magnetskog polja. Drugi izvor momenta je histerezni moment koji ovisi koliko su veliki histerezni gubitci korištenog materijala, što su veći to je dobiveni moment veći. Gubitci histereze nastaju uslijed magnetiziranja i demagnetiziranja vanjskoga dijela rotora koji je napravljen od tvrdog feromagnetika [40]. Na slici 6.8. [39] imamo prikaz primjera petlji histerezi za mekane i tvrde feromagnetike. Veća površina petlje ima za posljedicu veći zaostali magnetizam koji materijal ima kada se odspoji s izvora napajanja.



Slika 6.8. Primjeri oblika petlji histerezi za materijale različitih magnetskih kapaciteta [39].

U svakom trenutku osim kada je motor u sinkronizmu imamo utjecaj oba izvora momenta. Moment nastao zbog vrtložnih struja je prisutan od pokretanja do sinkrone brzine, a kada rotor dođe do sinkrone brzine magnetski se spaja s okretnim poljem statora i rotira se samo pod utjecajem histereznog momenta. U isto vrijeme prestaje se inducirati vrtložna struja u rotoru i motor se sam prebacuje iz asinkronog u sinkroni režim rada. U trenutku kada motor dosegne brzinu dovoljnu za sinkrono povezivanje okretno magnetsko polje statora inducira na vanjskom sloju rotora sjeverni i južni pol magneta i time ovaj motor počinje raditi kao sinkroni motor s trajnim magnetima tako što se magnetski polovi statora i rotora magnetski povezuju [40]. Na slici 6.9. [40] imamo prikaz induciranih polova na rotoru te njihovo povezivanje s polovima statora.



Slika 6.9. Prikaz principa rada histereznog motora u sinkronizmu [40].

Moment motora ovisi o veličini petlje histereze, veća histereza će dati veći moment bez obzira koja je sinkrona brzina motora. Površina petlje histereze i zaostali magnetizam u rotoru omogućuju trajno zaključavanje rotora s poljem statora čime se brzina rotora održava sinkronom. Pri manjim opterećenjima motora rad potreban za okretanje rotora je jednak radu demagnetiziranja tvrdog feromagnetskog metala rotora tako da rotor nema kuta zaostajanja za okretnim poljem statora. Kada opterećenje motora dovoljno naraste preostali magnetizam u rotoru nije dovoljan za svladavanje tereta i rotor počinje kasniti za statorom za kut određen veličinom tereta na rotoru [40].

Snaga koja nastaje na rotoru pod utjecajem vrtložnih struja ovoga motora računa se prema [25]:

$$P_e = k_e \cdot f_2^2 \cdot B^2 [W]. \quad (6-3)$$

Pri čemu je P_e dobivena snaga vrtložnih struja [W], k_e je konstanta vrtložnih struja, f_2 je frekvencija rotorskih vrtložnih struja [Hz] i B gustoća magnetskoga toka u zračnom rasporu [T].

Pri tome je:

$$f_2 = s \cdot f_1 \text{ [Hz]}. \quad (6-4)$$

Gdje je f_2 frekvencija rotorskih struja, s klizanje rotora i f_1 frekvencija statorskih struja.

Ova snaga uzrokuje moment vrtložnih struja koji se računa prema [25]:

$$M_e = \frac{k_e \cdot s \cdot f_1^2 \cdot B^2}{\omega_s} \text{ [Nm]}. \quad (6-5)$$

Gdje je M_e moment vrtložnih struja, ω_s je kružna frekvencija koja ovisi o frekvenciji struje napajanja.

Formule koje opisuju snagu i moment dobiven preko histereznih gubitaka su slične kao za vrtložne struje i glase [25]:

$$P_h = k_h \cdot f_2 \cdot B^{1.6} \text{ [W]}. \quad (6-6)$$

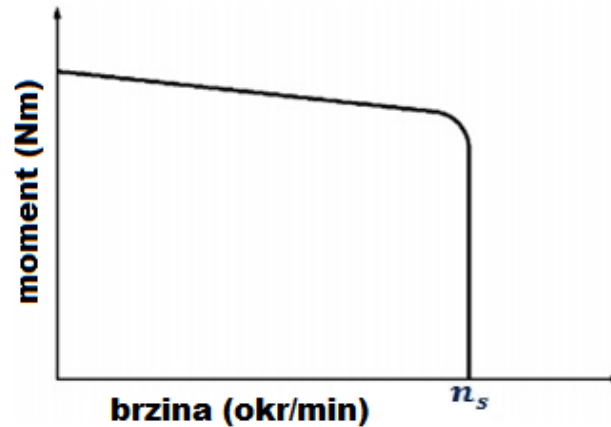
Pri čemu je P_h dobivena snaga gubitaka histereze [W], k_h je konstanta histereze nekog metala, f_2 je frekvencija rotorskih vrtložnih struja [Hz] i B gustoća magnetskoga toka u zračnom rasporu [T].

Ova snaga uzrokuje moment nastao gubitcima histereze koji se računa prema [25]:

$$M_h = \frac{k_h \cdot f_1 \cdot B^{1.6}}{\omega_s} \text{ [Nm]}. \quad (6-7)$$

Gdje je M_h moment histereze, ω_s je kružna frekvencija koja ovisi o frekvenciji struje napajanja, k_h je konstanta histereze nekog metala i B gustoća magnetskoga toka u zračnom rasporu [T].

Na slici 6.10. [26] vidimo prikaz momentne karakteristike histereznih motora gdje vidimo da motor drži približno isti moment od starta do sinkrone brzine s blagim padom uzrokovanim smanjenjem momenta vrtložnih struja [26, 40].



Slika 6.10. Momentna karakteristika histereznih motora [26].

Prednosti ovoga motora su: jako mala buka i vibracija pri radu, mogućnost samostartanja bez vanjskih pobuda, približno konstantan moment što omogućuje rad na širokom spektru brzina, jednostavna konstrukcija rotora i visoka pouzdanost.

Nedostaci ovih motora su: jako mala snaga s obzirom na dimenzije, mala učinkovitost, mali faktor snage, proizvodi se gotovo isključivo u jednofaznim izvedbama malih snaga, trofazne izvedbe su jako rijetke [26, 40].

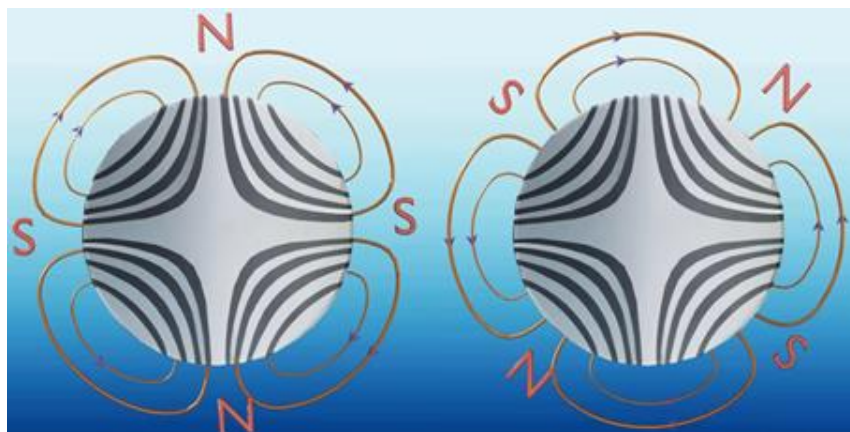
6.3. Sinkroni reluktantni motori

Ovaj tip motora se prvi puta počeo koristiti u prvoj polovici 20. stoljeća kada je imao dosta ograničeno područje uporabe zbog nemogućnosti samostalnog startanja, ali razvojem tehnologije izrade motora i načina upravljanja kao što je frekvencijski pretvarač (VFD) danas se ovi motori zbog učinkovitosti smatraju boljim od asinkronih motora u mnogim područjima primjene kao što je na primjer autoindustrija gdje su kompanije kao Toyota i Tesla odabrale hibridnu verziju ovog tipa motora za svoja električna i hibridna vozila. Na slici 6.11. [41] je prikazan unutarnji izgled sinkronog reluktantnog motora njegov rotor i stator s distribuiranim namotima.



Slika 6.11. Unutarnji izgled sinkronog reluktantnog motora [41].

Princip rada ovih motora je u suštini isti kao kod DC izvedbe to jest motora s promjenjivom reluktancijom gdje je rotor oblikovani komad metala koji se rotira u određenom smjeru tako da bi se okretno magnetsko polje statora zatvorilo kroz rotor putem s najmanje magnetskog otpora to jest reluktacije. Razlika je u tome što se kod DC motora s promjenjivom reluktancijom motor može sam startati pošto se kod njega elektronički kontrolira uzbuda pojedine faze tako da rotor može pratiti tempo uzbuda statorskih polova [41, 42]. Kod AC reluktantnih motora je drugačija situacija pošto je brzina okretnog magnetskog polja određena frekvencijom mreže što onemogućuje samostalni start motora. Na slici 6.12. [42] je prikazan rotor sinkronog reluktantnog motora u dvije pozicije, lijeva je s minimalnom reluktancijom magnetskoga toka čemu teži rad motora i desna gdje je rotor u poziciji maksimalne reluktancije i motor ima maksimalni moment.



Slika 6.12. Prikaz rotora reluktantnog u pozicijama minimalne i maksimalne reluktancije [42].

Stator ovih motora je isti kao i kod ostalih sinkronih i asinkronih motora dok je rotor napravljen od metalnih diskova poslaganih jedan preko drugog. Svaki od tih diskova ima jedanke proreze koji su dizajnirani tako da se izmjenjuju pozicije rotora s najvišom i najnižom reluktancijom to jest otporu prolaska magnetskog toka kroz magnetski vodljive dijelove rotora. Postoje razni dizajni proreza rotora čime se utječe na njegove radne karakteristike i učinkovitost [41, 42].

Prednosti ovoga tipa motora su: jednostavan i lagan rotor što povećava pouzdanost motora i olakšava zalet, mali troškovi održavanja, velika učinkovitost motora uzrokovana time što motor nema rotorskih struja, nema trajnih magneta na rotoru tako da motor neće s vremenom gubiti moment i učinkovitost zbog trošenja magneta, titranje momenta je puno manje nego kod DC motora s promjenjivom reluktancijom [41, 42].

Nedostaci ovoga motora su: mali faktor snage, nemogućnost samostalnog startanja, neisplativ rad bez frekvencijskog pretvarača [41, 42].

6.4. Sinkroni motori s trajnim magnetima

Ovi motori su po principu rada AC verzija DC koračnih motora budući da imaju istu izvedbu rotora. Rotor ovih motora se sastoji od parova magnetskih polova trajnih magneta. Trajni magneti služe za ostvarivanje rotorske uzbude slično kao i kod sinkronih motora s elektromagnetima, s razlikom da je ovdje riječ o trajnoj uzbudi bez vanjskog napajanja te se s obzirom na to niti ne može regulirati uzbuda kao kod rotora s elektromagnetima. Prikaz ovog tipa motora s jezgrama statora i rotora prikazan je na slici 6.13. [43] gdje imamo prikazan rotor s umetnutim magnetima što je najčešća izvedba ovog tipa motora.



Slika 6.13. Prikaz sinkronog motora s trajnim umetnutim magnetima te njegovih statora i rotora [43].

Za razliku od motora s elektromagnetima ovi motori imaju drugačiju namjenu u industriji te se najčešće koriste kao pogonski motori. Učinkovitost ovih motora raste povećanjem opterećenja te su najučinkovitiji pri graničnim opterećenjima. Problem ovih motora je mala učinkovitost pri malim opterećenjima kao i opasnost od demagnetizacije magneta pri jako velikim brzinama kada su povećani gubitci u bakru motora i on se sve više zagrijava te se njegova učinkovitost smanjuje nakon određene brzine. Ovo nam govori da su dobri za zadatke gdje se traže konstantna i velika opterećenja kao što je robotika i pogon električnih vozila [58].

Prema konstrukciji rotora ove motore dijelimo na motore s istaknutim i neistaknutim polovima. Rotori s istaknutim polovima su takozvani stari tip dizajna koji susrećemo kod DC motora i velikih sinkronih generatora s veliki promjerom rotora, ovaj tip dizajna se koristi za motore s malom nazivnom brzinom. Rotori s neistaknutim polovima su oni koji se najčešće koriste kod sinkronih AC motora s trajnim magnetima, imaju relativno mali promjer u odnosu na svoju duljinu te su pogodni za velike brzine rotacije i imaju manje zračne raspore između polova u odnosu na rotore s istaknutim polovima. Važna karakteristika sinkronoga motora koja utječe na njegove performanse je njegova direktna direktna i kvadraturna sinkrona reaktancija [58].

Sinkrona reaktancija direktne osi je otpor prolasku magnetskog toka od statora kroz rotor kada su rotorski i statorski pol na istoj osi poravnati. Iznos sinkrone reaktancije se određuje za slučaj kada iznos magnetomotorne sile armature ima svoju vršnu vrijednost poluperiode sinusoide. U tome

trenutku kod reluktantni motora zračni raspored je najmanji te je stoga i reluktancija najmanja, a magnetski tok najveći [44, 58].

Sinkrona reaktancija kvadrature osi se odnosi na situaciju kada je statorski pol na kojem je u tome trenutku vršna vrijednost magnetomotorne sile poravnat na istoj osi polovicom puta između dva rotorska pola. U ovoj poziciji rotora zračni raspored između rotora i statora je najveći te je zajedno s time i reluktancija najveća. U slučaju da su iste direktna i kvadratura sinkrona reaktancija imamo rotor s konstantnim zračnim rasporedom između rotora i statora [44, 58].

Direktna i kvadratura sinkrona reaktancija se računaju prema formuli [44]:

$$X_{sd,sq} = X_1 + X_a \cdot k_{fd,fq} [\Omega]. \quad (6-8)$$

Pri čemu je X_1 otpor koji nastaje zbog rasipnog toka statorskih namota po fazi motora, X_a je zajednička reaktancija direktne i kvadrature osi, $k_{fd,fq}$ su koeficijenti ovisni o dizajnu i konstrukciji rotora motora.

Zajednička reaktancija direktne i kvadrature osi X_a se računa prema [44]:

$$X_a = 4 \cdot m_1 \cdot \mu_0 \cdot f \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{w1})^2 \cdot \tau \cdot L_i}{\pi \cdot p \cdot k_c \cdot g} [\Omega]. \quad (6-9)$$

Gdje je m_1 broj statorskih faza, μ_0 relativna permeabilnost vakuuma, f je frekvencija izvora napajanja motora, N_1 je broj zavoja po fazi statora, k_{w1} je koeficijent osnovnog harmonika statorskog namota, p je broj pari polova motora, τ je visina statorskog pola, L_i je duljina statora motora, k_c je Karter-ov koeficijent za zračni raspored, i g je zračni raspored koji je kod rotora s neistaknutim polovima isti ili približno isti kod direktne i kvadrature osi.

Prema poziciji magneta u rotoru ove motore možemo podijeliti na motore s vanjskim i unutarnjim magnetima. Motori s vanjskim magnetima su stariji dizajn isti koji se koristi i kod DC motora, dok dizajn s unutarnjim magnetima se trenutno smatra najnaprednijim dizajnom rotora motora s obzirom na učinkovitost, cijenu proizvodnje i snagu s obzirom na volumen motora. Ovi motori se često koriste kod električnih automobila i najveći dio proizvođača ih koristi umjesto asinkronih motora koji su drugi po zastupljenosti. Na tablici 6.1. [45] imamo prikazano koje tipove elektromotora koriste određeni modeli raznih proizvođača.

Tablica 6.1. Vrste elektromotora pojedinih modela automobila [45].

| Proizvođač i model | Vrsta motora | Materijal rotora, izvedba | Maksimalna brzina motora (okr/min) |
|--------------------|--------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Audi e-Tron | asinkroni | Aluminij, kavezni | ≈10000 |
| BMW i3 | sinkroni | Trajni magnet, umetnuti magneti | 11400 |
| Chevrolet Volt | sinkroni | Trajni magnet, umetnuti magneti | 8900 |
| Hyundai e-Kona | sinkroni | Trajni magnet, umetnuti magneti | 11000 |
| Jaguar i-Pace | sinkroni | Trajni magnet, umetnuti magneti | 13000 |
| Mercedes EQC | sinkroni | Trajni magnet, umetnuti magneti | ≈10000 |
| Nissan Leaf | sinkroni | Trajni magnet, umetnuti magneti | 10500 |
| Renault Zoe | sinkroni | Elektromagnetni rotor | 11300 |
| Tesla S | asinkroni | Bakar, kavezni | 16000 |

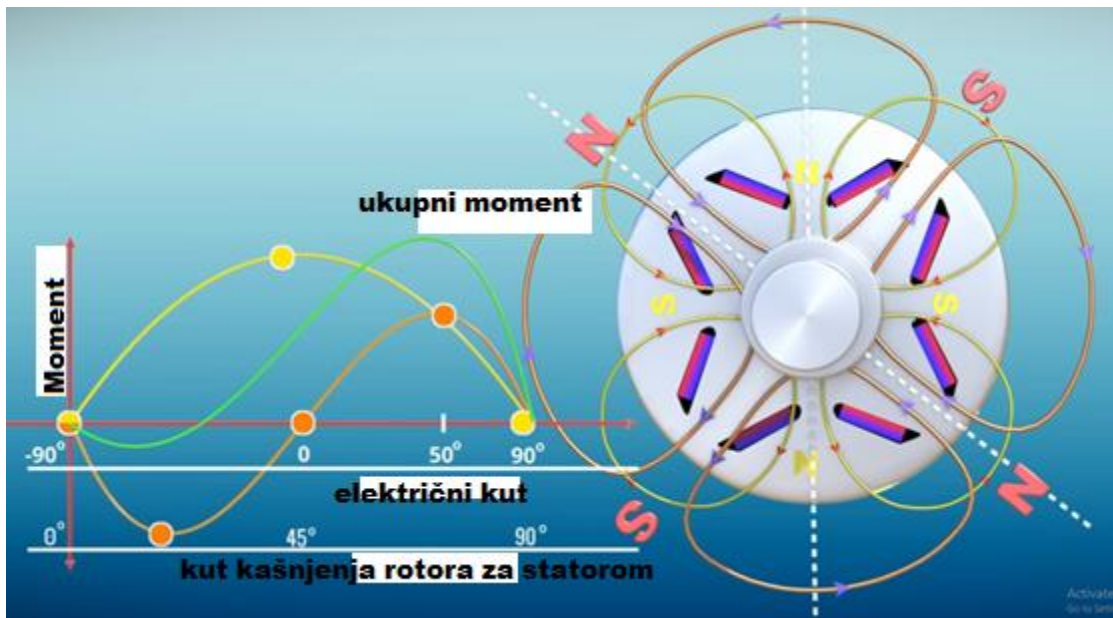
Na slici 6.14. [46] imamo prikaz raznih izvedbi dizajna rotora reluktantnog elektromotora s umetnutim magnetima različitih modela automobila.



Slika 6.14. Prikaz dizajna rotora elektromotora raznih proizvođača električnih automobila [46].

Ovi motori uz moment dobiven magnetskim povezivanjem polova rotora s okretnim magnetskim poljem statora imaju i reluktantni moment te se zbog toga na nekim mjestima zovu reluktantni sinkroni motori s trajnim magnetima [58]. Ovi motori nemaju gubitke rotorskih struja kao kod asinkronih motora, a u isto vrijeme imaju dobar potezni moment zbog trajnih magneta uz kontrolu pomoću frekvencijskog pretvarača koji kontrolira da međusobni razmak rotora i statora bude maksimalan dopušten da bi dostupni moment motora bio što veći. Rotor ovog tipa motora je napravljen tako da za svaki magnetski pol imamo dva mjesta najmanje reluktancije. Iznosi

reluktacija na ta dva mjesta ne moraju biti isti čime se mijenja momentna karakteristika motora i određuje da li će motor imati veći maksimalni kut opterećenja ili veći maksimalni moment [58]. Prikaz oscilacija reluktantnog i magnetskog momenta pri radu jednoga IPM (engl. *interior permanent magnet*) motora s jednakim najmanjim reluktancijama možemo vidjeti na slici 6.15. [47] gdje je ukupni moment ovih motora suma ta dva momenta.



Slika 6.15. Prikaz oscilacija reluktantnog i magnetskog momenta reluktantnog motora s trajnim magnetima [47].

Ako promatramo rotaciju rotora možemo vidjeti da pri rotaciji od 0 do 90 stupnjeva pošto se radi o motoru s četiri pola imamo jednu amplitudu magnetskog momenta i dvije amplitude reluktantnog momenta razlog tome je taj što su magnetski polovi ujedno i mjesta s najmanjom reluktancijom te uz to između svaka dva magnetska pola imamo još jedno mjesto s najmanjom reluktancijom. Iznosi tih reluktancija određuju oblik momentne karakteristike [58]. Na slici 6.15. imamo slučaj gdje su sva mjesta s najmanjom reluktancijom iste reluktancije pa je s obzirom na to momentna karakteristika deformirana u desno i kao rezultat imamo još jednu specifičnost ovoga tipa motora, a to je da oni imaju područje na karakteristici momenta gdje im je moment 0 Nm ili negativan. Ta pojava nastaje kada suma momenta postaje negativna iz razloga što tada negativna poluperioda reluktantnoga momenta ima veću amplitudu od momentna trajnoga magnetna što uzrokuje negativnu sumu [58].

Općenita formula za računanje elektromagnetskog momenta sinkronih motora s unutarnjim trajnim magnetima glasi [28]:

$$M_e = \frac{3P}{4} \left[\frac{1}{2} (L_d - L_q) \cdot I_m^2 \cdot \sin(2\alpha) + \lambda_f \cdot I_m \cdot \sin(\alpha) \right] \text{ [Nm]}. \quad (6-10)$$

Gdje je P broj polova rotora, L_d i L_q direktni i kvadratni sinkroni induktivitet, I_m vršna struja statorskih namota, α iznos kuta kašnjenja rotora za statorom, λ_f je jakost magnetskog toka.

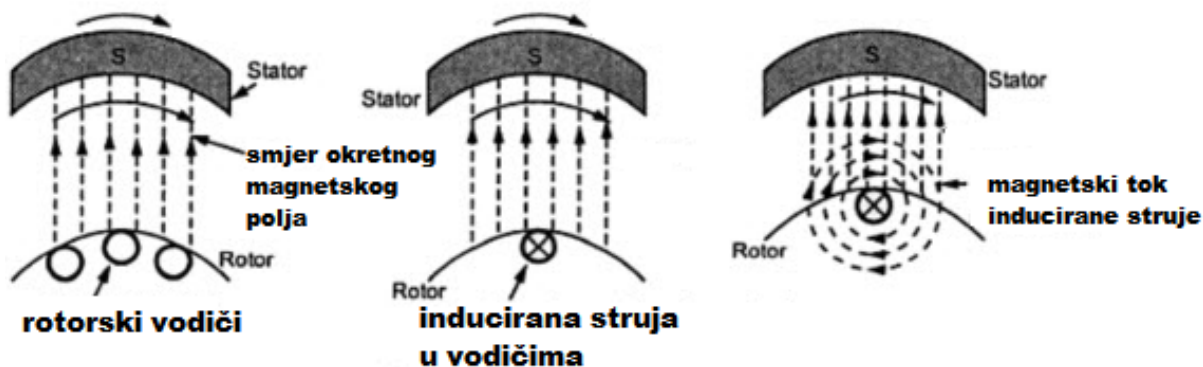
Trajni magneti koji se koriste za rotore ovih motora izrađeni su od legura kao što su samarij-kobalt s dodatkom željeza i bora. Iz ekonomskih razloga najčešća legura koja se koristi je neodimij-bor-željezo, također mogući su primjeri da se u rotorima koriste magneti sastavljeni iz više dijelova kao što se radi s jezgrama statora da bi se smanjili gubitci vrtložnih struja, a time i zagrijavanje. Kao prednosti ovih motora možemo navesti visoku učinkovitost na velikim brzina, jednostavno održavanje i velik moment na malim okretajima. Najznačajniji nedostaci ovih motora su veća cijena u odnosu na asinkrone motore istih snaga, mala učinkovitost na malim opterećenjima, poreba za frekvencijskim pretvaračem za zalet i rad te korištenje trajnih magneta koji se mogu smatrati neobnovljivim materijalom s stajališta recikliranja [58]. Modeliranje ovoga tipa motora i simulacije njegovoga rada i zaleta odrađeno je u prilogu rada Prilog P.6.4.

7. ASINKRONI MOTORI

Sinkroni motori su zbog frekvencijskih pretvarača bez kojih nebi imali tako dobre radne karakteristike i učinkovitost jako zastupljeni u nekim područjima strojeva kao što su električni automobili, ali općenito gledano u cjelokupnoj industrijskoj i ostaloj uporabi asinkroni motori su još uvijek najzastupljeniji tip motora.

Stator sinkronog i trofaznog asinkronog motora su isti i imaju istu funkciju stvaranja okretnog magnetskog polja, razlika je u rotoru i principu na koji se stvara okretni moment. Rotor asinkronih motora se sastoji od jezgre od spojenih željeznih limova na kojima se nalaze poredane bakrene ili aluminijske šipke koje su na krajevima rotora svi međusobno kratko spojeni i možemo ih promatrati kao zaotvorene petlje rotora [48].

Kada se pojavi okretno magnetsko polje statora na temelju Faraday-evog zakona elektromagnetske indukcije u vodičima rotora se inducira struja koja svojim protjecanjem stvara svoje magnetsko polje rotora. Novostvoreno magnetsko polje teži ka rotaciji u smjeru magnetskog polja statora te tako dolazi do pojave momenta na rotoru u smjeru okretnog magnetskog polja statora što možemo vidjeti na slici 7.1. [48]. Budući da struja u rotoru kasni za onom u statoru nastanak magnetskog polja rotora ovisi o magnetskom polju statora te nastaje kao posljedica njegove promjene to polje nikad ne može dostići brzinu statorskog polja. Tako dolazimo do toga da asinkroni motori nikada ne mogu dostići sinkronu brzinu. Razlika brzine okretnog magnetskog polja statora i brzine rotacije rotora opisuje se koeficijentom koji se naziva klizanje koji se kreće od 1 kada je rotor blokiran da se ne može rotirati do broja blizu nule kada je rotor neopterećen i okreće se u praznome hodu [48].



Slika 7.1. Princip rada asinkronog motora [48].

Budući da ovaj princip rada ovim motorima omogućuje da samostalno startaju pod uvjetom da je teret motora manji od poteznog momenta motora i da u slučaju jednofaznog asinkronog motora imamo izvedenu drugu fazu to jest da se realizira dvofazni asinkroni motor. Zbog toga se mogu koristiti za zalet sinkronih motora do sinkrone brzine nakon čega prestaje indukcija struje u vodičima [48].

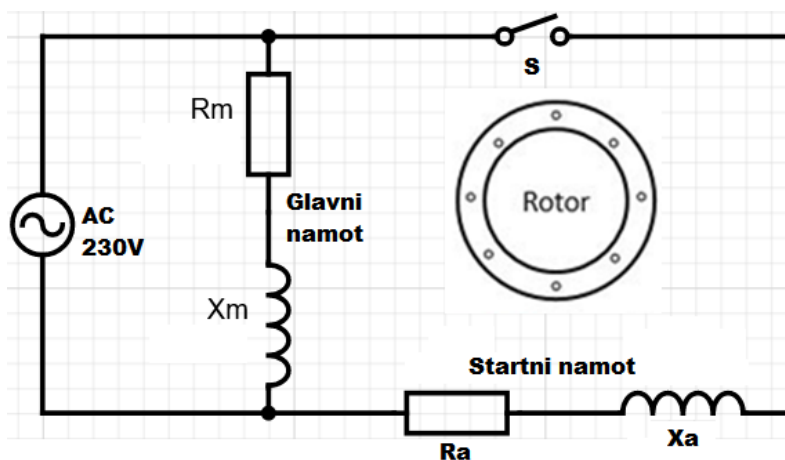
7.1. Jednofazni asinkroni motori

Općenito asinkrone motore dijelimo na osnovu izvedbe statora na jednofazne i trofazne. Jednofazni motori sami po sebi nisu sposobni samostalno startati. Razlog tome je taj što jednofazni napon ne stvara okretno magnetsko polje već stvara pulsirajuće magnetsko polje. To možemo zamisliti tako da imamo s dvije nasuprotne strane statora polove magneta koji se izmjenjuju i uzrokuju da rotor titra u mjestu. Da bi se rotor počeo okretati potrebno ga je vanjskom silom zaletiti do brzine dovoljne da sam može održavati brzinu u smjeru zaleta ili napraviti modifikacije statora da bi se dobio taj impuls za početak rotacije [23].

S obzirom na varijacije statora jednofazne asinkrone motore dijelimo na:

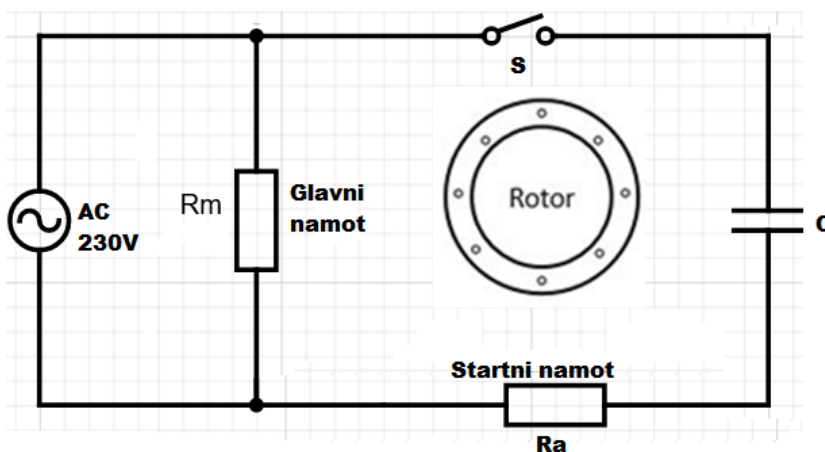
Motore s startnim otporom - ovi motori uz 2 glavna statorska namota imaju i 2 startna namota između njih. Glavni namoti imaju mali omski otpor i veliki reaktivni induktivni otpor dok startni namoti imaju suprotne vrijednosti, veliki omski otpor i mali induktivni otpor čime se dobivaju

glavna i startna struja koje su fazno razmaknute. Startni namoti su spojeni paralelno s glavnim i rade dok se motor ne zaleti zatim se isključuju što je vidljivo na slici 7.2. Ovi tipovi motora su jeftini i prave se do snaga od 1 kW, imaju mali potezni motent i koriste se za jednostavne zadatke bez kompleksne kontrole brzine [23].



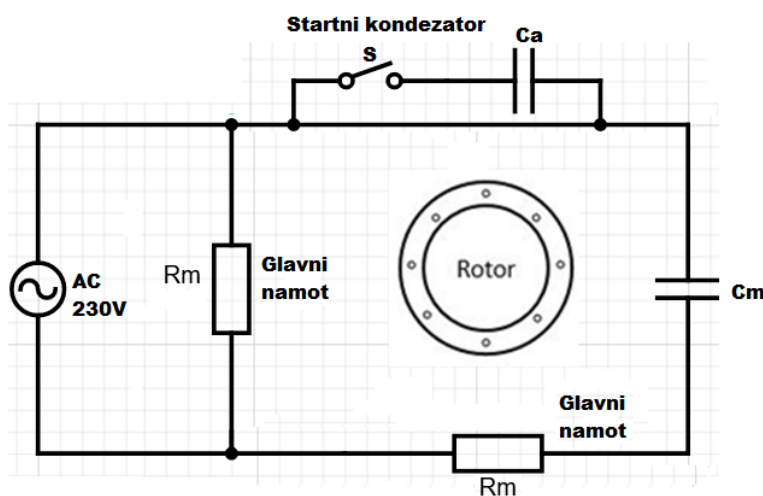
Slika 7.2. Električna shema motora s startin otporom.

Motori s startnim kondezatorom – ovi motori isto imaju glavne i startne namote, ali nemaju veliku razliku u induktivnom otporu. Fazni pomak struja ovdje se dobiva spajanjem kondezatora prikladne veličine na startni namot da bi se povećala reaktancija te se poslije zaleta startni namot isključi. Ovisno o polaritetu spojenog kondezatora mijenjamo smjer okretanja motora. Pogodni su za terete gdje imamo učestala stajanja i ponovna pokretanja kao što su kompresori, perilice rublja, mješalice [23]. Na slici 7.3. prikazana je električna shema motora s startnim kondezatorom.



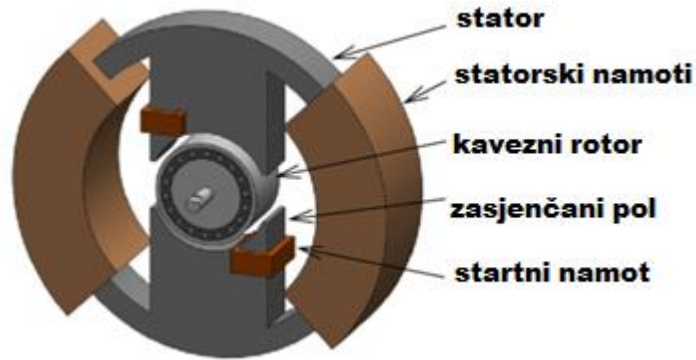
Slika 7.3. Električna shema motora s startin kondezatorom.

Motori s startnim i pogonskim kondenzatorom – ovi motori su isti kao i motori s startnim kondenzatorom s jedinom razlikom da kod ovih motora postoji još jedan kondenzator koji je paralelno spojen s startnim kondenzatorom i ne isključuje se kada se motor zaleti što znači da kod ovih motora startni namot je uvijek uključen samo se isključi jedan kondenzator kada se motor zaleti [23]. Na slici 7.4. možemo vidjeti električnu shemu ovoga motora.



Slika 7.4. Električna shema motora s startnim i pogonskim kondenzatorom.

Motor s zasjenčanim polovima – posebna vrsta jednofaznih motora koji nemaju posebne namote za startanje. Posebni su po tome što su im svi polovi zasječeni najčešće na dvije trećine dužine pola i oko manjeg dijela je stavljen bakreni prsten. Taj manji dio zove se zasjenjeni pol i služi za regulaciju magnetskog toka na tome polu tako što mijenjanjem amplitude struje namota mijenja magnetski tok u jednom i drugom dijelu pola te time ostvaruje improvizirano okretno magnetsko polje. Ovi motori imaju malu učinkovitost i faktor snage kao i potezni moment te se koriste samo kod zahtjeva gdje se traži najjeftinija opcija za pogon [23, 49]. Konstrukcija ovoga motora prikazana je na slici 7.5. [49] gdje je se vidi kako izgledaju polovi ovoga motora.



Slika 7.5. Konstrukcija motora s zasječenim polovima [49].

7.2. Trofazni asinkroni motori

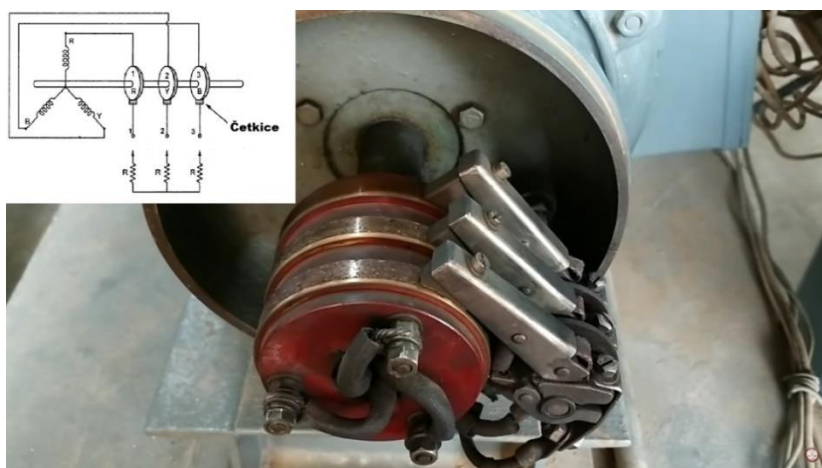
Za razliku od jednofaznih motora koji se koriste za mala opterećenja s malom učinkovitosti ovaj tip motora se koristi velika opterećenja te uz to ima veliku učinkovitost. Ovaj tip motora može sam startati te uz to ima relativno veliki potezni moment, ali po cijenu manje učinkovitosti ili velike potezne struje koja može biti nekoliko puta veća od nazivne [54].

S obzirom na konstrukciju rotora ovi motori se dijele na motore s kavezni rotorom i motore s kliznim prstenovima. Konstrukcija kavezni rotora je objašnjena ranije, a rotor s kliznim prstenovima rade na istom principu, ali im je konstrukcija složenija. Kao i kavezni rotor i ovi rotor imaju željeznu jezgru, ali ovi rotor umjesto bakrenih šipki imaju klasične vodiče koji su u snopovima položeni na rotoru i spojeni su zajedno u zvijezdu na izvodima vanjskih otpornika. Na slici 7.6. [51, 52] vidimo konstrukciju rotora trofazni kavezni lijevo i s kliznim prstenovima desno asinkronih motora.



Slika 7.6. Trofazni asinkroni motor s kavezni rotorom lijevo i s kliznim prstenovima desno [51, 52].

Svaka faza na rotoru je povezana s svojim vanjskim otpornikom preko kliznih prstenova na osovini motora. Vanjski otpornici služe da bi se povećao omski otpor faza čime se smanjuje fazni kut kašnjenja rotorske struje za statorskom što za posljedicu ima veći moment pri nižim i srednjim okretajima u odnosu na kavezni rotor kao i potezni moment koji ovisi o omskom otporu. Povećanje otpora rotora uzrokuje manju učinkovitost pri radu osim kod starta kada otpornici spojeni na rotor smanjuju poteznu struju. Otpornici su spojeni na rotorske namote dok se motor ne zaleti do nazivne brzine nakon čega se otpornici odspoje, a rotorski izvodi kratko spoje nakon čega motor radi kao kavezni tip rotora [54, 29]. Prikaz načina na koji se ostvaruje spoj rotorskih namota s otpornicima prikazan je na slici 7.7. [53]. Ovaj tip rotora je skuplji od kaveznog te je složeniji za proizvodnju i zahtjeva veći prostor za ugradnju.



Slika 7.7. Prikaz povezivanja vanjskih otpornika s namotima rotora [53].

U pogledu dizajna rotora kaveznog motora imamo 3 tipa rotora, a to su unutarnji kavez, vanjski kavez i rotor s dvostrukim kavezom. Ukupni otpor rotorskog kaveza ovisi o tome kolika je površina presjeka rotorskih šipki motora što utječe na to kako će izgledati momentna karakteristika motora čiji oblik se mijenja zbog iznosa i faznog kuta struja koje se induciraju u rotoru pri određenoj rotorskoj reaktanciji koja je uzrokovana klizanjem motora [54].

Rotorska reaktancija asinkronih motora zadana je prema [35]:

$$X_r = 2\pi(s \cdot F_s) \cdot L \text{ [}\Omega\text{]}. \quad (7-1)$$

Gdje je: s iznos klizanja rotora, F_s frekvencija statorske struje, i L je induktivitet rotora.

Najčešće korišteni rotori su s vanjskim kavezom s velikim presjekom bakrenih šipki koji pri startu to jest pri klizanju 1 kada je rotorska reaktancija velika imaju mali omski otpor mali te je stoga potezni moment relativno mali zbog velikog faznog pomaka struja, ali s povećanjem brzine rotora i smanjenjem klizanja rotorska reaktancija opada i momentna karakteristika motora raste [54]. Moment ovog tipa motora ovisi faznom pomaku između struja statora i rotora odnosno o omjeru impedancije i reaktancije rotora. Startni moment motora se računa prema [35]:

$$M = \left(\frac{3}{2\pi \cdot n_s}\right) \cdot \left(\frac{E^2 \cdot R_R}{R_R^2 + X_R^2}\right) \text{ [Nm]}. \quad (7-2)$$

Pri čemu je n_s sinkrona brzina motora, E inducirani napon na rotoru, R_R je omski otpor kaveza rotora i X_r je rotorska reaktancija.

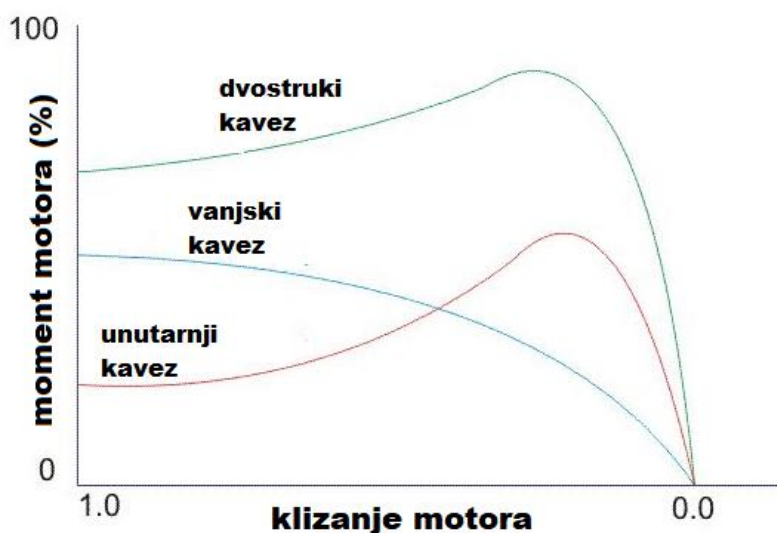
Iz gore navedene formule vidimo da će mo maksimalni moment motora imati kada je rotorski omski otpor jednak rotorskoj reaktanciji [35].

Motori s kliznim prstenovima su taj problem riješili s dodatnim otpornicima koji iako smanjuju rotorsku struju što bi inače izazvalo smanjenje momenta zapravo povećavaju moment motora tako što smanjuju fazni pomak rotorske struje za statorskom. Kavezni motori pošto nemaju vanjske otpornike imaju na nižim okretajima veliki fazni pomak rotorske struje određen konstantnim otporom rotorskog kaveza. Otpor rotorskog kaveza je pak određen površinom presjeka vodljivih šipki što nas dovodi do zaključka da kavezni motori s malim presjecima kaveznih šipki imaju veći omski otpor, a s time i veći potezni moment s manjom poteznom strujom. Potezni moment motora s kaveznim rotorom koji imaju veliki omski otpor kaveza je ujedno i maksimalni moment motora

nakon čega karakteritika momenta opada [54, 29]. Modeliranje ovoga tipa motora i simulacije njegovoga rada i zaleta odrađeno je u prilogu rada Prilog P.7.2.

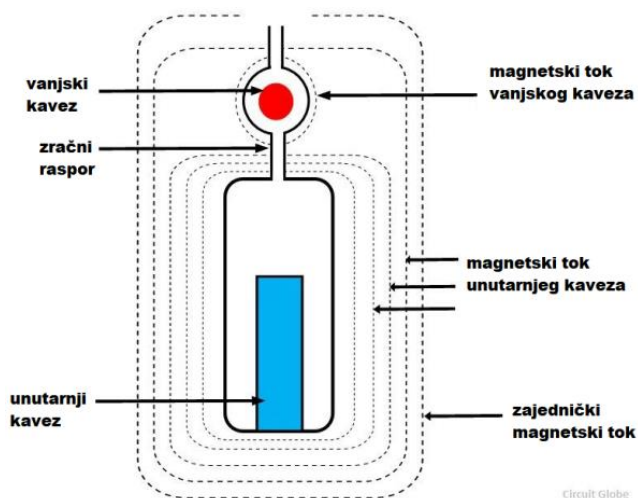
S druge strane imamo kavezne motore s velikim presjekom kaveznih šipki koji ima mali omski otpor te je stoga ovdje situacija suprotna, povlači se velika potezna struja koja stvara relativno mali potezni moment nakon čega moment još malo opadne zbog toga što se smanjila potezna struja. Kada prođe faza početnog zaleta i klizanje dovoljno padne momentna karakteristika naglo raste do točke prijelomnog momenta nakon čega moment počinje naglo opadati zbog toga što se brzina rotora približava brzini okretnog magnetskog polja statora što znači da kada to promatramo iz perspektive rotora okretno magnetsko polje statora nije dovoljno brže od rotora da se inducira u rotoru struja koja bi uzrokovala rast momenta već se razlika u brzini smanjuje do brzine praznog hoda motora kada je struja rotora najmanja, a time i moment [54, 55].

Kao kompromis optimalnih karakteristika kaveznih motora imamo motore s dvostrukim kavezom. On posjeduje dva reda kaveznih šipki jedan ispod drugog pri čemu je gornji kavez s malim presjekom šipki napravljen od materijala s većim specifičnim otporom kao što je aluminij, a doljnji kavez je s velikim presjekom šipki od materijala s manjim specifičnim omskim otporom kao što je bakar. Ovaj dizajn je napravljen tako da bi se dobile dobre karakteristike oba tipa kaveza pri čemu gornji kavez daje veliki potezni moment, a doljnji daje veliki prekretni moment motora što je vidljivo na slici 7.8. [55].



Slika 7.8. Momentne karakteristike trofaznih asinkronih motora [55].

Ključni dio ovakve konstrukcije rotora je zračni raspor između gornjeg i donjnjeg kaveza prikazan na slici 7.9. [55] koji služi za usmjerivanje magnetskog toka na donjni kavez jer u suprotnom da nema toga raspora sav tok bi se zatvarao oko gornjeg kaveza i nebi bilo indukcije struje na donjnjem kavezu [54, 55].



Slika 7.9. Dizajn rotora s dvostrukim kavezom [55].

Kada motor s dva kaveza starta potezna struja statora inducira struju na rotoru koja velikom većinom teče gornjim kavezom koji ima veliki omski otpor te zbog toga imamo veliki potezni moment zbog malog faznog pomaka između statorske i inducirane struje. Velika većina struje se inducira na gornjem kavezu zbog manjeg magnetskog otpora to jest rotorske reaktancije između statora i gornjeg kaveza u odnosu na stator i donjni kavez, te zbog skin efekta pošto struje s povećanjem frekvencije teže ka strujanju površinom rotora to jest gornjim kavezom, a frekvencija rotorske struje ovisi klizanju motora gdje veće klizanje uzrokuje veću frekvenciju rotorske struje. Kako se motor zalijeće rotorska reaktancija se smanjuje kao i frekvencija inducirane struje pa se tako smanjuje struja u gornjem kavezu i povećava u donjnjem kavezu. Ovaj proces se odvija dok motor ne dosegne prekretni moment kada struja u gornjem kavezu pada na zanemarivu razinu [54, 55].

Generalno motori s kaveznom rotorom se koriste češće od motora s kliznim prstenom iz razloga što su jeftiniji, povoljniji za održavati, jako učinkoviti, manje se griju osim pri startu. Ako je riječ o teretu koji zahtjeva veliki potezni moment i često se potpuno zaustavlja onda su prikladniji motori s kliznim prstenovima kao što su dizala, liftovi i pumpe koje startaju pod opterećenjem [29, 54].

Kada pogledamo rotor asinkronih motora to jest kavez rotora odnosno snopove motora s kliznim prstenovima vidimo da nisu ravni to jest paralelni s osovinom rotora nego su postavljeni pod određenim kutem. To je način na koji se ostvaruju bolje karakteristike rada motora kao što su :

Veći potezni moment – budući da su vodiči položeni dijagonalno njihova duljina je veća i to povećava optor rotora motora što za posljedicu ima veći potezni moment i manju poteznu struju [30].

Zaštita od magnetskog zaključavanja rotora i statora – ako je broj statorskih namota jednak broju rotorskih vodiča to jest šipki ili njegovom višekratniku postoji mogućnost da motor odbije startati ili starta jako grubo zato što su se polovi statora i rotora zaključali u poziciji najmanje reluktancije između rotora i statora. To se eliminira dijagonalnim oblikom šipki to jest snopova rotora [30].

Zaštita od puzanja motora – pojava kada se motor okreće brzinom koja je najčešće jednaka sedmini ili trinaestini sinkrone brzine naziva se puzanje. Uzrokovana je neparnim harmonicima kao što su peti i sedmi koji se javljaju pri velikim klizanjima motora. Svaki red harmonika ima svoju sinkronu brzinu okretanja motora koja je manja od nazivne motora. Ovo znači da kada motor ubrzava on mora prestići sinkrone brzine svojih harmonika. Ako je moment tereta svladan momentom kojeg stvara sedmi harmonik pri njegovoj sinkronoj brzini moguće je da motor neće nastaviti ubrzavati poslije jedne sedmine nazivne sinkrone brzine [30].

Smanjuje magnetski šum – dijagonalni vodiči rotora smanjuju buku pri radu motora [30].

Kut pod kojim će biti postavljeni vodiči u odnosu na osovinu rotora odeđuju se formulom [30]:

$$\alpha = \frac{720}{n \cdot (P/2)} [^\circ]. \quad (7-3)$$

Pri čemu je n broj harmonika i P je broj polova.

Inducirani napon na rotorskom kavezu sadrži više harmonike koji uz veće gubitke motora uzrokuju i titranje momenta. Ovisno kojega je reda harmonik uzrokovati će mikropomake rotora naprijed ili nazad, ta pojava uzrokuje titranje momentne karakteristike kao i vibracije asinkronog motora ponajviše pri većim klizanjima i startu [30, 54].

Da bi se pri startu kaveznog motora smanjila udarna struja koriste se metode koje utječu na napon, struju ili frekvenciju motora tako da se po cijenu manjeg poteznog momenta udarna struja spusti na prihvatljivu razinu. Najjeftinija metoda je regulacija napona motora pri startu pomoću releja za zvijezda trokut metodu starta. Ovom metodom povećavamo napon motora, a u isto vrijeme smanjujemo njegovu struju te moment. Kada motor treba startati relej je podesio motor u zvijezda spoj da bi se smanjila udarna struja te se nakon određenog vremena kada se motor zaleti relej prebacuje motor nazad u trokut spoj za veću struju i moment. Vrijeme koje će relej držati motor u zvijezda spoju ovisi o veličini tereta na osovini i momentu motora u zvijezda spoju [54].

Iduća metoda startanja motora je pomoću *soft* startera. *Soft* starter je uređaj koji se spaja prije motora i sastoji se od anti paralelno spojenih tiristora koji služe za ograničavanje struje motora. Pomoću ovoga uređaja možemo podesiti napon tako da se on postupno povećava s brzinom tako da rotor jednoliko ubrzava do nazivnog napona [54].

Najskuplja metoda je kontrola frekvencije pomoću frekvencijskih pretvarača. Pomoću njih mijenjamo oblik momentne karakteristike i sinkronu brzinu. Postupnim povećanjem frekvencije od nule dobijamo nabolju radnu karakteristiku motora zato što pri manjim frekvencijama kada zalijećemo motor imamo veći moment motora [54].

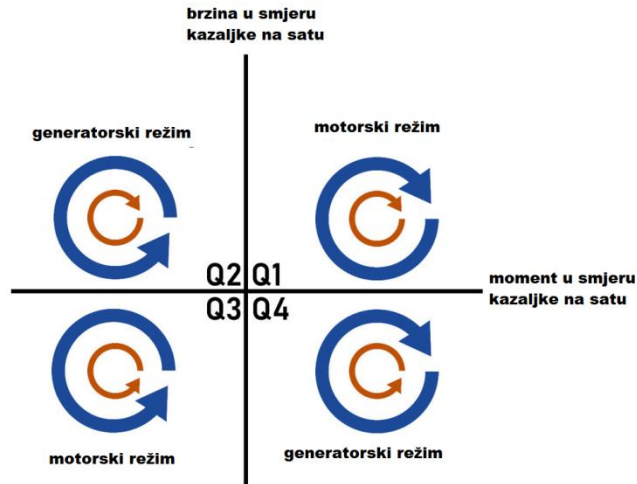
.

8. METODE KONTROLE RADA ELEKTROMOTORA

Neki tipovi DC i AC motora se mogu spajati direktno na mrežu i raditi će raditi će nazivnim brzinama ovisno o frekvenciji kod AC motora i struji kod DC motora. Elektronički sklopovi koji modificiraju ulazni napon motora osim što su nužni za rad nekih motora služe za mijenjanje njegove karakteristike rada tako da se prilagodi teretu da bi se ostvarila maksimalna učinkovitost motora. Kompleksnost i funkcije kontrolera uvelike određuju njihovu cijenu te s obzirom na to DC motori imaju prednost pošto su iz te perspektive početna ulaganja manja čime se kompeziira njihova manja učinkovitost u odnosu na AC motore. Slučajevi gdje se može najčešće stoga naći uporaba DC motora je tamo gdje već postoji DC mreža te je predviđena uporaba DC motora kao javni prijevoz i željeznica, brisači i drugi motori u autima te kod strojeva koji posjeduju baterije kao što su satovi i dronovi.

8.1 Metode regulacije rada DC motora

Najjednostavnija metoda kontrole režima DC motora je H most. Ova kontrola se ostvaruje pomoću 4 sklopke pri čemu su 2 spojene na izvor DC napajanja, a 2 na uzemljenje. Dvije sklopke mogu u isto vrijeme biti uključene čime se zatvara strujni krug motora i one određuju u kojem od 4 režima motor radi. Ovakav način kontrole motora omogućuje mu regenerativno kočenje te kontrolu brzine rada ako se može regulirati struja ili napon na uklopljenim sklopkama. Regenerativno kočenje se obično implementira kod većih i skupljih motora gdje se sklopke uklope tako da motor radi u drugom ili četvrtom kvadrantu ovisno u kojem se smjeru motor regenerativno koči što možemo vidjeti na slici 8.1. [31]. U tim kvadrantima smjerovi rotacije i momenta su suprotni čime se motor prebacuje u generatorski režim kada je napon koji je na motoru veći nego na izvoru napajanja pa struja teče ka izvoru napajanja [31, 32].



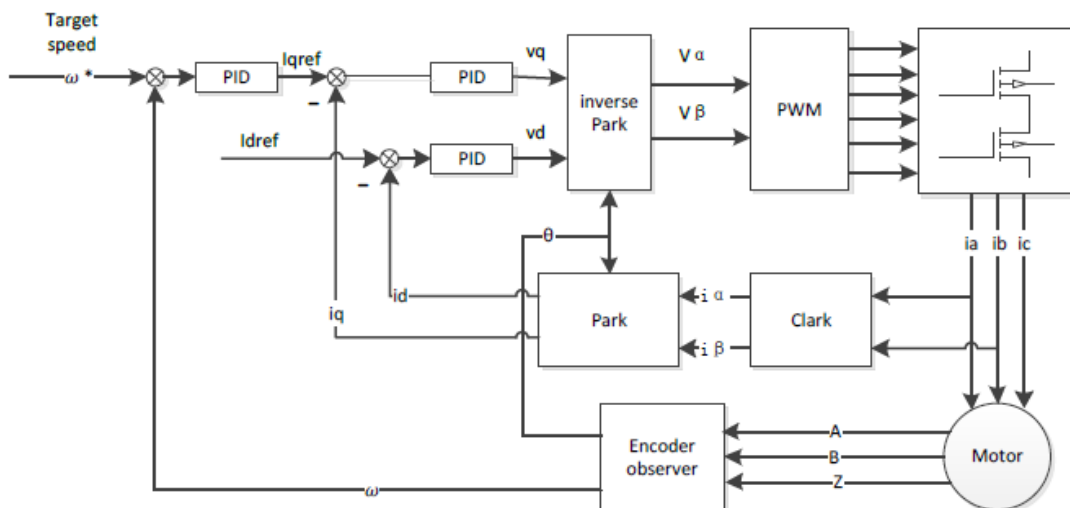
Slika 8.1. Kvadranti režima rada DC motora [31].

Najrašireniji način kontrole brzine motora preko regulacije napona je pulso širinska modulacija ili PWM. Ova regulacija napona se temelji na radu tranzistora koji naizmjenično šalju impulse vrijednosti nazivnog napona i nule tako da kada se to svede na srednju vrijednost pomoću kondenzatora imamo regulaciju napona što uzrokuje spuštanje karakteristike momenta DC motora čime se smanjuje njegova brzina pri opterećenju. Ova metoda je jednostavna za implementaciju, učinkovita i precizna te je zbog toga najraširenija metoda regulacije brzine DC motora. Preciznost regulacije i snaga motora koju je moguće regulirati ovisi o brzini okidanja tranzistora i maksimalnoj struji koju mogu propuštati [31, 32].

Manje popularna metoda za upravljanje brzinom motora je regulacijom struje statora i/ili rotora ovisno o tipu motora. Kod ove metode cilj je smanjiti struju motora čime se smanjuje njegova snaga što će usporiti motor pošto je brzina proporcionalna jakosti magnetskog polja. To se ostvaruje spajanjem promjenjivih otpornika u seriju s namotima statora i/ili rotora. Promjenom njihovih otpora mijenjamo struju kroz motor čime ograničavamo njegov maksimalni moment. Najveći problem ove metode je smanjenje učinkovitosti motora zbog povećanja toplinskih gubitaka koji nastaju zbog otpornika [31, 32].

Ranije je bio obrađen tip DC motora zvan servo motor, taj motor nije poseban sam po sebi već je specifičan što je konstrukcijski pogodan za servo kontroler. Ovaj kontroler nam služi za ostvarenje rada motora u zatvorenoj petlji gdje on sam regulira svoju brzinu, moment i rotaciju u situacijama kao što su promjenjivo opterećenje osovine rotora. Servo kontrola se može implementirati na bilo

koji tip motora, ali najpoznatija je izvedba DC motora bez četkica pošto su DC motori lagani za kontrolirati u pogledu smjera rotacije, brzine i položaja rotora. Servo kontrola funkcionira na principu povratne veze gdje se rade računa greška rada motora na temelju zadanih parametara i očitanih vrijednosti motora dobivenih pomoću senzora kao što su Hall-ovi senzori koji se koriste kod DC motora [31, 32]. Dobivena greška se pojačalom povećava tako da bi odziv bio dovoljno jak da može regulirati rad motora. Kao metoda za eliminaciju izračunate greške rada motora kod servo DC i AC motora koristi se PID metoda. PID metoda obuhvaća tri načina na koji se izračunata greška pretvara u signal za kontrolu motora. U kratici PID regulatora P znači proporcionalno, I znači integralno i D znači derivacijski. Svaki od ova 3 načina se može koristiti zasebno, ali se mogu koristiti dva ili sva tri zajedno čime se dobiva maksimalna preciznost rada i regulacije greške [31, 32]. P regulator koristi proporcionalni *gain* to jest dobivena greška se množi konstantom kojom se regulira rotacija, ova metoda nije dobra za uporabu sama pošto postoji mogućnost da ako je *gain* prevelik motor neće moći eliminirati grešku već će ta greška trajno oscilirati. I regulator zbraja greške tijekom vremena i prestaje s regulacijom kada greška postane nula. Ovaj način regulacije dobar u paru s P regulatorom pošto će on eliminirati njegove trajne oscilacije grešaka. D regulatori utječu na rad motora na temelju brzine promjene greške gdje će velika greška uzrokovati malu i sporu regulaciju dok će mala i nagla greška uzrokovati brzu reakciju regulatora [56]. Na slici 8.2. [56] prikazana je shema kontrole brzine servo motora i PID metode regulacije greške.



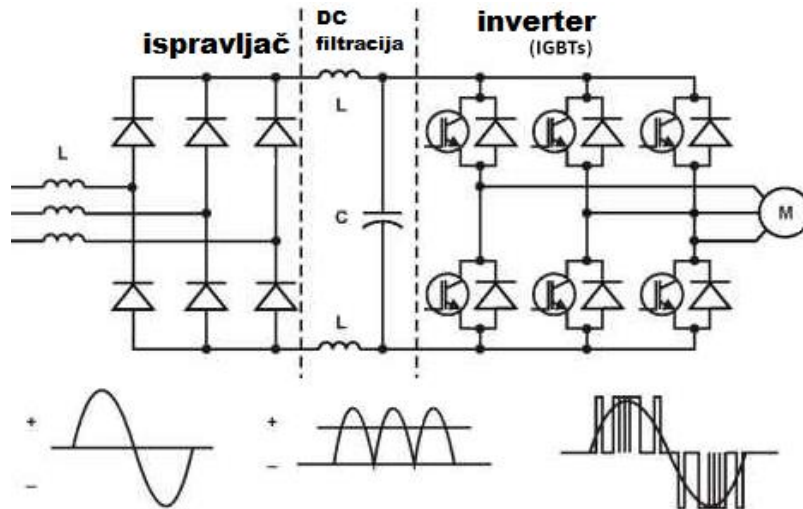
Slika 8.2. Shema kontrole brzine i regulacije greške PID metodom servo motora [56].

Hall-ovi senzori osim što se koriste kod servo motora su ključni za rad DC koračnih motora. Nužni su zbog toga što da bi se odredilo koju fazu statora treba uzбудiti treba znati trenutnu poziciju polova rotora. Na osnovu toga određuje se faza i smjer struje kroz nju tako da se ostvari pravilna rotacija rotora. Hall-ov sensor je digitalne prirode i ima samo dvije vrijednosti 0 i 1, ako je sjeverni pol na određenom senzoru na njemu će biti vrijednost 1 u suprotnom 0. Za pouzdan rad motora potrebno je imati najmanje 3 Hall senzora, a njihov broj ovisi o broju polova motora. Pri radu motora svaka faza ima 3 moguća naponska stanja koja se konstantno izmjenjuju, a to su pozitivni napon, negativni napon i bez napona. Ovakva konstrukcija motora je naročito pogodna za korištenje s PWM modulacijom i PID regulatorom [32, 56].

8.2. Metode regulacije rada AC motora

Frekvencijski pretvarači kod AC motora imaju ključnu ulogu u regulaciji svih aspekata rada motora. Sinkrona brzina ovih motora vezana je za frekvenciju napajanja, iz toga razloga promjenom frekvencije mijenjamo izgled momentne karakteristike tako da ga prilagodimo teretu nebi li postigli maksimalnu učinkovitost i moment potreban za svladavanje tereta [58, 34].

Frekvencijski pretvarač je elektronički sklop koji se sastoji od tri glavna dijela, a to su po redu: punovalni ispravljač koji se sastoji od dioda i služi da doljnu poluperiodu prebaci gore da bih dobili istosmjerni napon, zatim slijedi fitiranje gdje se koristi kondenzator velikog kapaciteta koji služi za pretvaranje punovalno ispravljenog sinusnog napona u ispeglani istosmjerni tako što se naizmjenično puni i prazni te time daje ravni istosmjerni napon zadnjem dijelu koji se zove inverter. Inverter je sklop koji se sastoji od električnih sklopki u koje spadaju tiristori, bipolarni tranzistori, MOSFET-i i IGBT-ovi koji služe za postizanje aproksimiranog izmjeničnog napona čiju frekvenciju i amplitudu kontroliramo frekvencijom rada invertera [58, 34]. Na slici 8.3. [34] vidimo shemu električnih elemenata najčiešće korištenog frekvencijskog pretvarača sa PWM metodom generiranja izmjeničnog signala.

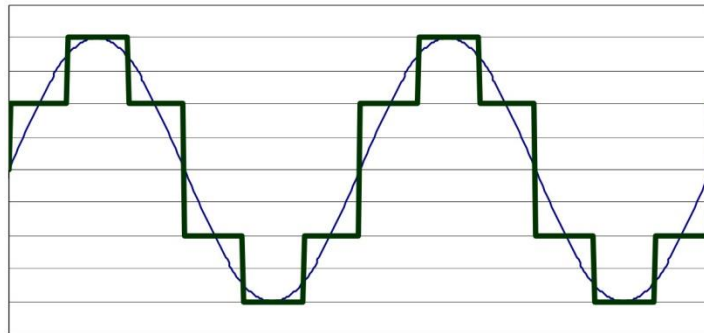


Slika 8.3. Električna shema PWM frekvencijskog pretvarača [34].

Frekvencijski pretvarači imaju značajan problem viših harmonika koji nastaju u procesu filtriranja te odlaze u mrežu gdje stvaraju gubitke zagrijavanja komponenti te veću potrošnju električne energije. To se može smanjiti na više načina, a najpopularniji su ugradnja induktiviteta na dio zadužen za filtriranje napona i prije ulaznog punovalnog ispravljača. Skuplja i učinkovitija metoda je ugradnja kompezatora u pogonu s frekvencijskim pretvaračem kao što je shunt kompezator koji mora biti dimenzioniran posebno za svako mjesto ovisno o broju frekvencijskih pretvarača i snazi pogona. Najskuplja i najbolja opcija je izolacijski ili autotransformator u kombinaciji s dvanaestpulsnim ili osamnaestopulsnim ispravljačem umjesto standardnog šesteropulsnog ispravljača. Zbog svoje cijene ovo se rješenje pravi samo za pogone velikih snaga. Uz ove navedene pasivne načine smanjenja harmonika imamo i aktivne koji su skupi, ali jako učinkoviti i prave se za samo za jako velike snage. Aktivni harmonički pretvarač je elektronički sklop koji je konstrukcijom sličan inverteru frekvencijskog pretvarača koji više harmonike pretvara u DC napon koji se iskoristiti za dobivanje čistog sinusnog napona te pruža uz eliminaciju harmonika i mogućnost proizvodnje električne energije [58, 34].

Kod AC motora je također moguća regulacija struje statora preko promjenjivih otpornika i napona preko transformatora promjenjivog omjera, ali te metode stvaraju dodatne gubitke i komplikacije te se gotovo nikada ne koriste. Postoje dvije izvedbe pretvaranja DC u AC napona u frekvencijskim pretvaračima, a to su [58, 34]:

Inverzni promjenjivi napon – ova metoda koristi DC napon promjenjivog iznosa kojeg u koracima povećava i smanjuje čime se aproksimira izmjenični napon. Najčešće su izvedbe ove metode gdje se sinusoidni napon aproksimira u šest koraka što je i minimum s kojim je to moguće i takav slučaj imamo prikazan na slici 8.4. [33], ali postoje izvedbe invertera koje to rade u više koraka. Frekvencijski pretvarač koji koristi ovu metodu razlikuje se od onoga koji koristi PWM metodu po tome što umjesto normalnih dioda za ispravljanje AC napona koristi silikonski kontrolirane diode pomoću kojih je moguća kontrola amplitude ispravljenog DC napona nakon čega slijede kondenzator i induktivitet za peglanje dobivenog DC napona. Loše strane ovoga načina dobivanja sinusoidalnoga napona su titranje momenta pri niskim okretajima i veće zagrijavanje motora zbog nesavršenog apriksimiranja sinusoide [33].

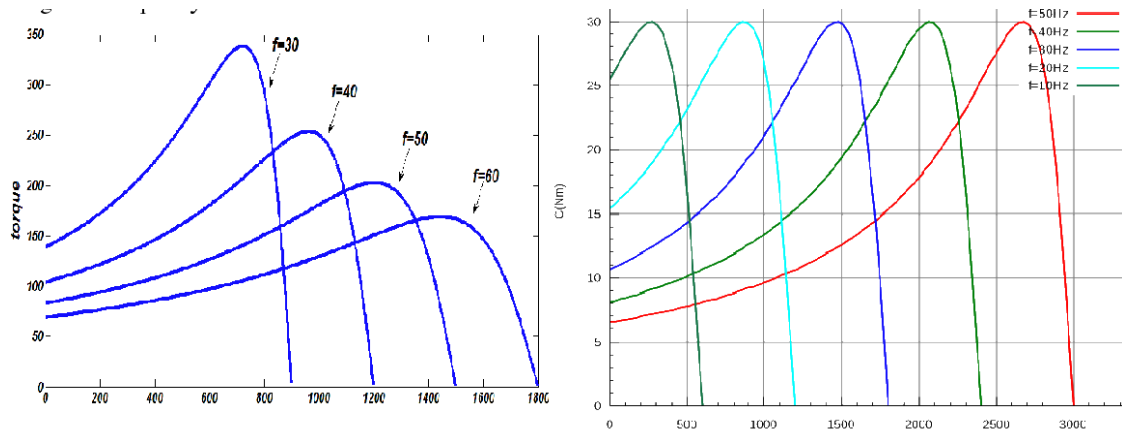


Slika 8.4. Sinusoidni signal aproksimiran šest-koračnom metodom inverznog promjenjivog napona [33].

Pulsno širinska modulacija (slika 8.3.) – ova metoda je objašnjena kod DC motora te je i kod AC motora najzastupljenija za regulaciju napona i frekvencije motora. Sukladno traženom obliku napona simulira se oblik sinusoide što zahtjeva električne sklopke s velikom frekvencijom okidanja čime se i postiže bolja aproksimacija sinusoide u odnosu na metodu inverznog promjenjivog napona i manji titraji momenta kao i zagrijavanja motora [34].

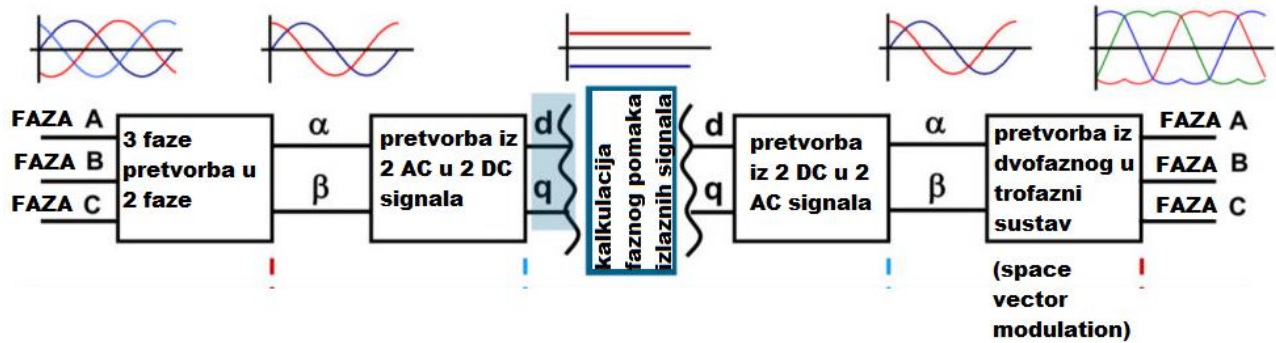
U pogledu metode kontrole AC motora preko frekvencijskog pretvarača također imamo dvije varijante. Prva jednostavnija varijanta je skalarna metoda prikazana na slici 8.3. [34], kod ove metode motorom se upravlja tako da jakost magnetskog polja bude ista čime se dobiva konstantan moment pri ubrzanju motora. To se ostvaruje tako da se omjer napona i frekvencije motora drži uvijek jednakim. Smanjenjem frekvencije povećavamo moment motora što treba uzeti u obzir kada biramo snagu motora za pogon. Zbog relativno male preciznosti u odnosu na drugu vektorsku

metodu ovaj tip kontrole nije pogodan za pogone gdje se traži visoka preciznost, ali pozitivna strana ovakve kontrole je ta što u otvorenoj petlji jedan frekvencijski pretvarač može pogoniti više motora zajedno što može napraviti velike uštede u postrojenjima [34, 57]. Na slici 8.5. [57] imamo prikazane dvije momentne karakteristike asinkronog motora, lijeva karakteristika je s konstantnim naponom i promjenom frekvencije dok je desna sa konstantnim omjerom napona i frekvencije za razne frekvencije.



Slika 8.5. Momentne karakteristike asinkronog motora: sa konstantnim naponom i sa konstantnim omjerom napona i frekvencije [57].

Druga metoda kontrole je vektorska kontrola magnetskoga polja zvana još metoda kontrole bez senzora. Ova metoda je posebna po tome što kontrolira fazni kut između napona i struje statora čime se može odvojeno kontrolirati brzina i moment motora, ali zahtjeva puno kompleksniju konstrukciju od skalarne kontrole. Kod ove metode trofazni napon se prvo transformira u dvofazni izmjenični, a zatim u dva DC ispeglana napona. Na temelju zadanih parametara i trenutnog faznog pomaka struje statora od DC napona aproksimira se dva izmjenična napona čiji fazni pomaci određuju fazni pomak struje rotora, a s njime brzinu i moment motora. Na kraju se dobiveni dvofazni napon pretvara u trofazni s dvostrukim pozitivnim i negativnim amplitudama. Prikaz redosljeda postupaka rada vektorske kontrole momenta motora prikazan je na slici 8.6. [34].



Slika 8.6. Faze rada frekvencijskog pretvarača sa vektorskom kontrolom momenta [34].

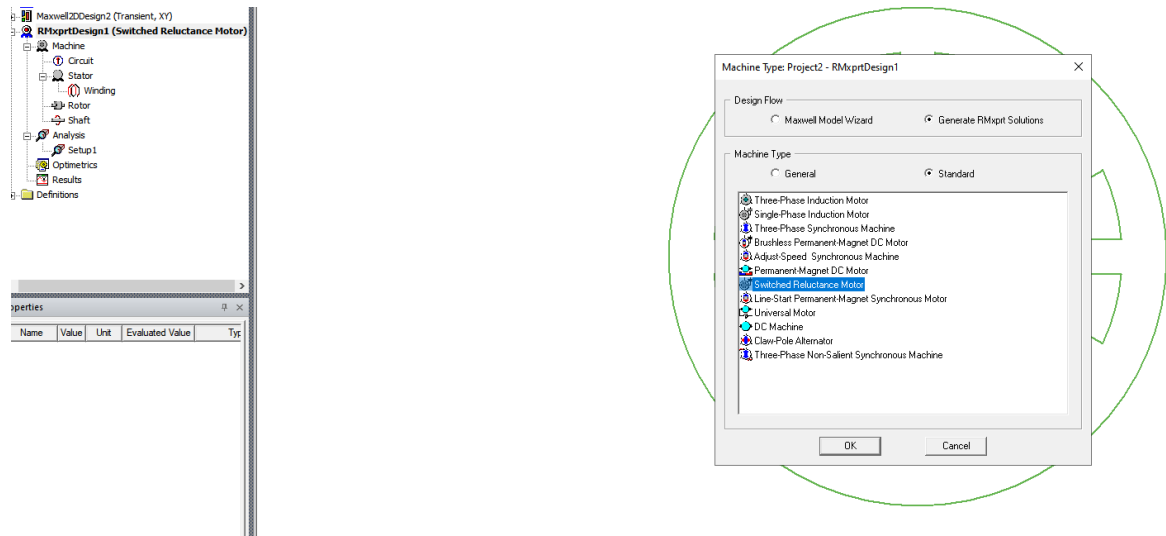
Statorska struja kod AC motora se dijeli na dva dijela, a to su magnetizacijska struja i momentna struja. Te struje se zasebno reguliraju svaka sa svojim regulatorom, a to je najčešće PI regulator [34, 58]. To omogućuje da se konstantno kontrolira fazni kut struje koji određuje moment motora tako da se momentna struja drži što većom dok se magnetizacijska struja nastoji smanjiti na minimalnu dopustivu. Kao i kod skalarne metode imamo izvedbu s otvorenom i zatvorenom petljom. Kod zatvorene petlje sve se regulacije napona rade s obzirom na poziciju osovine i izmjerene vrijednosti struja statora dok kod otvorene petlje koristimo vrijednosti napona i struje s frekvencijskog pretvarača te matematički model motora koji bi trebao biti što precizniji da bih regulacija bila što preciznija pošto se vrijednosti faznog pomaka i amplitude struje statora ne mjere već se računaju s obzirom na model i zadane parametre za rad motora. Vektorska metoda je najsloženija i najskuplja, ali ima najveću preciznost podešavanja brzine rotacije motora kao i veći potezni moment te moment pri niskim okretajima u odnosu na skalarnu kontrolu [34, 58].

9. SIMULACIJE RADA ELEKTROMOTORA U PROGRAMU ANSYS ELECTRONICS

Ansyes electronics je program koji služi za projektiranje i simuliranje rada komponenti i strojeva u elektrotehnici. On sadrži podprograme koji su zaduženi svaki za svoje područje primjene kao što su Ansys Q3D, HFSS, EMIT i ostali. Za simulacije koje su rađene u ovome radu se koristio Ansys Rmxprt u kombinaciji s Maxwell 2d odnosno 3d. Motori čiji se zalet i rad simulirao su konstruirani na temelju stvarnih motora iz kataloga proizvođača motora. Konstruiranje motora se obavlja u podprogramu Rmxprt koji služi za dobivanje 2d nacрта konstrukcije unutrašnjosti motora prema stvarnim mjerama motora kojega smo odabrali te uz to i radne karakteristike konstruiranog motora na temelju nazivnih vrijednosti koje smo zadali za njega. Ako smo sve vrijednosti dobro zadali i program nije našao grešku možemo se prebaciti u Maxwell 2d gdje se određuju parametri simulacije rada motora na temelju čega možemo grafički vidjeti kako se u vremenu mijenjaju promatrane vrijednosti kao što su struja, magnetski tok, energija, gustoća struje, magnetski vektori i slično. Ove simulacije su jako korisne pošto se iz njih može vidjeti koji su dijelovi motora najopterećeniji kada je on u pogonu iz čega se može pretpostaviti gdje imamo najviše naprezanja i zagrijavanja odnosno gubitaka u motoru. Maxwell 3d nam nudi iste opcije simulacije rada kao i Maxwell 2d, ali ovdje imamo prikazan cijeli 3d model motora na temelju mjera zadanih u Rmxprt-u. Rezultati simulacija su isti kao u Maxwell-u 2d, ali prikaz animacije rada motora je u 3 dimenzije te možemo bolje vidjeti tokove energije u motoru.

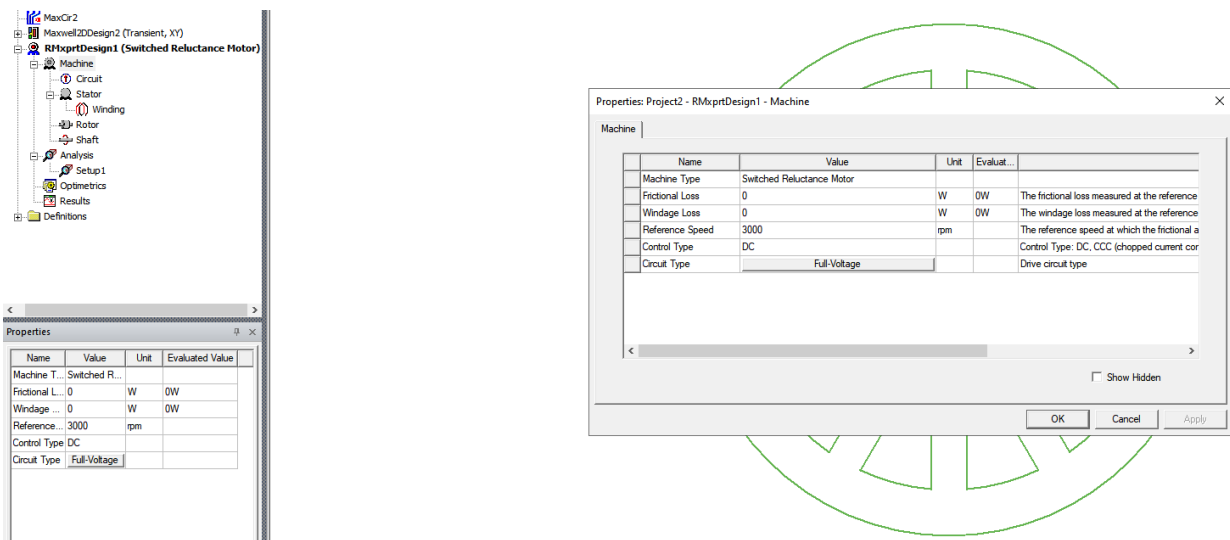
9.1. DC reluktantni motor

Prva vrsta motora koji je simuliran je DC reluktantni motor bez četkica proizvođača Kehui model KSM1-280M-15-H00. Na početku izaberemo koju vrstu i podvrstu motora konstruiramo u našem slučaju je to motor DC promjenjive reluktancije što je prikazano na slici 9.1.



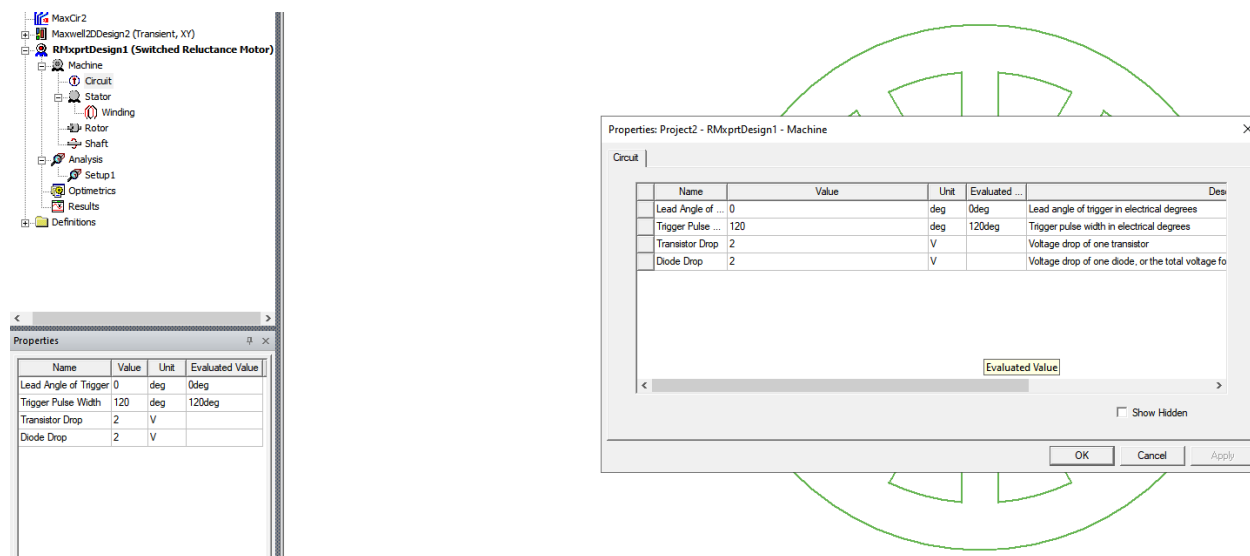
Slika 9.1. Odabir vrste motora za simulaciju.

Zatim određujemo gubitke trenja i zagrijavanja namota pri određenoj brzini i vrstu napajanja što je vidljivo na slici 9.2. ti gubici su sporedni za ovu simulaciju zato što ne utječu na radne karakteristike motora već samo na učinkovitost pa nisu nužni za parametrirati.



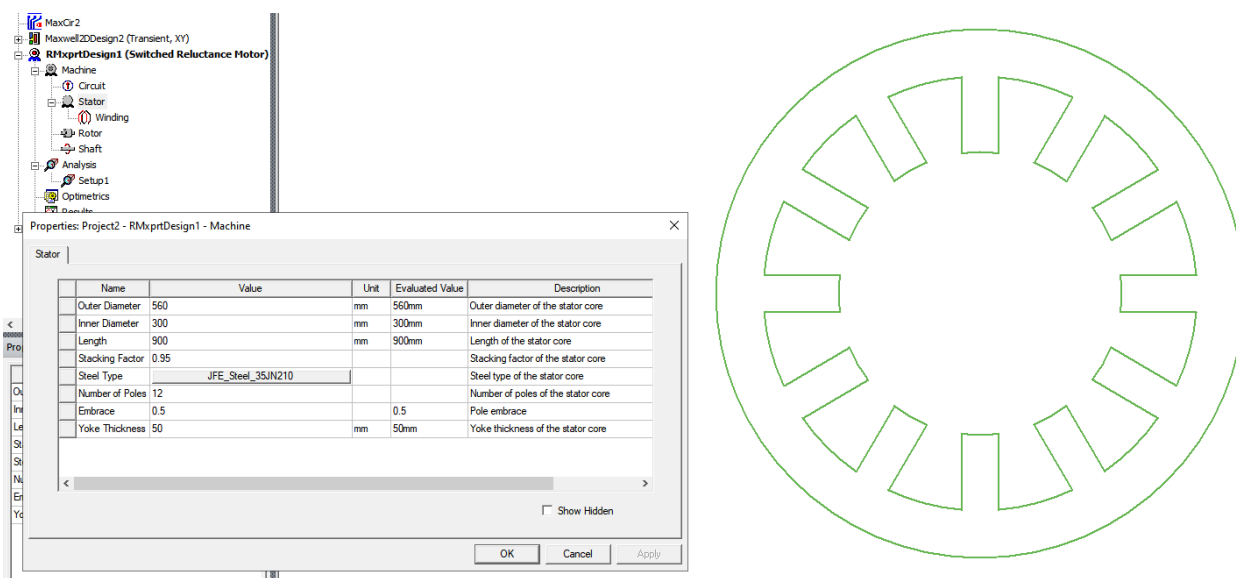
Slika 9.2. Određivanje gubitaka i vrste napajanja motora.

Idući korak je određivanje parametara vezanih za napajanje u što spada fazni pomak impulsa napajanja mjereno u električnim stupnjevima te padovi napona na tranzistorima i diodama upravljačkog kruga što je vidljivo na slici 9.3.



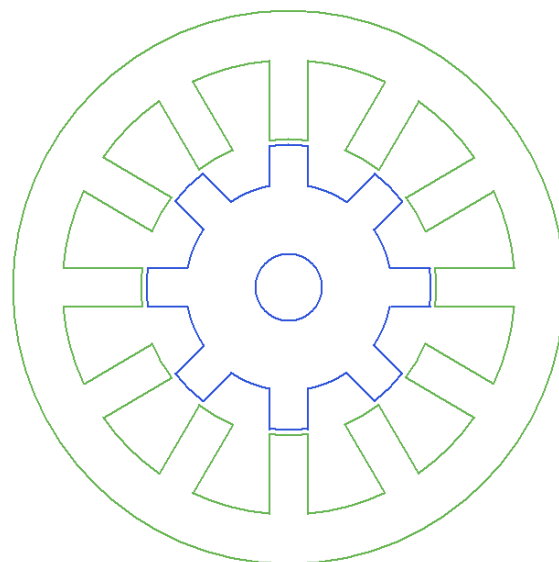
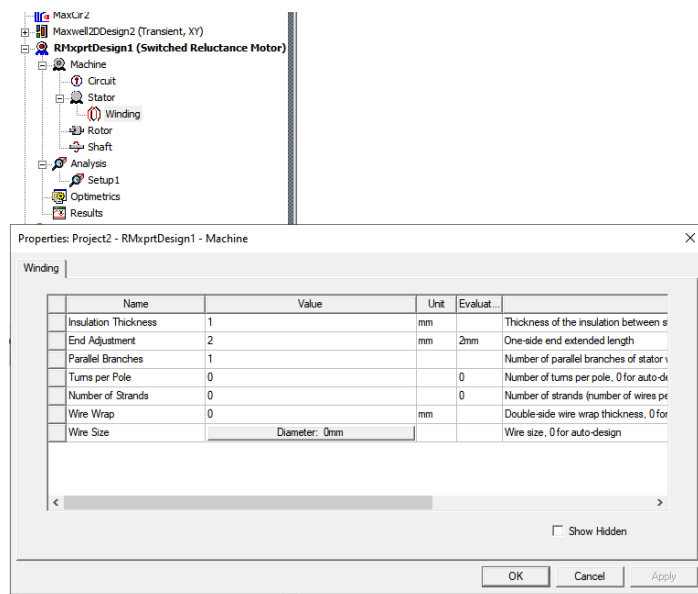
Slika 9.3. Određivanje parametara upravljačkog kruga.

Nakon ovoga krećemo na određivanja dimenzija samih dijelova motora krenuvši od statora gdje određujemo parametre kao što su unutarnji i vanjski promjer statora te statorska duljina, broj namota statora i ostalo vidljivo na slici 9.4.



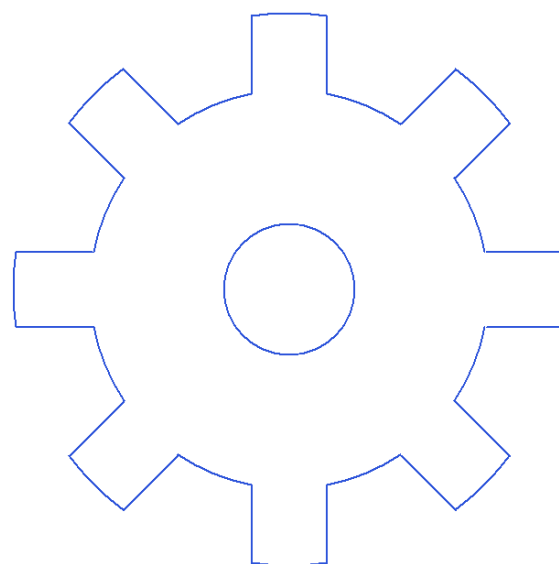
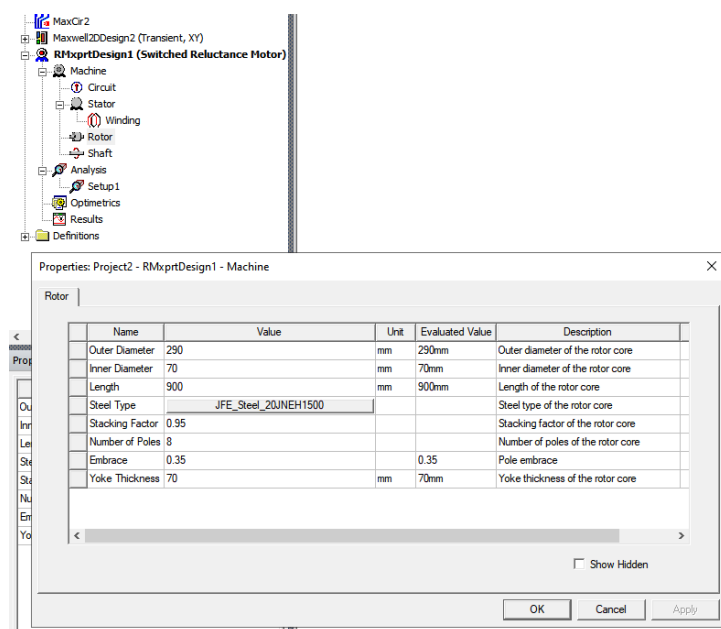
Slika 9.4. Određivanje dimenzija statora.

Kada je određen izgled jezgre statora određujemo parametre i karakteristike namota na statorima kao što su debljina izolacije, broj zavoja po namotu, broj niti po vodiču, debljina vodiča i ostalo vidljivo na slici 9.5.



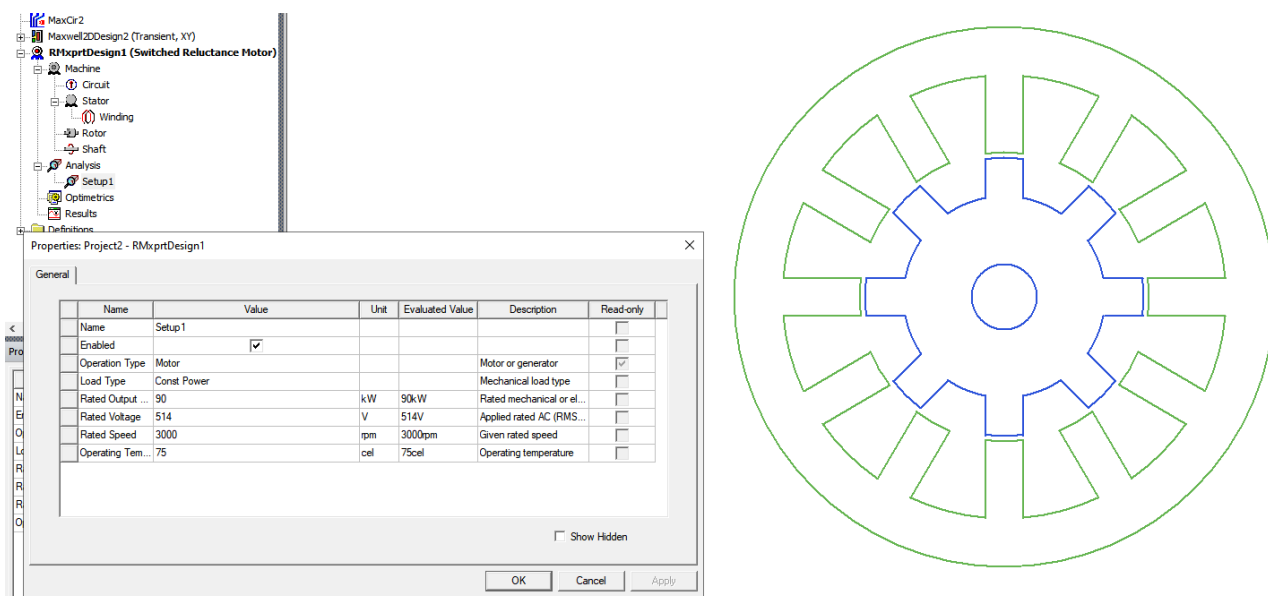
Slika 9.5. Određivanje parametara namota statora.

Nakon ovoga slijedi određivanje parametara rotora motora kao što su vanjski promjer, debljina osovine, debljina pola rotora, broj polova i ostalo vidljivo na slici 9.6.



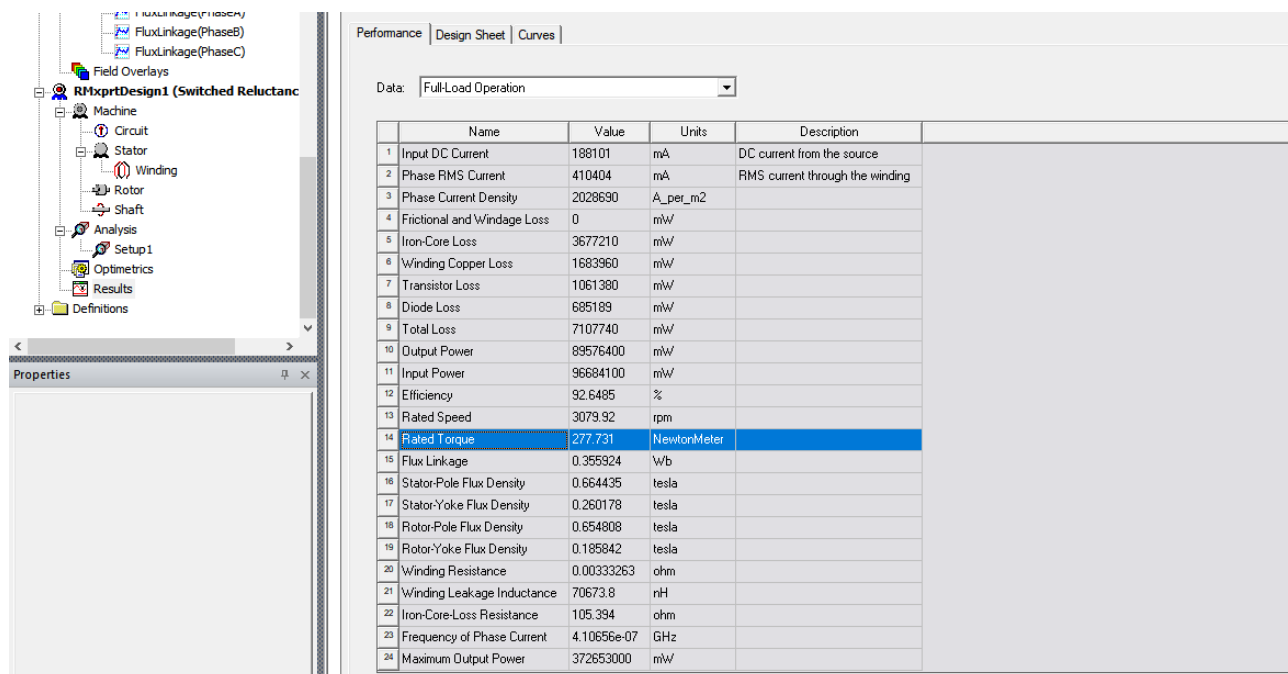
Slika 9.6. Određivanje parametara rotora motora.

Kada smo odredili sve potrebne fizičke dimenzije motora zadajemo njegove nazivne podatke kao što su način rada, nazivna snaga, nazivni napon i nazivna brzina i ostalo što je vidljivo na slici 9.7.

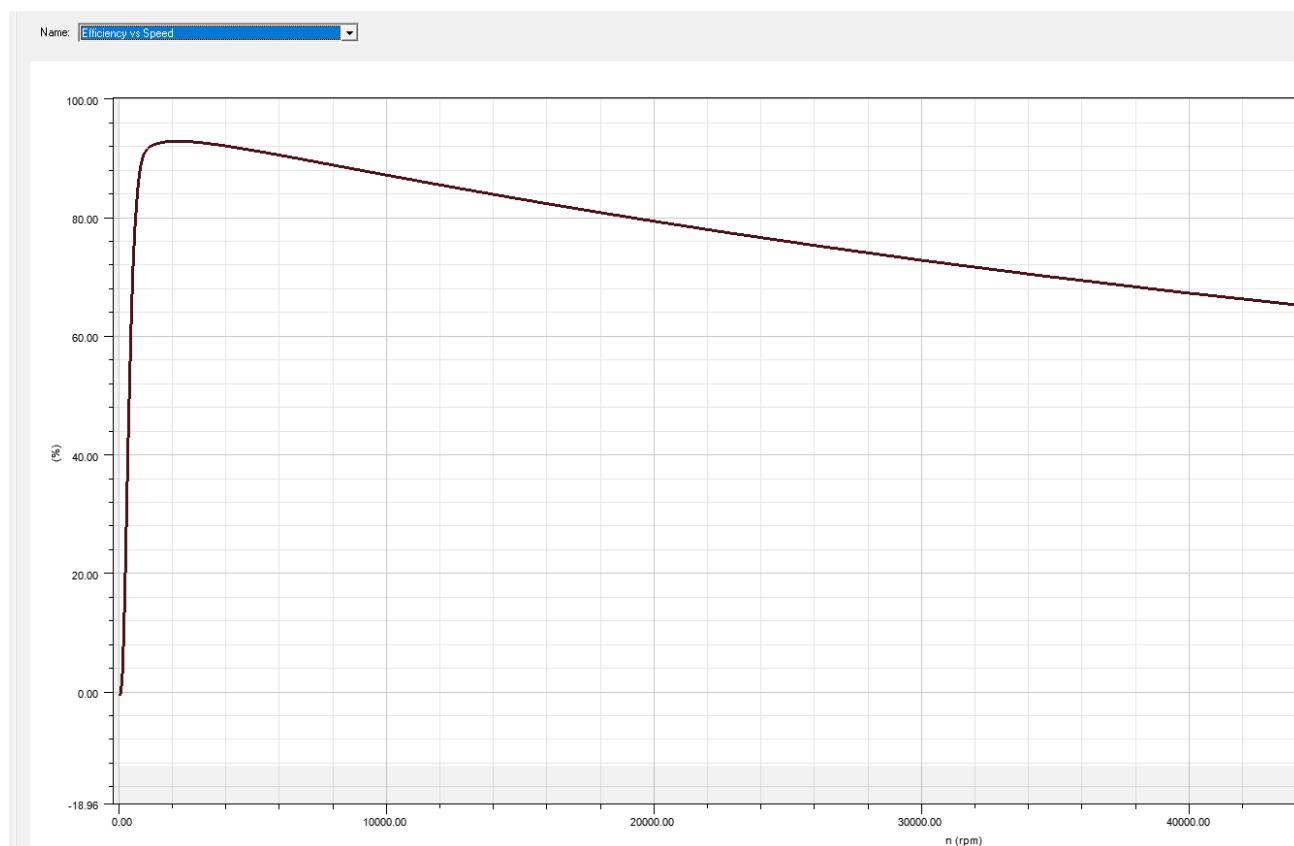


Slika 9.7. Nazivni podaci motora.

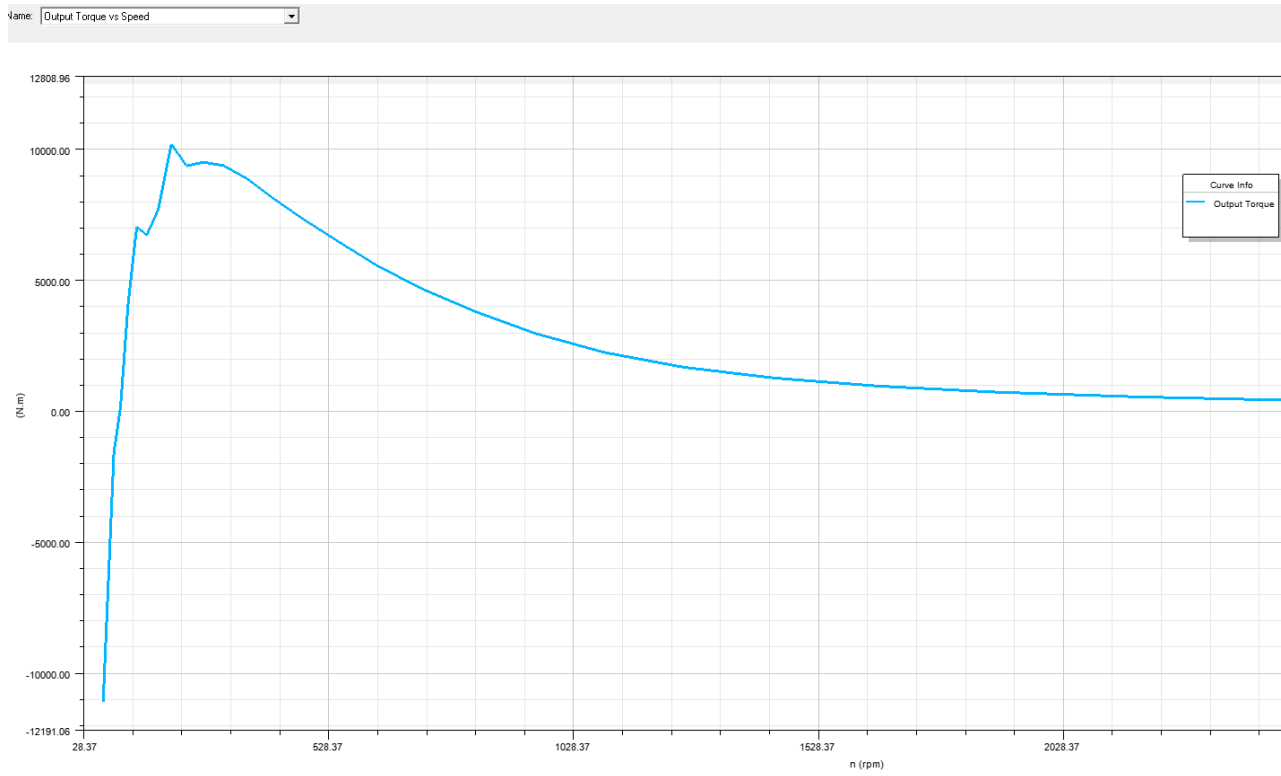
Nakon što smo sve ovo zadali pokrenemo *validate* da program provjeri imamo li grešaka u dimenzioniranju. Ako je sve u redu pokrećemo analizu motora gdje program računa i pravi razne karakteristike vezane za rad konstruiranoga motora. Nakon završene analize dobivamo izvještaj rada motora gdje možemo vidjeti njegove nazivne podatke dobivene na temelju zadanih parametara. Na slici 9.8. prikazani nazivni parametri motora od kojih je za simulaciju nama najvažniji nazivni moment pošto radimo simulacije zaleta motora. Statičke karakteristike koje su dobivene analizom predstavljaju karakteristike motora u idealnim uvjetima rada i prikazani su na slikama 9.9., 9.10. i 9.11.



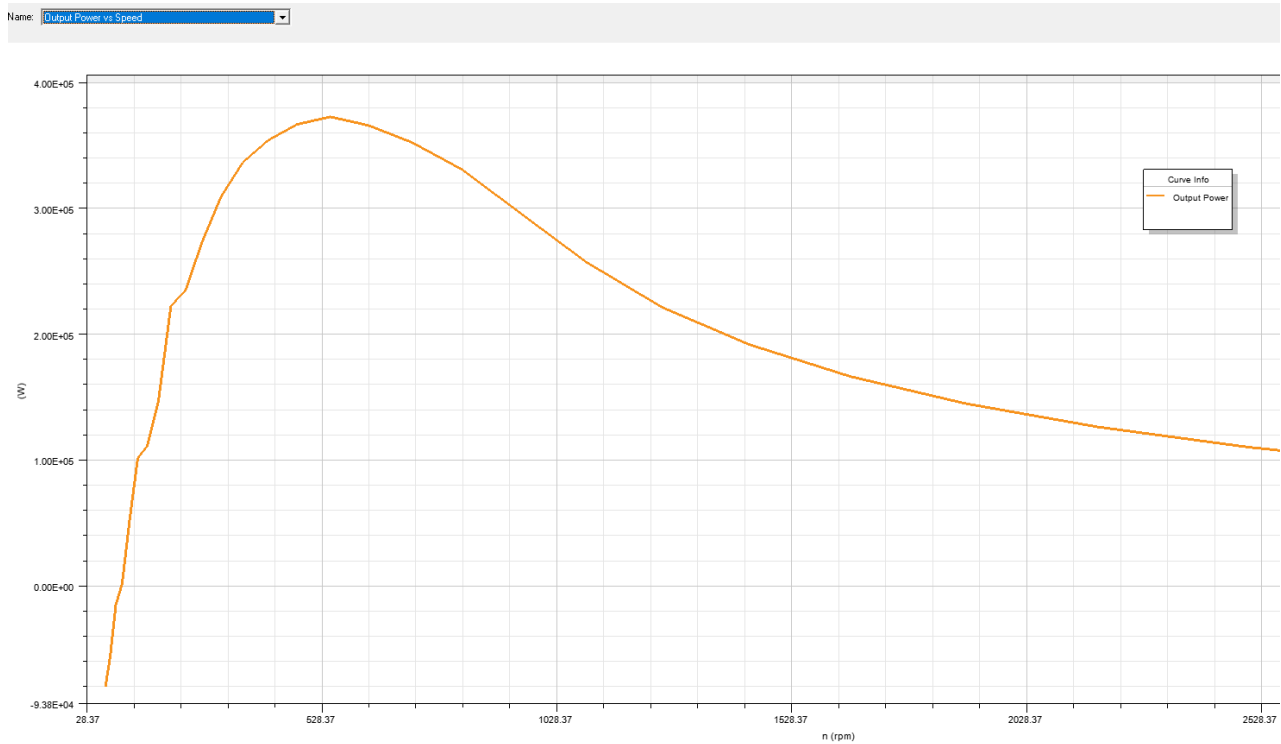
Slika 9.8. Prikaz nekih od varijabli motora pri nazivnom broju okretaja.



Slika 9.9. Prikaz učinkovitost-brzina statičke karakteristike motora.

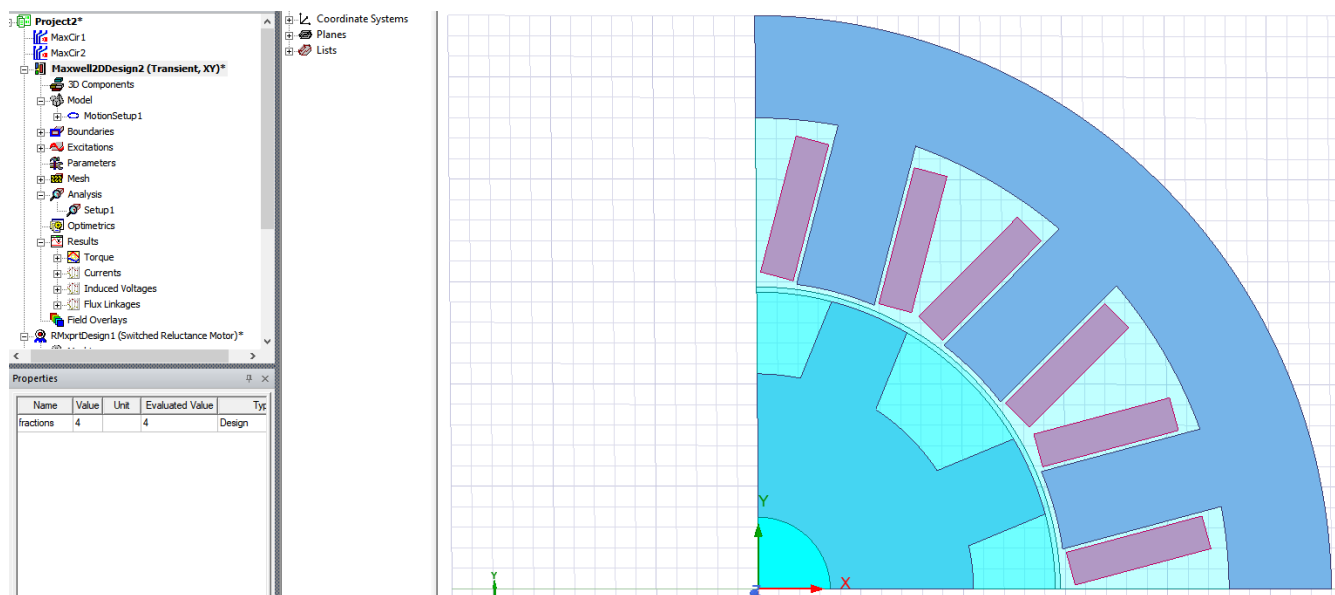


Slika 9.10. Prikaz momentne karakteristike motora s obzirom na nazivne vrijednosti.



Slika 9.11. Prikaz karakteristike izlazne snage motora.

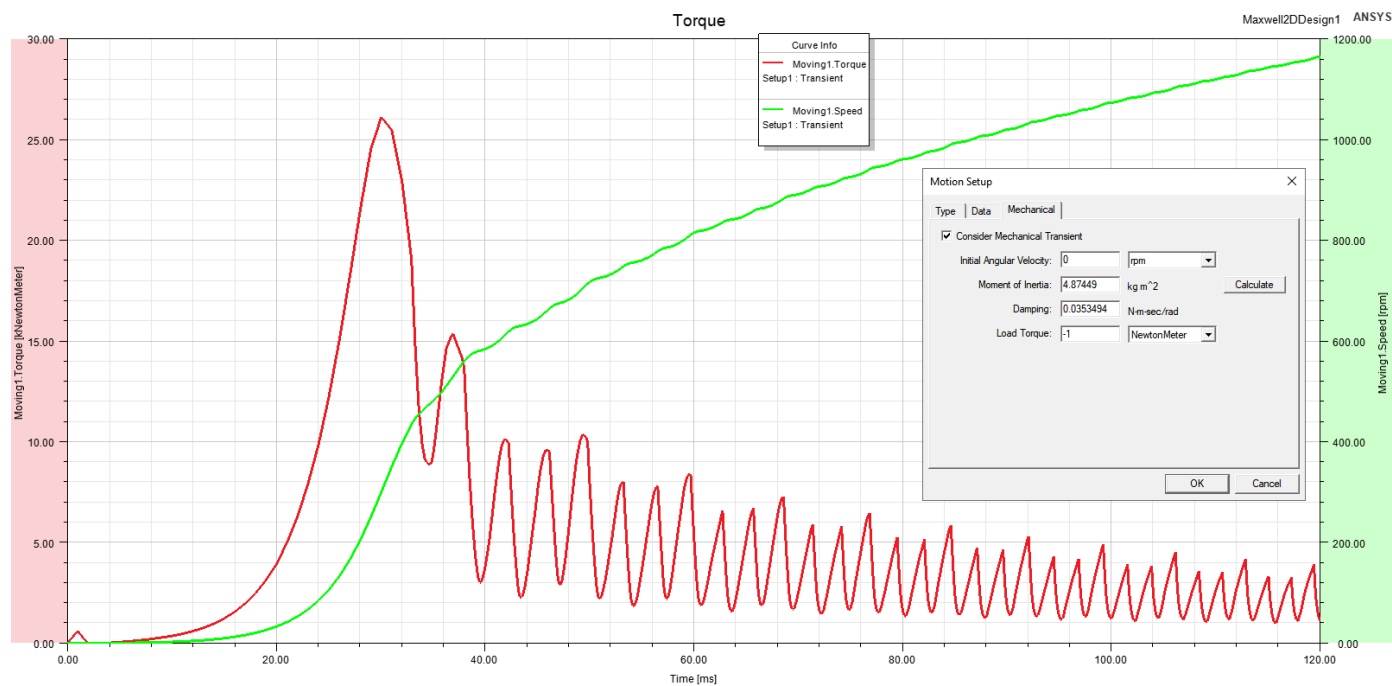
Nakon ovoga model motora prebacujemo u Maxwell 2d gdje možemo simulirati rad motora i njegov zalet. Na slici 9.12. vidimo izgled motora uvezenog iz Rmxprta u Maxwell 2d.



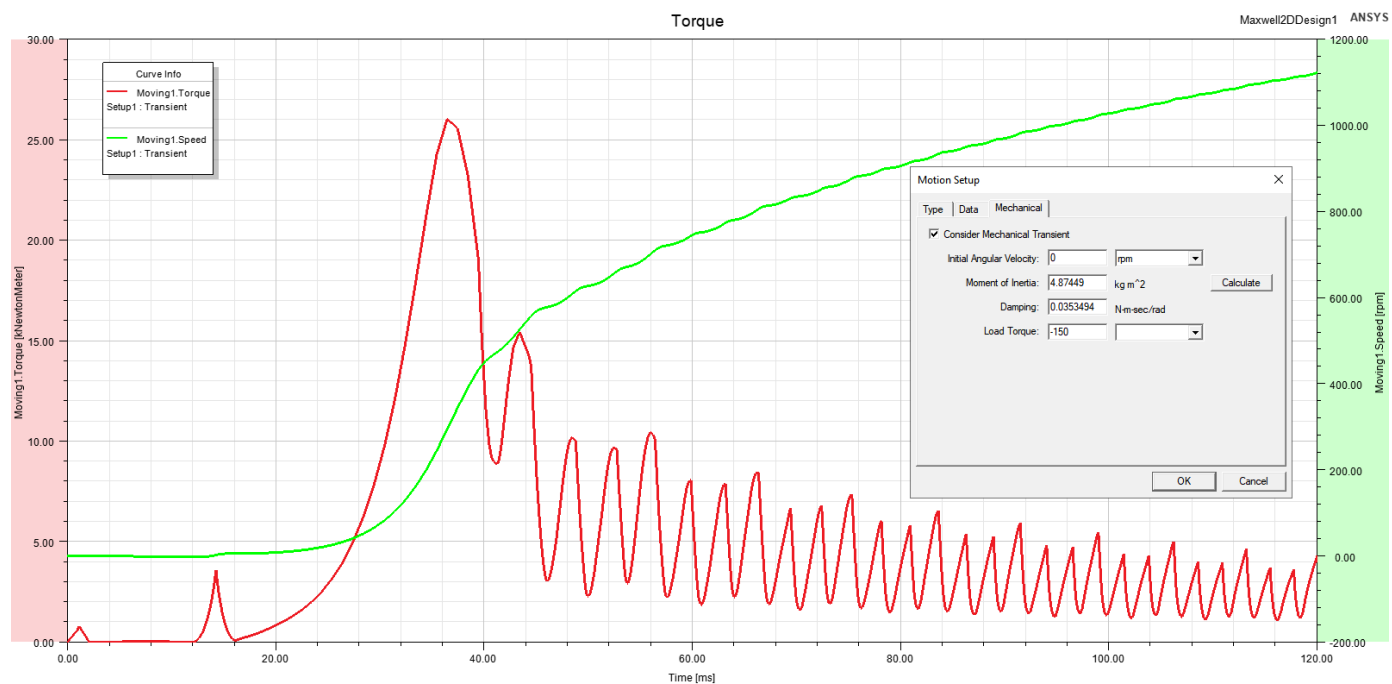
Slika 9.12. Prikaz modela motora u Maxwell 2d.

Sada moramo namjestiti trajanje simulacije i vremenski korak koji određuje brzinu simulacije te zadati brzinu od koje će motor krenuti te njegovo opterećenje. U našem slučaju motor će mo zalijetati od 0 okretaja u minuti s opterećenjima od -1, -150, -300, -4500 i -6500 Nm. Dobiveni grafovi tih zaleta prikazani su na slikama 9.13. – 9.17. Na tim slikama vidimo kako se povećanjem opterećenja motora krajnja brzina motora na kraju simulacije smanjuje. To također možemo povezati i sa statičkom karakteristikom momenta motora prikazanoj na slici 9.10. pošto imaju isti oblik. Budući da moment motora naglo raste do 250 okr/min te nakon toga relativno brzo opada to će se očitovati i na grafovima zaleta motora na način da će motor naglo ubrzati do određene brzine te nakon toga usporavati ubrzanje i na kraju doći u konstantnu brzinu koja je određena veličinom tereta motora.

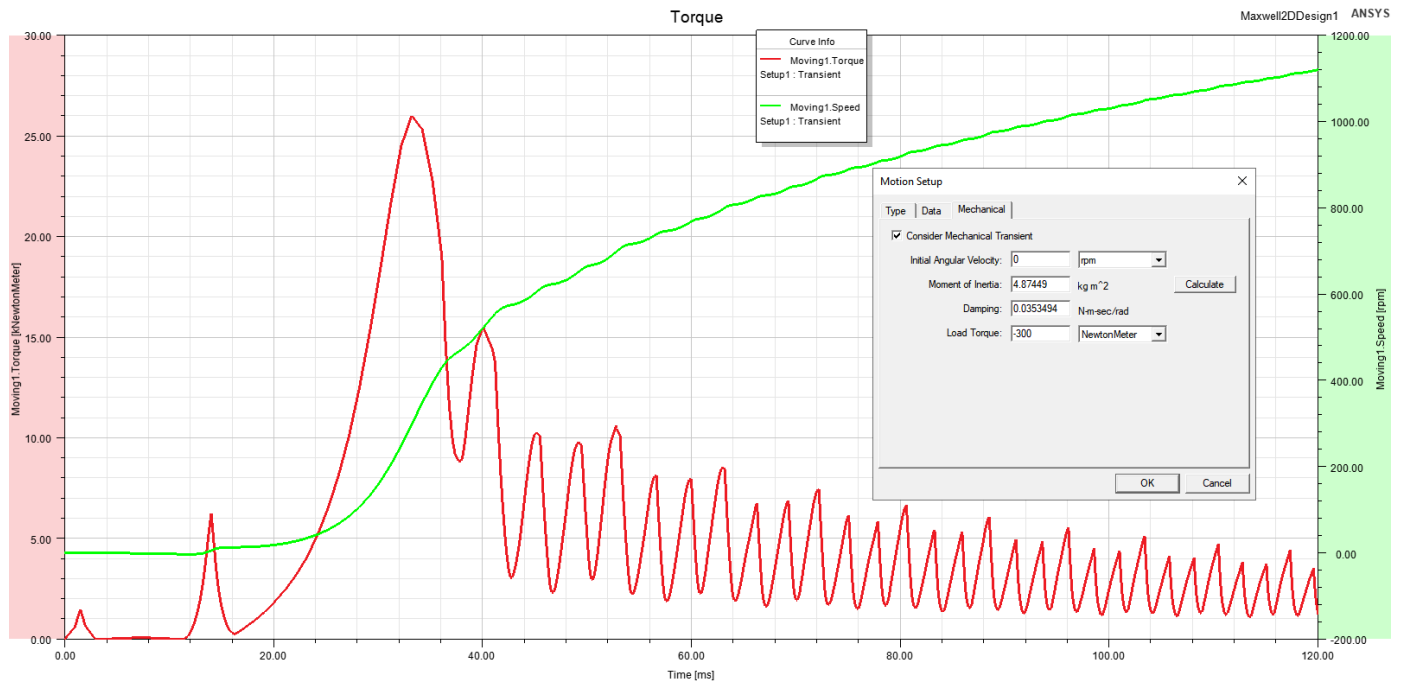
Kada smo zadali sve varijable potrebne za simulaciju pokrećemo analizu isto kao i kod Rmxprt programa i dobivamo sve grafove za tu simulaciju koji prikazaju što se događa s vrijednostima motora u vremenskom prozoru pri zadanim uvjetima. Mi u ovome slučaju promatramo promjenu momenta i brzine motora.



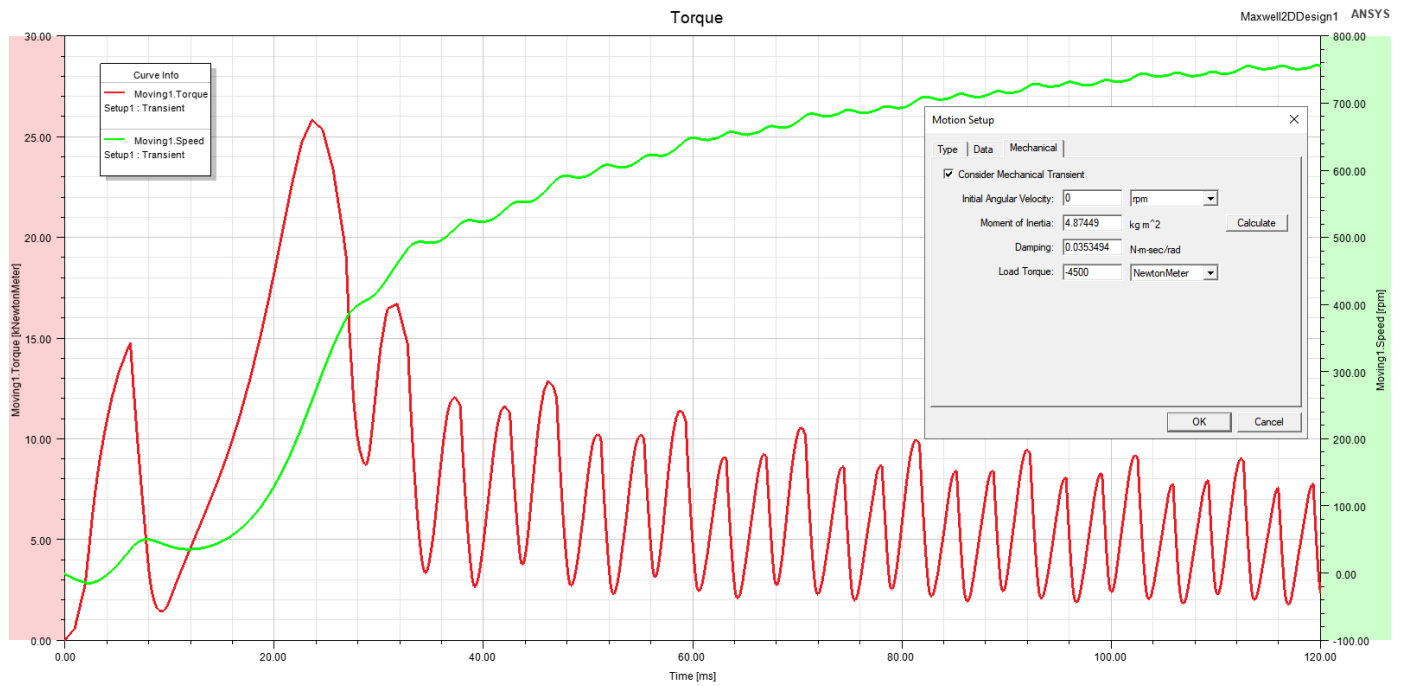
Slika 9.13. Zalet motora od 0 okr/min s teretom od -1 Nm.



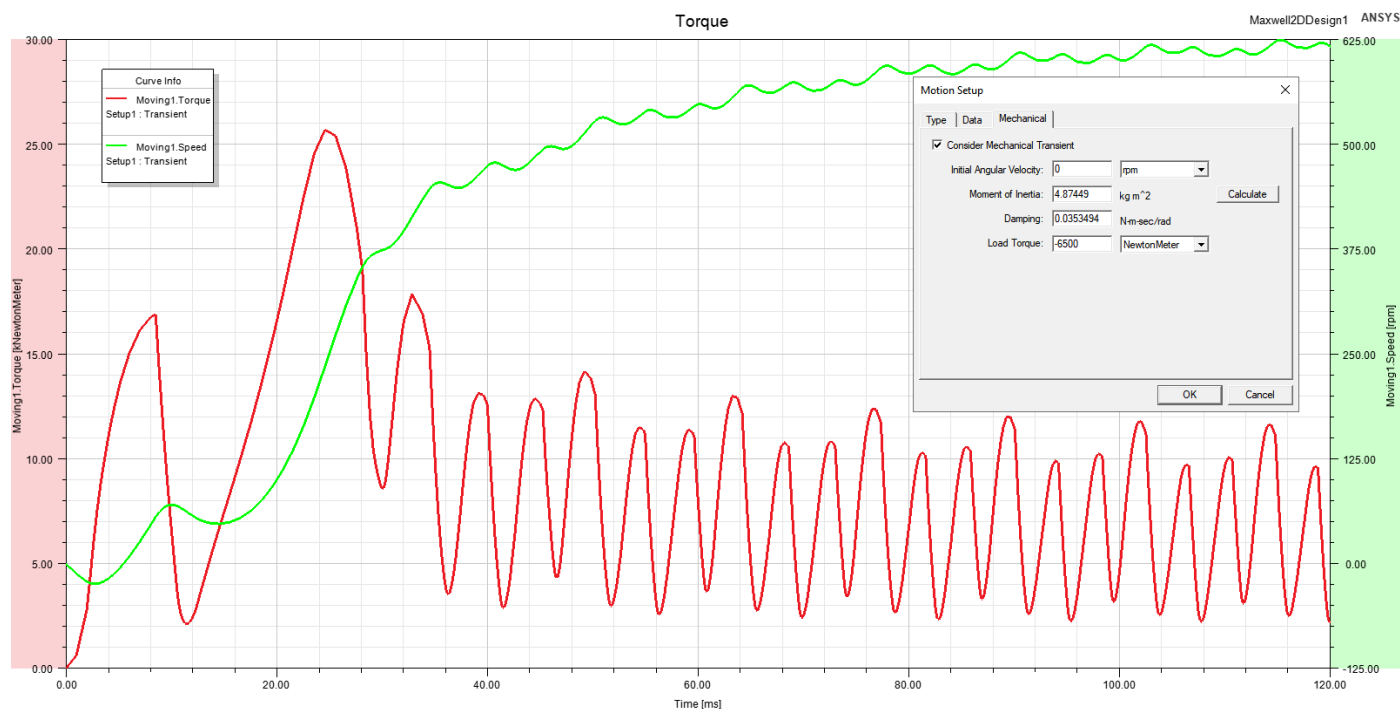
Slika 9.14. Zalet motora od 0 okr/min s teretom od -150 Nm.



Slika 9.15. Zalet motora od 0 okr/min s teretom od -300 Nm.



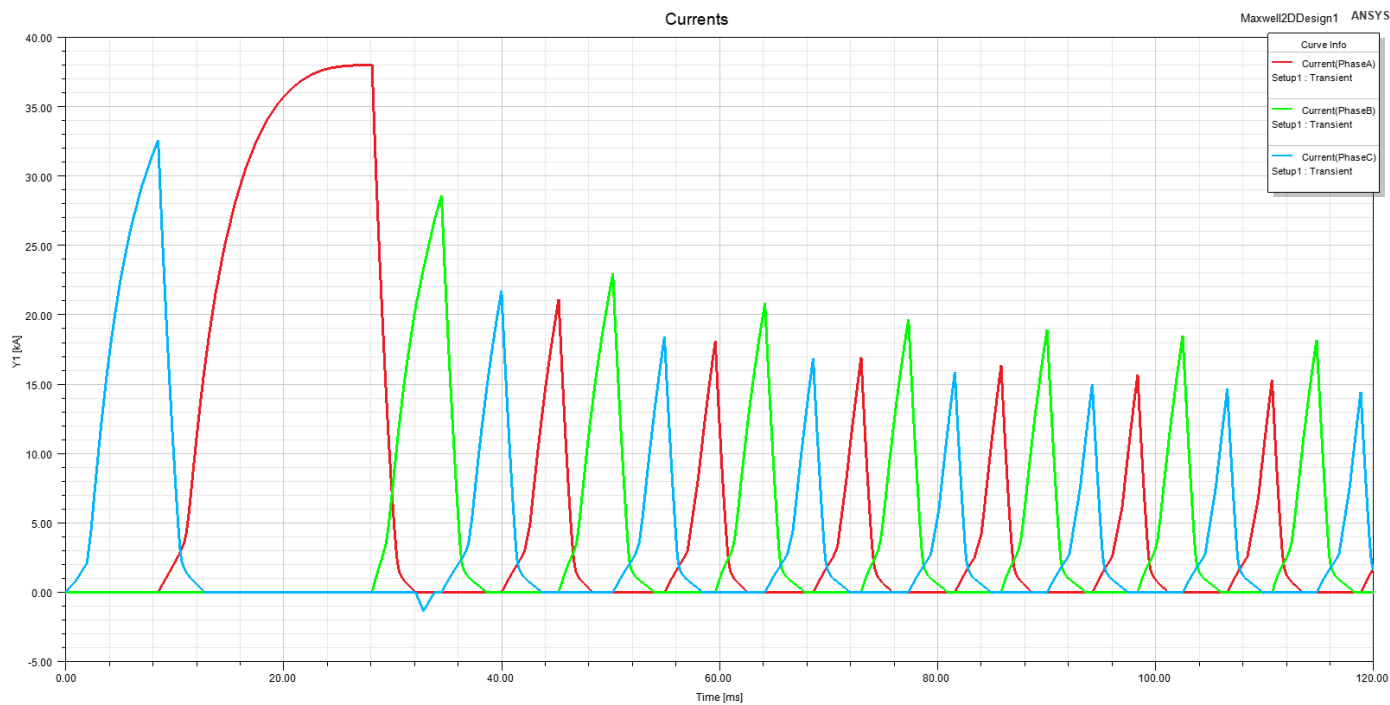
Slika 9.16. Zalet motora od 0 okr/min s teretom od -450 Nm.



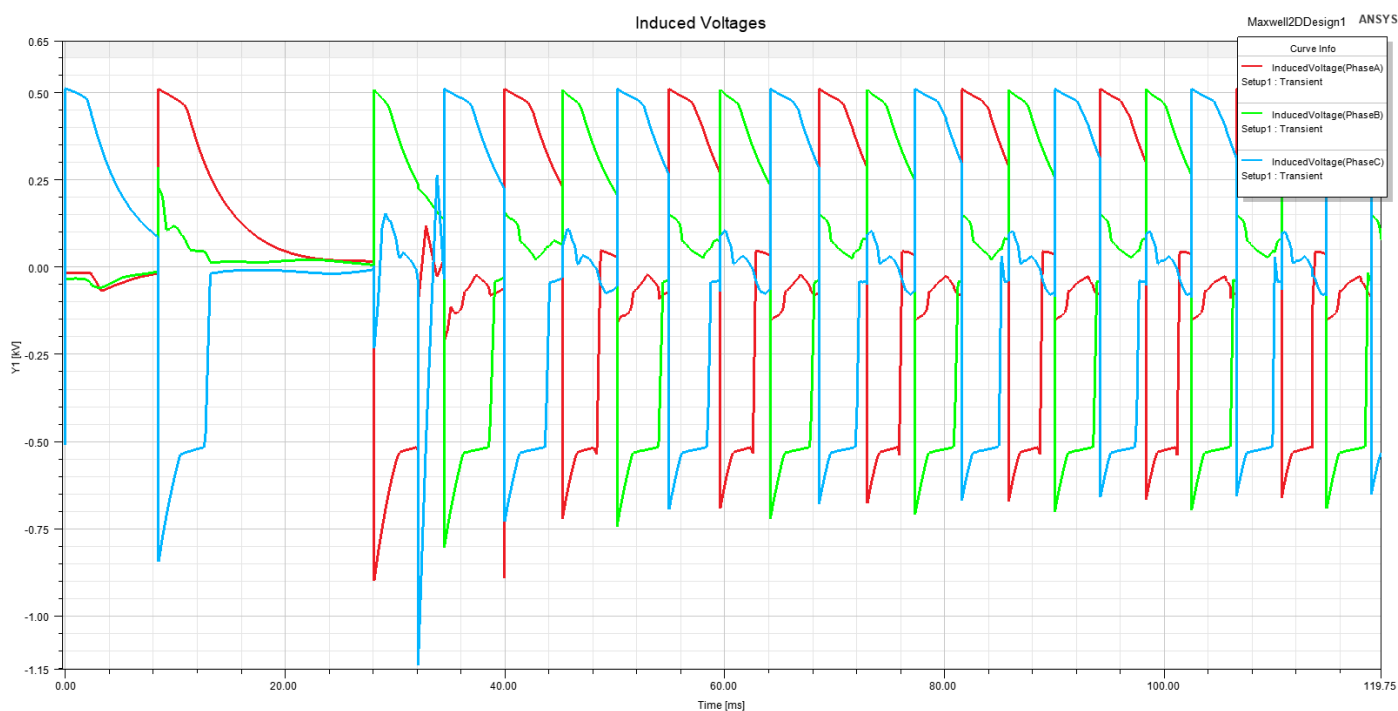
Slika 9.17. Zalet motora od 0 okr/min s teretom od -6500 Nm.

Iz dobivenih slika vidimo da motor može zaletjeti terete i veće od 6000 Nm, ali krajnja brzina motora će biti manja zato što će se radna točka premještati lijevo gdje je manja brzina i veći moment. Najveći problem ovih simulacija je taj što je moment tereta konstantan što najčešće nije slučaj u stvarnosti. Stvarni tereti imaju veliki statički moment koji kada se svlada i teret počne rotirati moment tereta se smanjuje dok u ovim simulacijama to nije slučaj i svaki teret ima konstantan moment na svakoj brzini.

Za teret od -6500 Nm na slikama 9.18. i 9.19. možemo vidjeti grafove struja i induciranih napona na statoru motora. Graf struja prati moment motora gdje veća struja generira veći moment motora koji se rastom brzine smanjuje kao i struja statora. Na grafu napona možemo vidjeti da su početne dvije amplitude napajanja polova vremenski dulje od ostalih što možemo objasniti time što rotor nije još ubrzao pa je trebalo dugo vremena da se rotorski i statorski pol približe, a za to vrijeme se inducirao veliki tok i struja. Na parametrima koje zadajemo za zalet motora određujemo i početni kut između polova rotora i statora motora što utječe na potezni moment. U simulacijama se koristio kut između polova koji daje najveći potezni moment, a to je rotorski pol između 2 statorska pola. Opravdanje za to vidimo na karakteristikama momenta sinkronih motora gdje je maksimalni moment na polovici faznog pomaka rotora za statorom.

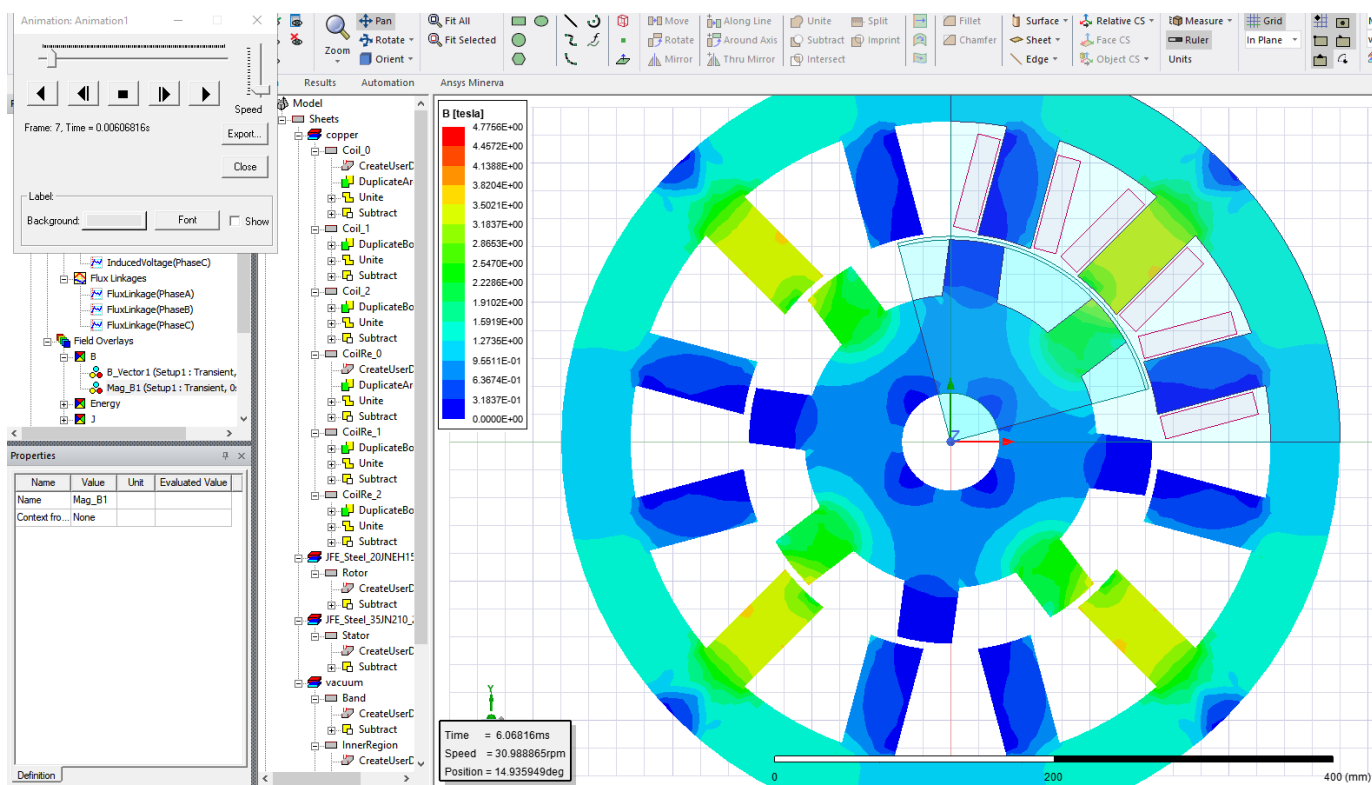


Slika 9.18. Prikaz struja motora pri zaletu s teretom od -6500 Nm.



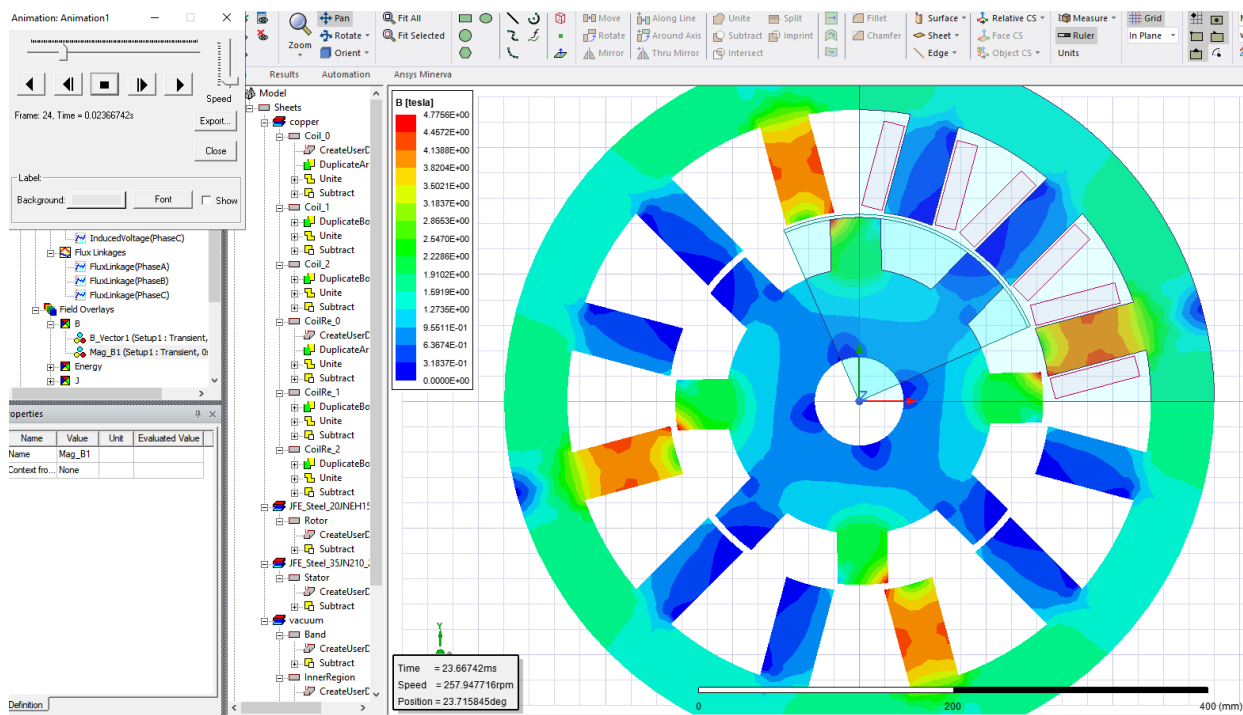
Slika 9.19. Prikaz induciranih napona motora pri zaletu s teretom od -6500 Nm.

Na temelju odrađene analize možemo pokrenuti animaciju modela motora u Maxwell-u 2d na kojoj možemo vidjeti kako se mijenjanju određene varijable motora čiji iznos ovisi o boji ili vektorima koji govore u kojem smjeru se kreće varijabla koju želimo promatrati i kojom amplitudom. Prva animacija koju će mo promatrati je promjena veličine magnetskoga toka pri zaletu motora s opterećenjem prikazano na slikama 9.20. do 9.23. koje su poredane s obzirom vremenski tijek zaleta motora gdje se vidi kako magnetska indukcija prati krivulju momenta gdje na početku naglo naraste te se nakon toga smanjuje i na određenoj brzini kada brzina bude konstanta i magnetska indukcija oscilira oko određene vrijednosti.

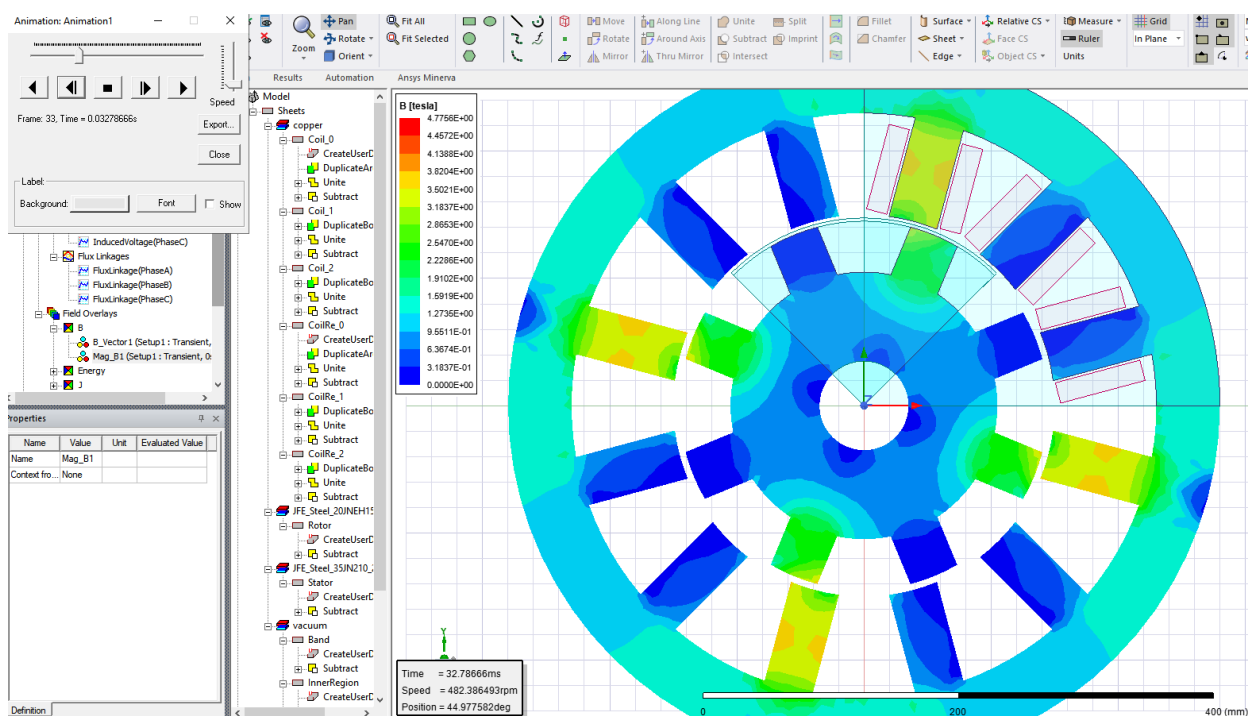


Slika 9.20. Prikaz raspodjele gustoće magnetskog toka motora pri početku zaleta.

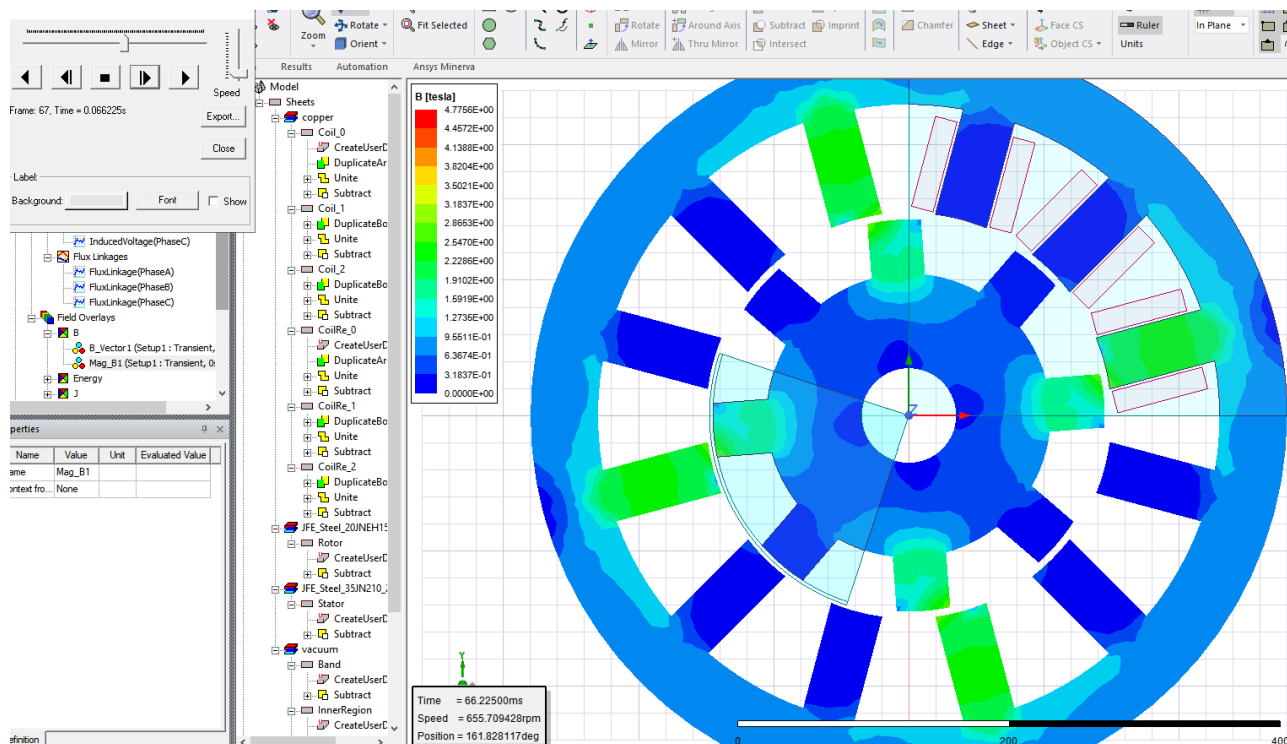
9. SIMULACIJE RADA ELEKTROMOTORA U PROGRAMU ANSYS ELECTRONICS



Slika 9.21. Prikaz raspodjele gustoće magnetskog toka motora pri maksimalnom momentu motora.



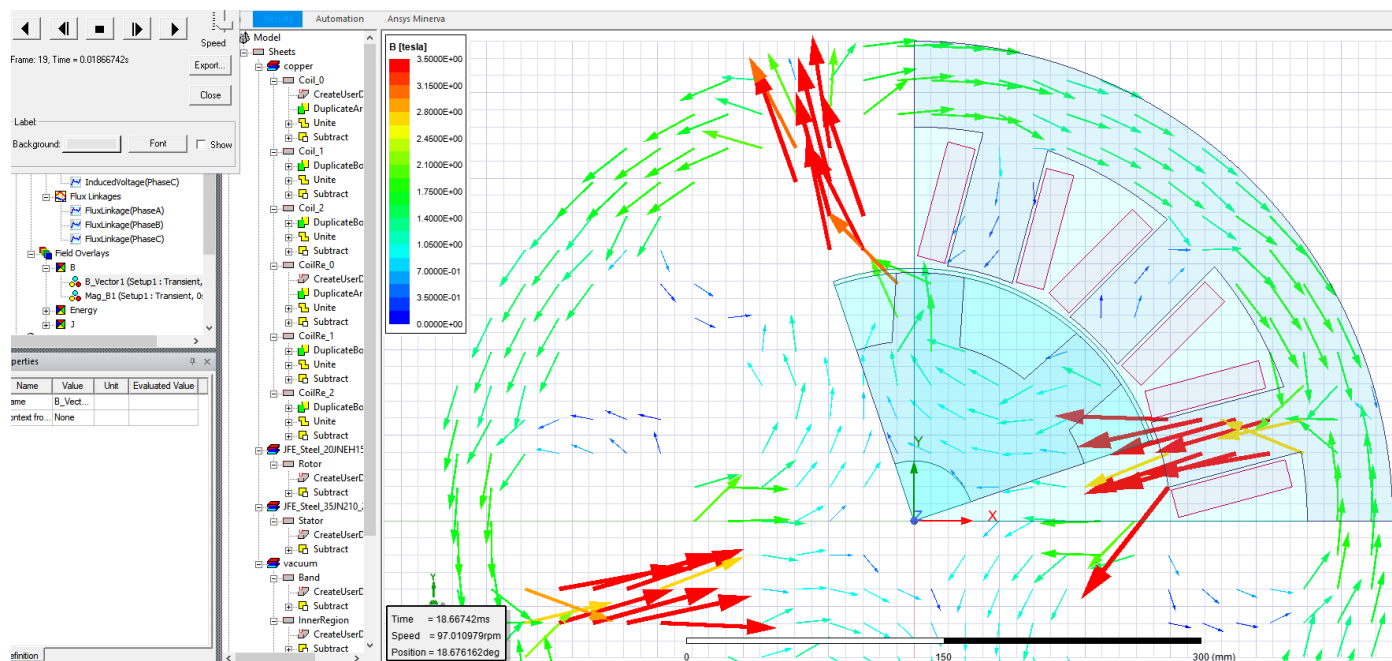
Slika 9.22. Prikaz raspodjele gustoće magnetskog toka motora pri kraju zaleta kada moment motora više nije dovoljan za daljnje ubrzanje.



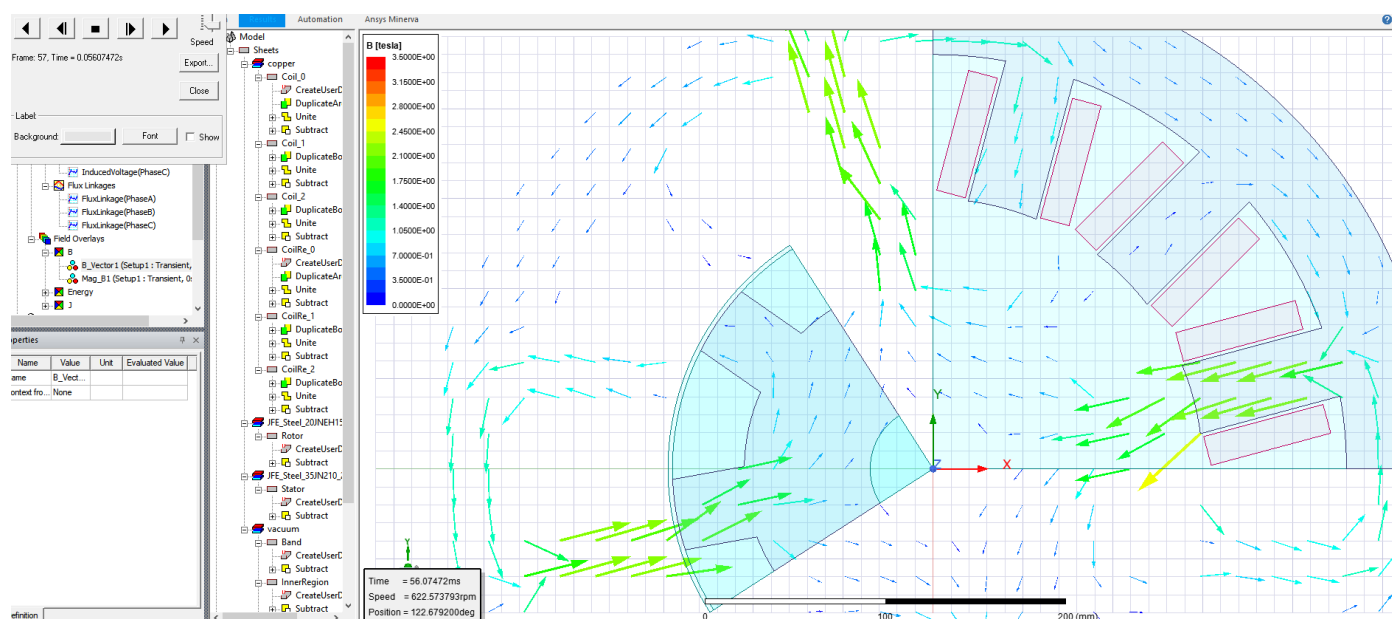
Slika 9.23. Prikaz raspodjele gustoće magnetskog toka motora pri konstantnoj brzini nakon zaleta.

Na slikama 9.24. i 9.25. vidimo vektorski prikaz magnetske indukcije motora u zaletu. Na slici 9.24. vidimo prikaz vektora magnetske indukcije kada je moment motora maksimalan. Crvenim vektorima prikazane su silnice najveće magnetske indukcije te možemo vidjeti da se one kreću polovima koji su u tome trenutku pod naponom. Uz to možemo vidjeti da postoji tok koji prolazi polovima koji nisu komutirani budući da su polovi rotora i statora dovoljno blizu da se magnetski tok premesti preko zračnoga raspora koji je po prirodi magnetski izolator.

Princip rada ovoga motora zasniva se na elektromagnetima koji se nalaze na statorima te nastoje rotirati rotor od mekog feromagnetika u poziciju najmanje reluktancije, a budući da rotor ima fiksirano mjesto u sredini osovine oko kojega se okreće moguća je trajna rotacija oko te točke da se ostvari pozicija u kojoj će se preko rotora zatvoriti magnetski krug s najmanjom reluktancijom. Na slici 9.25. vidimo smjerove kojima teče magnetski tok i kolika jakost magnetskoga toka između pojedinih polova statora i rotora kada se motor dovede na približno konstantnu brzinu. Budući da napajanja polova uvijek idu u parovima trebamo imati i južni i sjeverni pol pri svakom koraku motora. U našem primjeru motora imamo 2 para polova pa prema tome uvijek imamo četiri pola komutirana kroz koje teče najveći dio toka.



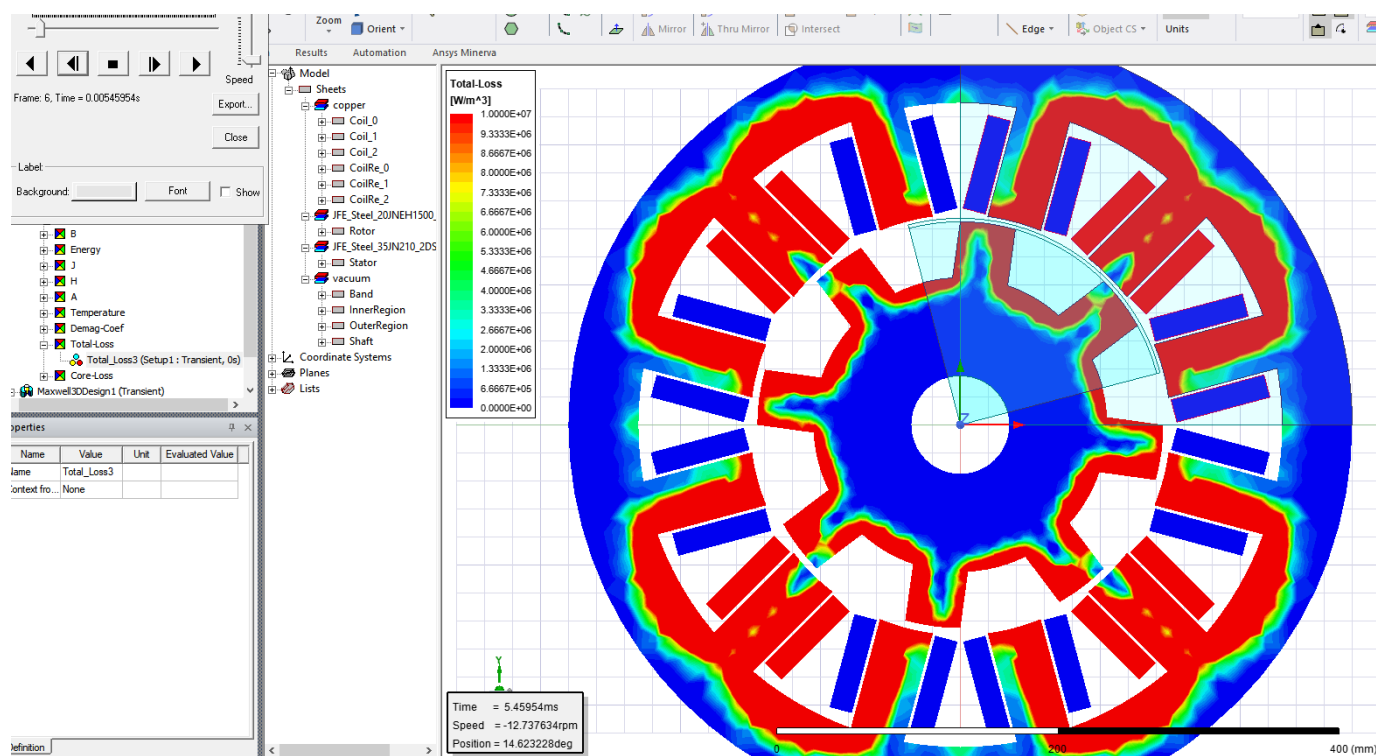
Slika 9.24. Vektorski prikaz gustoće magnetskog toka kroz motor pri najvećem opterećenju.



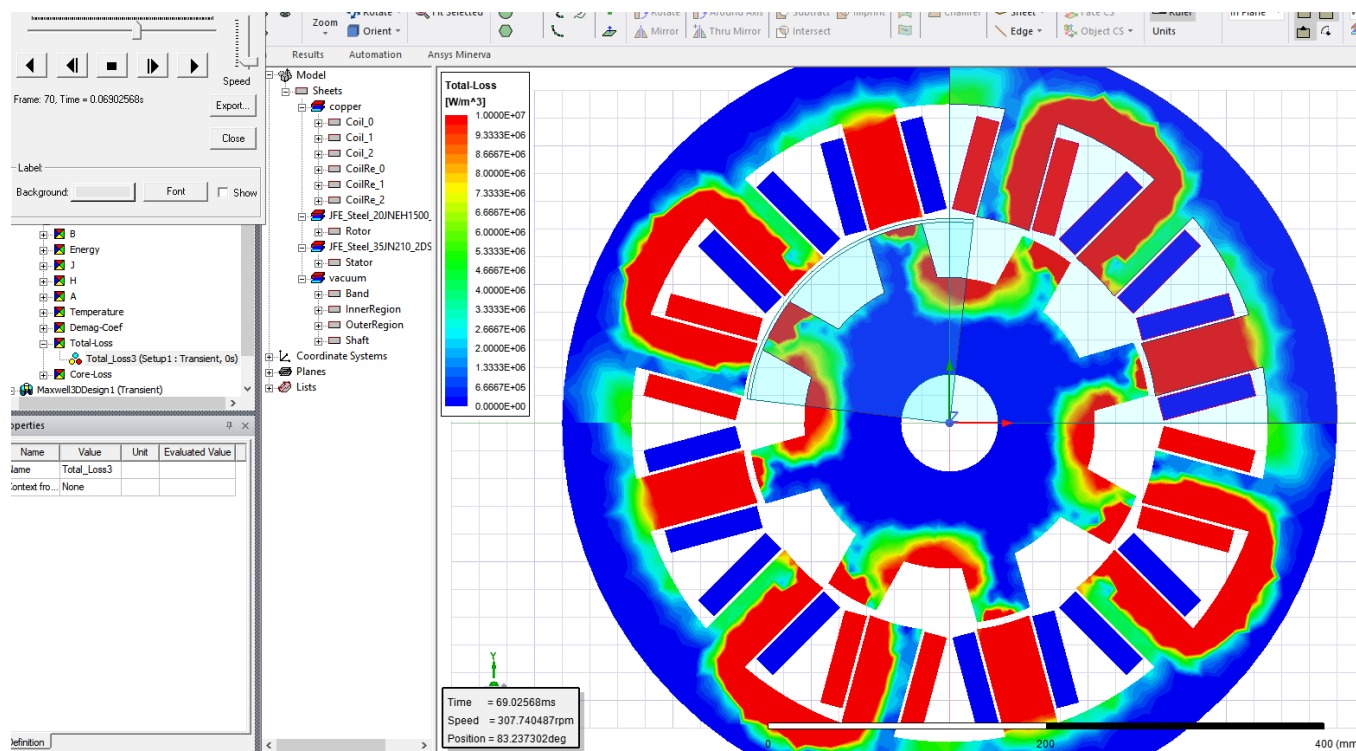
Slika 9.25. Vektorski prikaz gustoće magnetskog toka motora pri konstantnoj brzini.

Veliki magnetski tok uzrokuje veliki tok energije kroz polove i rotor motora što se posebno vidi na startu motora kada kada velika struja protjeće kroz namote statora motora te je stoga tok energije i gubitci na tim mjestima veći u odnosu na gubitke kada je motor dostigao određenu brzinu što je vidljivo na slici 9.26. na kojoj je prikazana slika animacije raspodjele gustoće gubitaka motora. Na

tu gustoću ima veliki utjecaj i veličina to jest obujam statora motora pošto veća jezgra statora ima veći toplinski kapacitet koji preuzima toplinu s namota motora. Na slici 9.26. vidimo da kada je moment motora najveći cijela jezgra pola statora je crvena što nam govori da će se na tome mjestu pojaviti velika zagrijavanja uslijed opterećenja. S vremenom struja statora se smanji, a time i zagrijavanja polova motora što se vidi na slici 9.27.

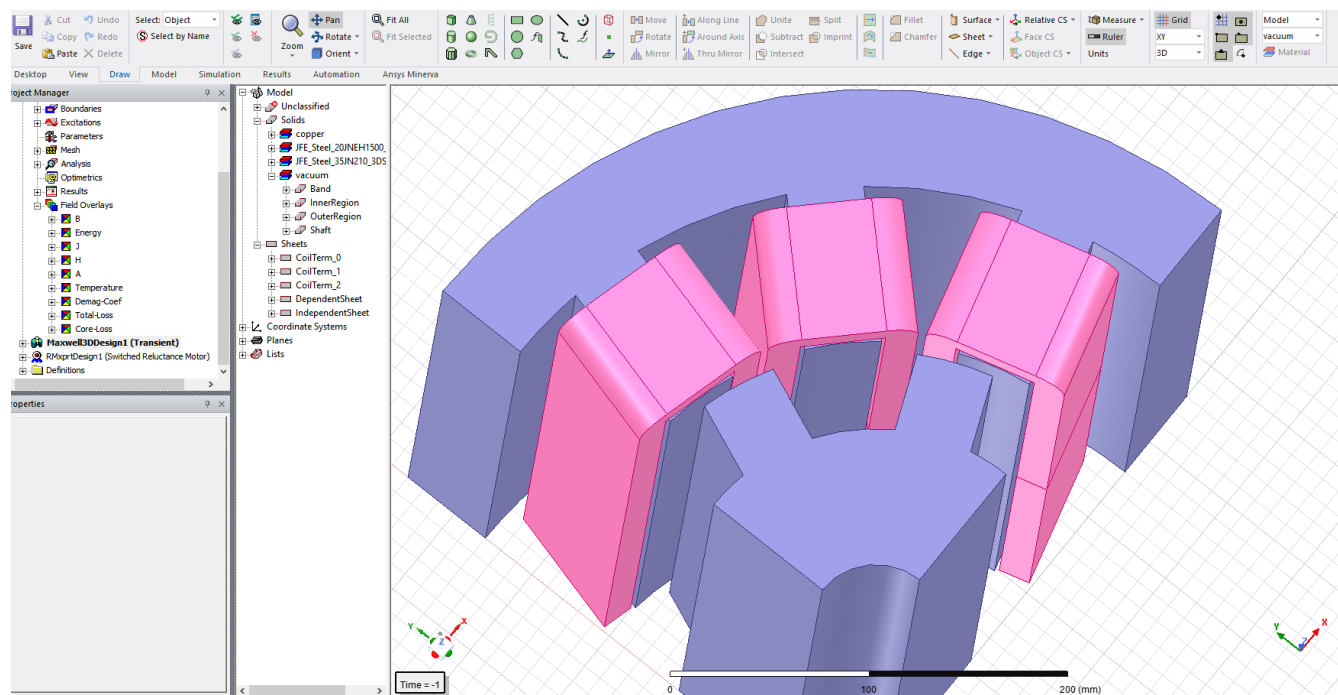


Slika 9.26. Prikaz raspodjele gustoće ukupnih gubitaka motora na početku zaleta pri maksimalnom momentu motora.



Slika 9.27. Prikaz raspodjele gustoće ukupnih gubitaka motora kada je brzina motora dostigla konstantnu.

Prebacivanjem modela motora u Maxwell 3d dobijamo njegov trodimenzionalni prikaz na kojem možemo napraviti iste simulacije kao u Maxwell 2d sa istim rezultatima. Budući da za generiranje simulacija i animacija u Maxwell 3d treba imati računalo prikladnih performansi sve simulacije i animacije su rađene u Maxwell 2d. Na slici 9.28. imamo prikaz 3d modela motora generiranog u Maxwell 3d-u.



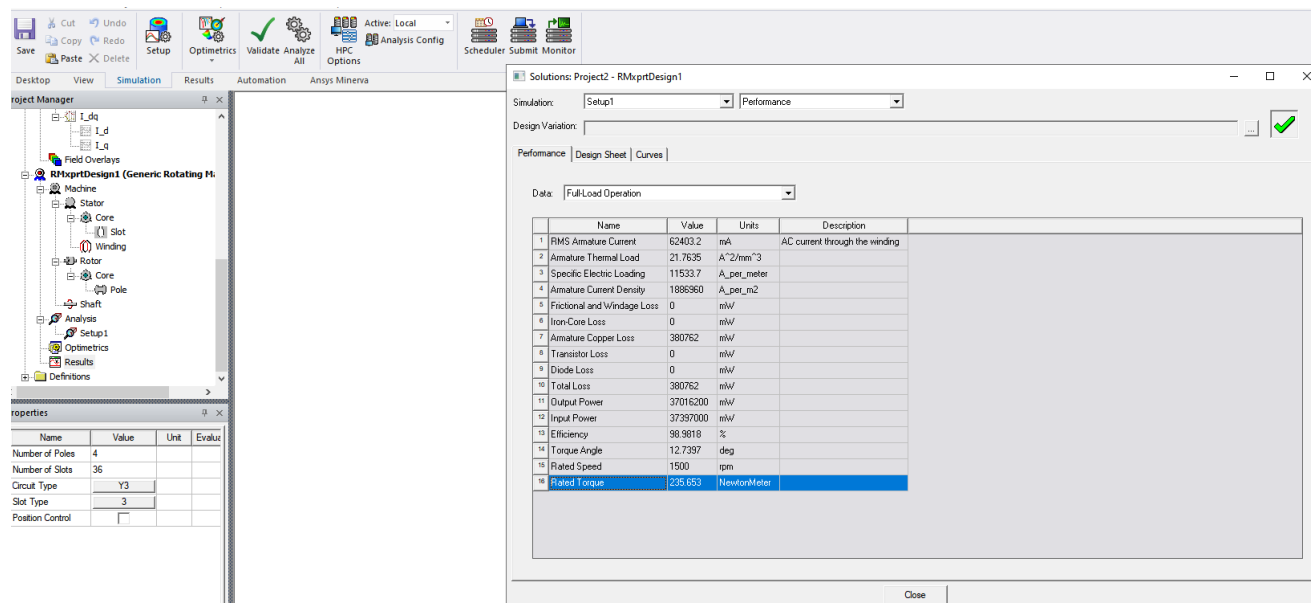
Slika 9.28. Prikaz 3d modela DC reluktantnoga motora u Maxwell-u 3d.

9.2. AC sinkroni reluktantni motor

Druga vrsta motora čija je simulacija napravljena je AC izvedba reluktantni motora kod kojega je rotor prilagođen za distribuirane namote statora to jest za izmjenični napon. Za razliku od DC reluktantnog motora čije statorske polove možemo promatrati kao elektromagnete ovdje je situacija drugačija pošto je ovdje riječ o distribuiranim namotima za razliku od koncentriranih na DC motorima. Distribuirani namoti stvaraju oko sebe magnetsko polje koje nije koncentrirano već je ravnomjerno distribuirano statorom. Rotor ovoga motora se dizajnira na temelju distribucije magnetskoga polja. Iz toga razloga rotor ovoga reluktantnoga motora je kružnoga oblika s prorezima u kojima se nalazi zrak. Time se ostvaruje usmjeravanje magnetskoga toka statorskih namota kroz vodljive feromagnetske linije rotora gdje je magnetski otpor najmanji. Moment se stvara rotacijom rotora tako da se pol rotora postavi nasuprot statorskog pola na kojemu je u tome trenutku izvor magnetskoga polja tako da magnetske silnice imaju najmanji otpor pri strujanju kroz rotor. Motor je konstruiran na temelju stvarnoga motora proizvođača ABB model M3BL 250 SMF4

9. SIMULACIJE RADA ELEKTROMOTORA U PROGRAMU ANSYS ELECTRONICS

s ciljem da se ostvari nazivni moment kojega proizvođač navodi kao što je i ostvareno i vidljivo na slikama 9.29. i 9.30.

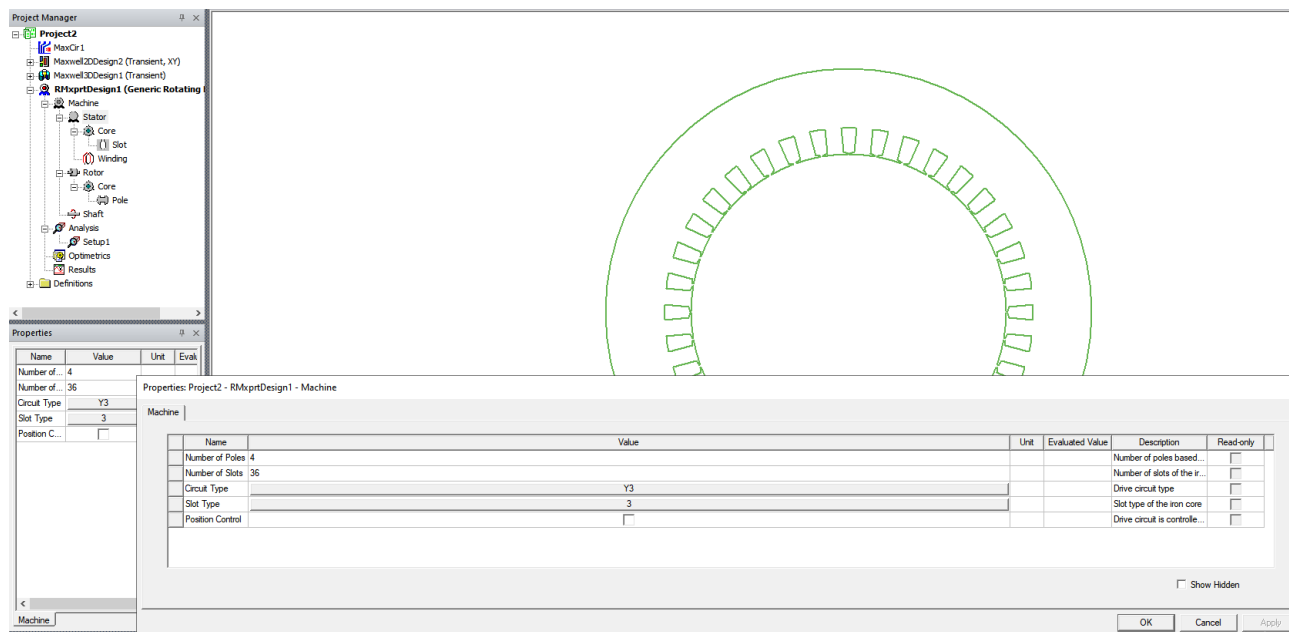


Slika 9.29. Nazivne vrijednosti motora (nazivni moment) dizajniranog modela.

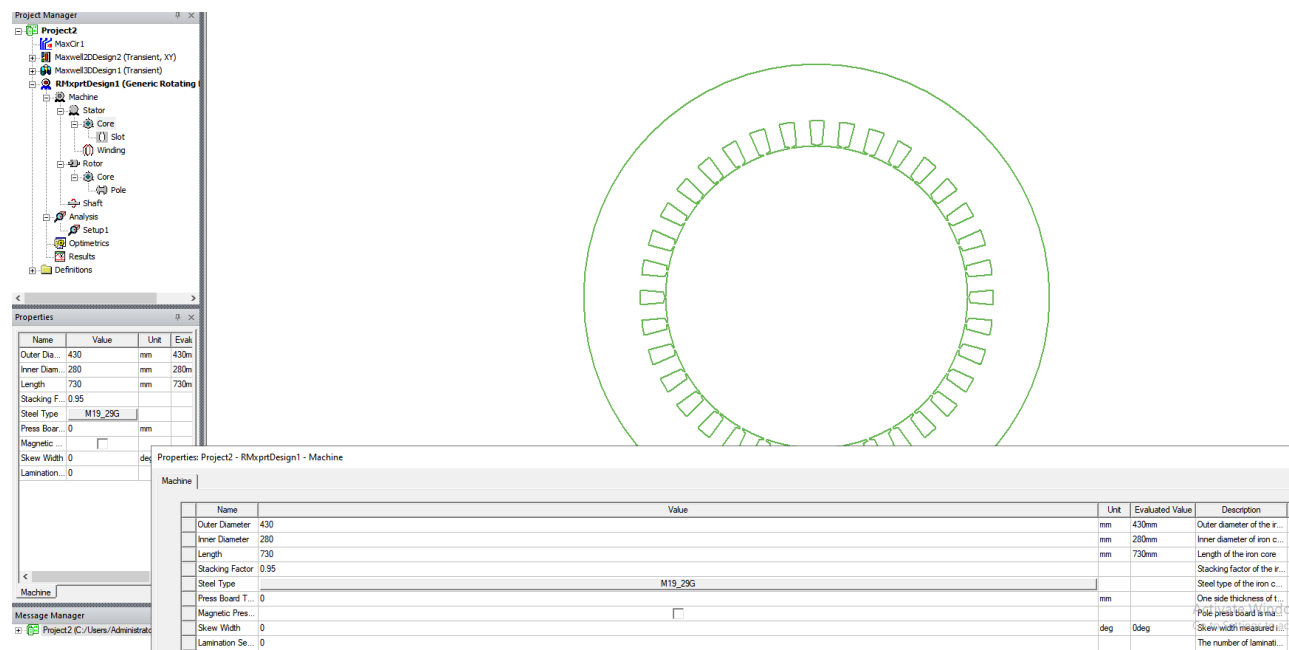
| Output kW | Motor type | Product code | Speed | Motor efficiency | Current | Torque | Torque | Max speed | Inertia | Weight | Suggested frequency converter type for no overload pump and fan use* | Package efficiency IE4 SynRM & ACS850 $T_N=100\%$, $\eta_N=100\%$ | Typical package efficiency IE2 IM & ACS850 $T_N=100\%$, $\eta_N=100\%$ |
|----------------------------|----------------|-----------------|----------------|---------------------|------------|-------------|--------------------|--------------------|-----------------------|---------|--|--|---|
| | | | n_N r/min | with VSD supply | I_N A | T_N Nm | T_{ol}/T_N Nm | n_{max} r/min | J kgm ² | m kg | | | |
| 3000 r/min (100 Hz) | | | | | | | | | | | | | |
| 400 V network | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | M3BL 160 MLA 4 | 3GBL 162 101_SC | 3000 | 92.6% | 25.0 | 35 | 1.5 | 4200 | 0.0579 | 133 | ACS850-04-025A-5 | 90.2% | 86.7% |
| 15 | M3BL 160 MLB 4 | 3GBL 162 102_SC | 3000 | 93.3% | 34.8 | 48 | 1.5 | 4200 | 0.0579 | 133 | ACS850-04-035A-5 | 90.5% | 87.5% |
| 18.5 | M3BL 160 MLC 4 | 3GBL 162 103_SC | 3000 | 93.7% | 42.8 | 59 | 1.5 | 4200 | 0.0579 | 133 | ACS850-04-044A-5 | 91.4% | 88.1% |
| 22 | M3BL 180 MLA 4 | 3GBL 182 101_SC | 3000 | 94.0% | 50.0 | 70 | 1.5 | 4200 | 0.0702 | 160 | ACS850-04-050A-5 | 91.6% | 88.5% |
| 30 | M3BL 200 MLA 4 | 3GBL 202 101_SC | 3000 | 94.5% | 68.8 | 95 | 1.5 | 4200 | 0.207 | 259 | ACS850-04-078A-5 | 92.2% | 89.2% |
| 37 | M3BL 200 MLB 4 | 3GBL 202 102_SC | 3000 | 94.8% | 84.6 | 118 | 1.5 | 4200 | 0.207 | 259 | ACS850-04-094A-5 | 92.7% | 89.6% |
| 45 | M3BL 225 SMA 4 | 3GBL 222 101_SC | 3000 | 95.0% | 103 | 143 | 1.5 | 4200 | 0.242 | 282 | ACS850-04-103A-5 | 92.2% | 90.0% |
| 55 | M3BL 225 SMF 4 | 3GBL 222 102_SC | 3000 | 95.3% | 122 | 175 | 1.5 | 4200 | 0.242 | 282 | ACS850-04-144A-5 | 92.6% | 89.9% |
| 1500 r/min (50 Hz) | | | | | | | | | | | | | |
| 400 V network | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | M3BL 160 MLA 4 | 3GBL 162 104_SC | 1500 | 93.3% | 24.9 | 70 | 1.5 | 2100 | 0.0702 | 160 | ACS850-04-025A-5 | 90.9% | 87.1% |
| 15 | M3BL 160 MLB 4 | 3GBL 162 105_SC | 1500 | 93.9% | 33.7 | 95 | 1.5 | 2100 | 0.0864 | 177 | ACS850-04-035A-5 | 91.3% | 87.9% |
| 18.5 | M3BL 180 MLA 4 | 3GBL 182 102_SC | 1500 | 94.2% | 42.0 | 118 | 1.5 | 2100 | 0.0864 | 177 | ACS850-04-044A-5 | 92.0% | 88.4% |
| 22 | M3BL 200 MLF 4 | 3GBL 202 106_SC | 1500 | 94.5% | 49.1 | 140 | 1.5 | 2100 | 0.287 | 304 | ACS850-04-050A-5 | 92.2% | 88.8% |
| 30 | M3BL 200 MLA 4 | 3GBL 202 103_SC | 1500 | 94.9% | 66.7 | 191 | 1.5 | 2100 | 0.287 | 304 | ACS850-04-078A-5 | 92.6% | 89.4% |
| 37 | M3BL 250 SMF 4 | 3GBL 252 104_SC | 1500 | 95.2% | 82.0 | 236 | 1.5 | 2100 | 0.575 | 428 | ACS850-04-094A-5 | 93.1% | 89.8% |
| 45 | M3BL 250 SMG 4 | 3GBL 252 105_SC | 1500 | 95.4% | 99.5 | 286 | 1.5 | 2100 | 0.575 | 428 | ACS850-04-103A-5 | 92.8% | 90.2% |
| 55 | M3BL 250 SMA 4 | 3GBL 252 102_SC | 1500 | 95.7% | 121 | 350 | 1.5 | 2100 | 0.633 | 454 | ACS850-04-144A-5 | 93.1% | 90.1% |
| 75 | M3BL 280 SMA 4 | 3GBL 282 213_DC | 1500 | 96.0% | 173 | 478 | 2.0 | 2100 | 1.00 | 639 | ACS850-04-202A-5 | 93.6% | 90.6% |
| 90 | M3BL 280 SMB 4 | 3GBL 282 223_DC | 1500 | 96.1% | 202 | 573 | 2.1 | 2100 | 1.00 | 639 | ACS850-04-202A-5 | 93.7% | 90.8% |

Slika 9.30. Nazivni podaci stvarnoga motora.

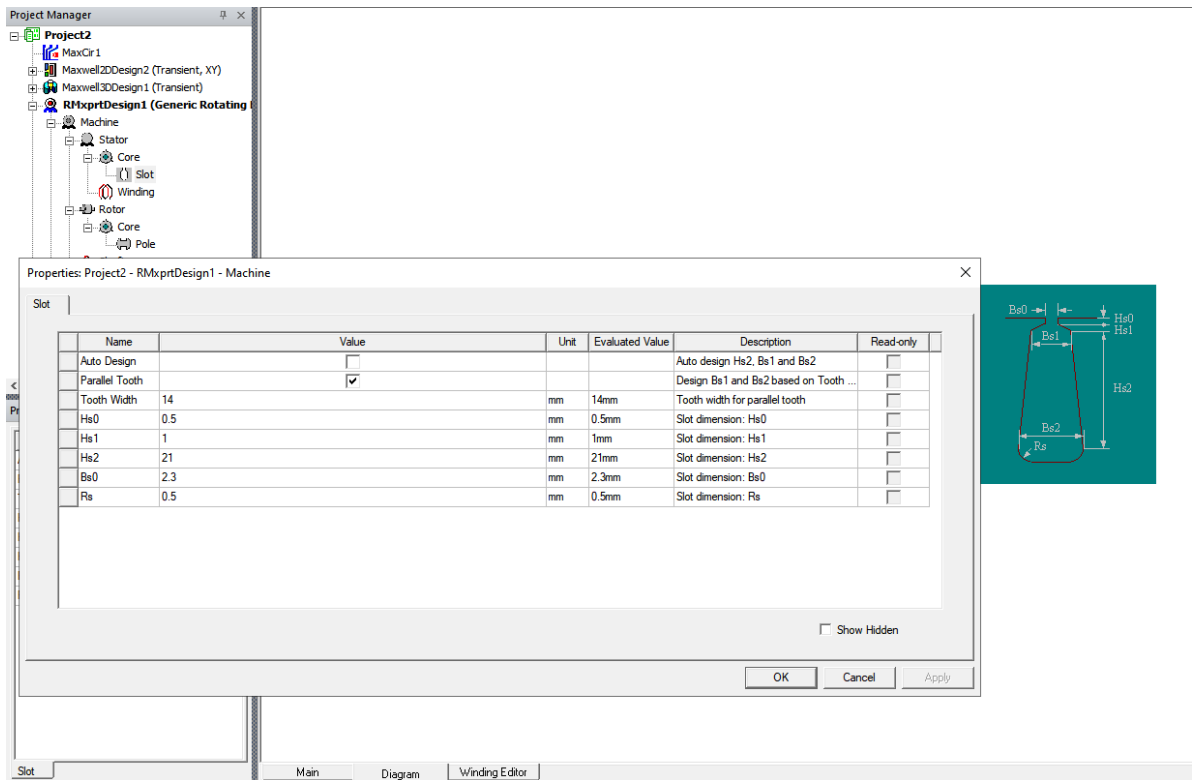
Na sljedećim slikama 9.31. – 9.36. prikazani su najvažniji koraci u modeliranju AC trofaznog reluktantnog motora i zadavanja njegovih nazivnih vrijednosti u RMXprt-u na istom principu kao i kod DC reluktantnoga motora.



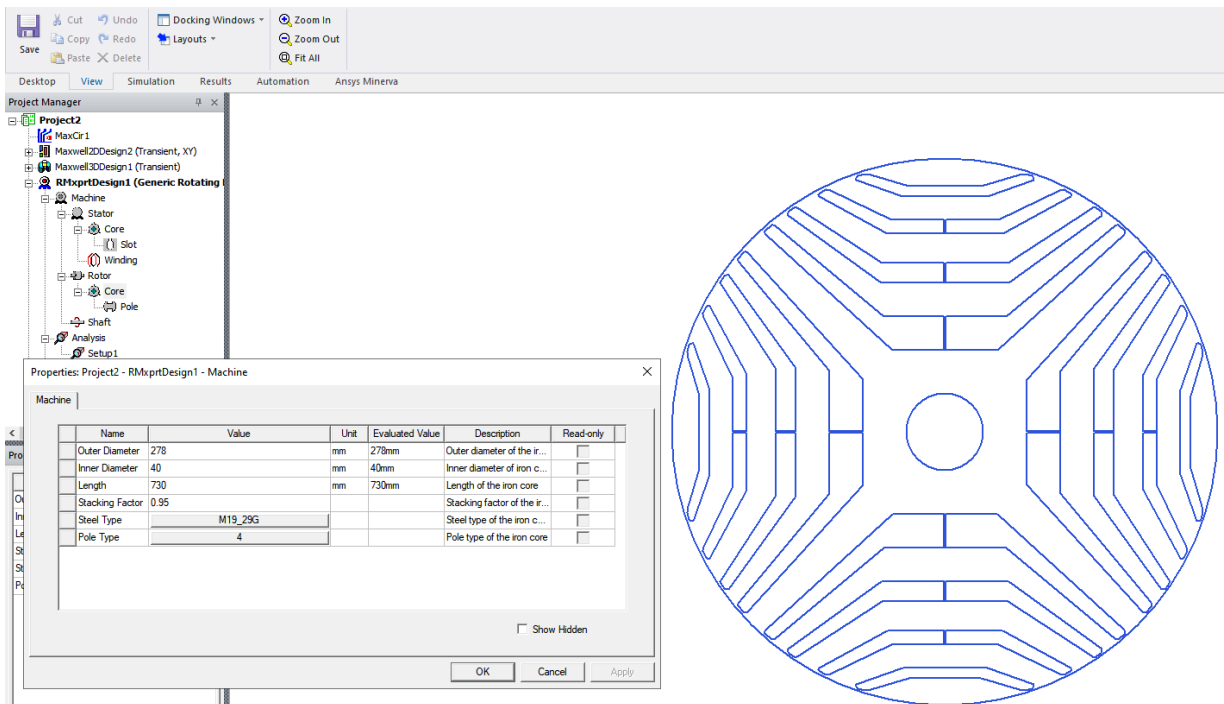
Slika 9.31. Određivanje osnovnih podataka statora.



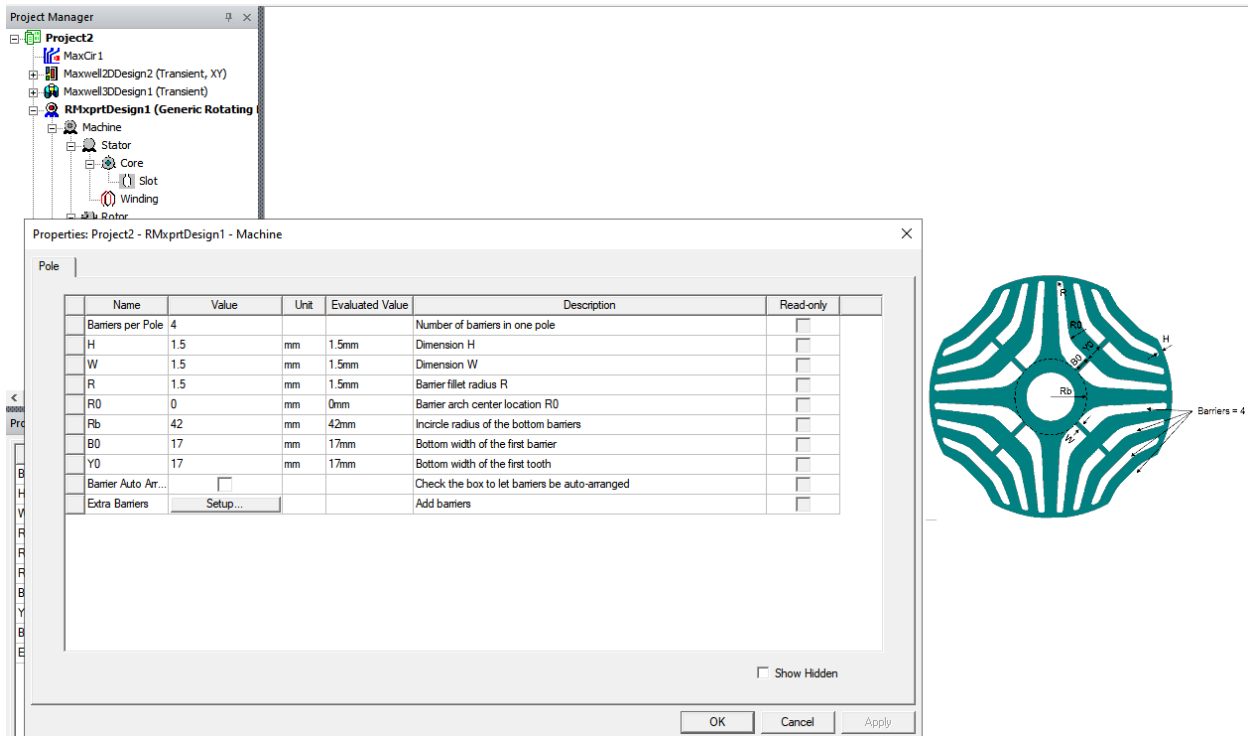
Slika 9.32. Određivanje fizičkih dimenzija statora motora.



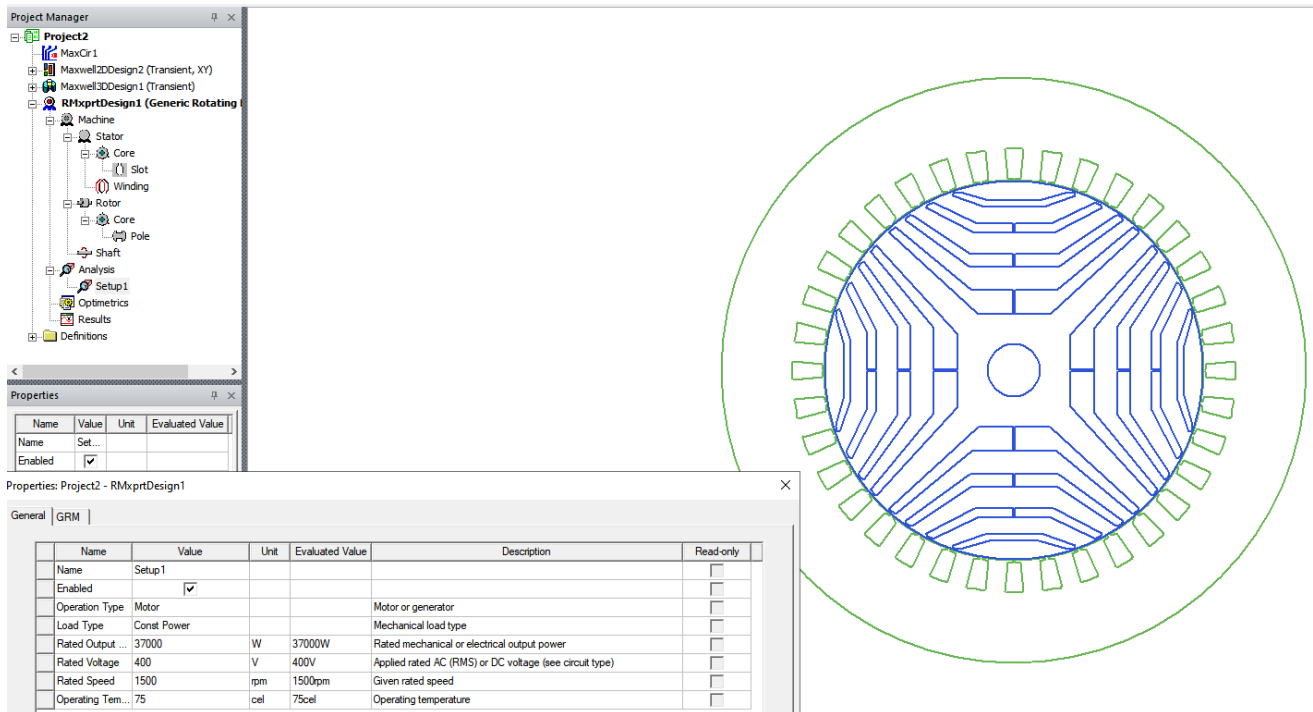
Slika 9.33. Dimenzioniranje statorskih utora motora.



Slika 9.34. Dimenzioniranje rotora motora.

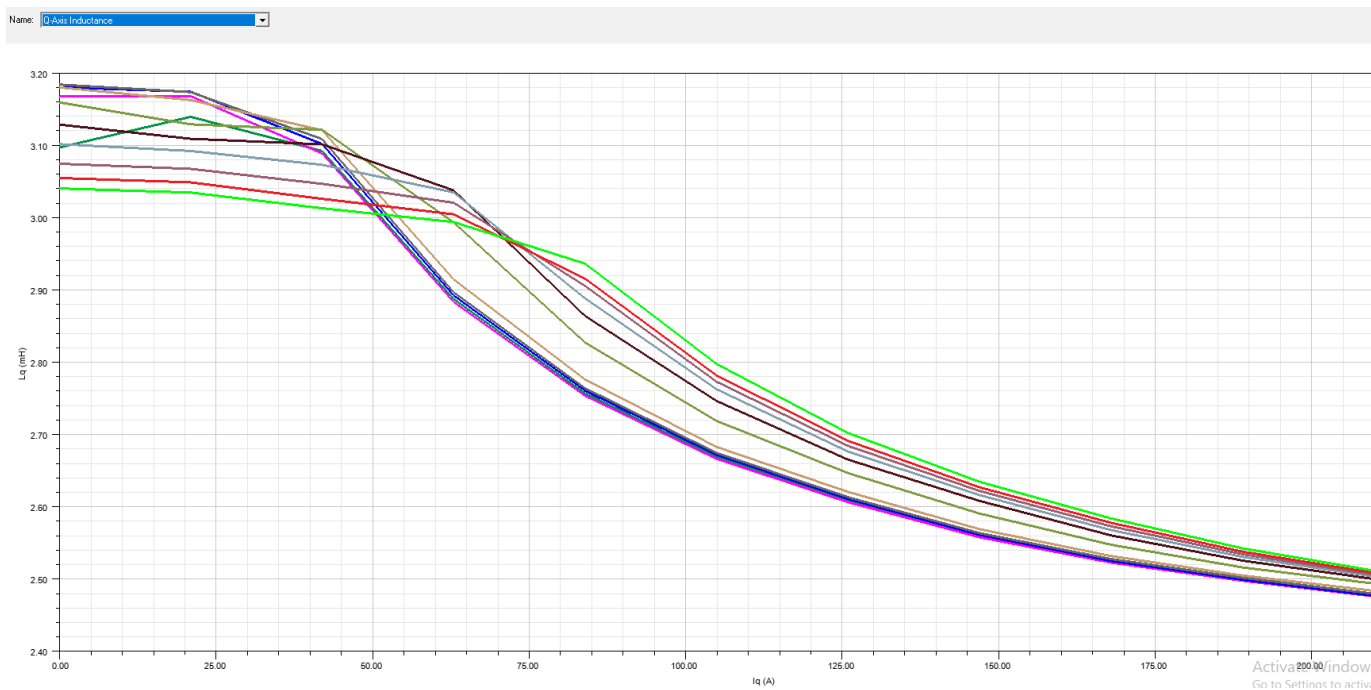


Slika 9.35. Dimenzioniranje rotorskih zračnih i metalnih slojeva.



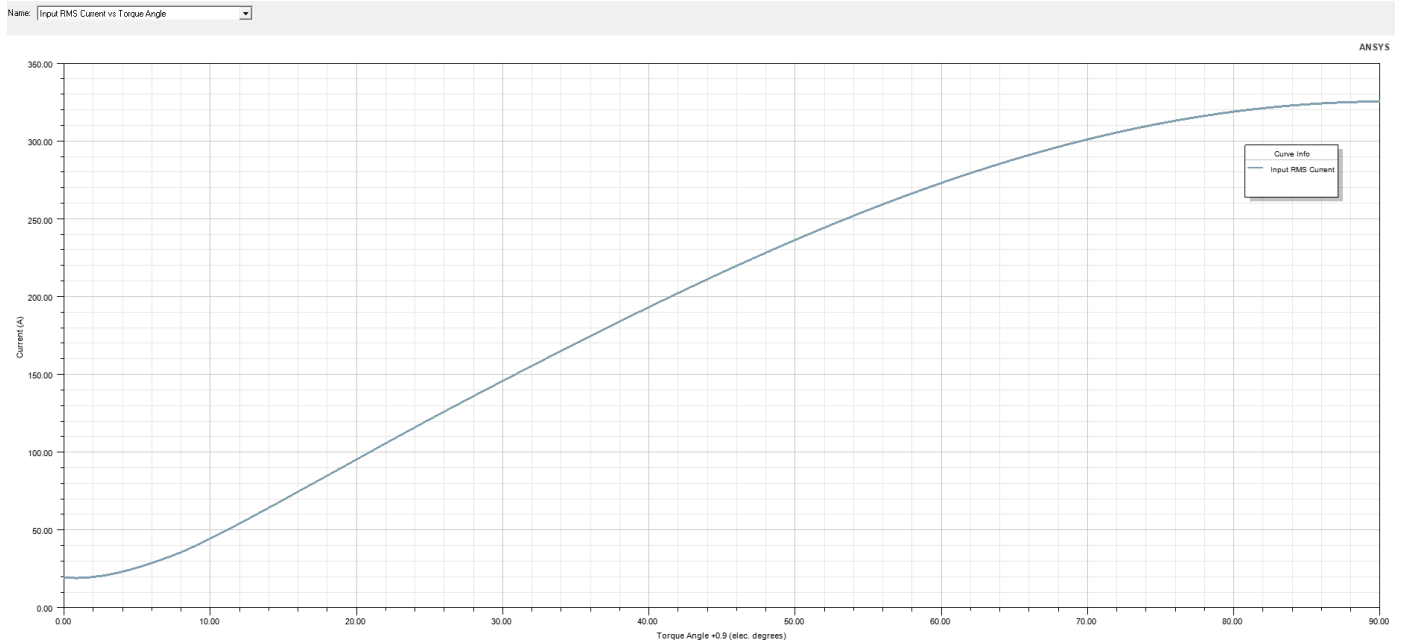
Slika 9.36. Zadavanje nazivnih vrijednosti motora.

Kada je motor dizajniran pokrećemo analizu njega i njegovih parametara koje smo zadali te na temelju toga dobivamo sljedeće statičke karakteristike, a neke od njih su prikazane su na slikama 9.37., 9.38., 9.39.

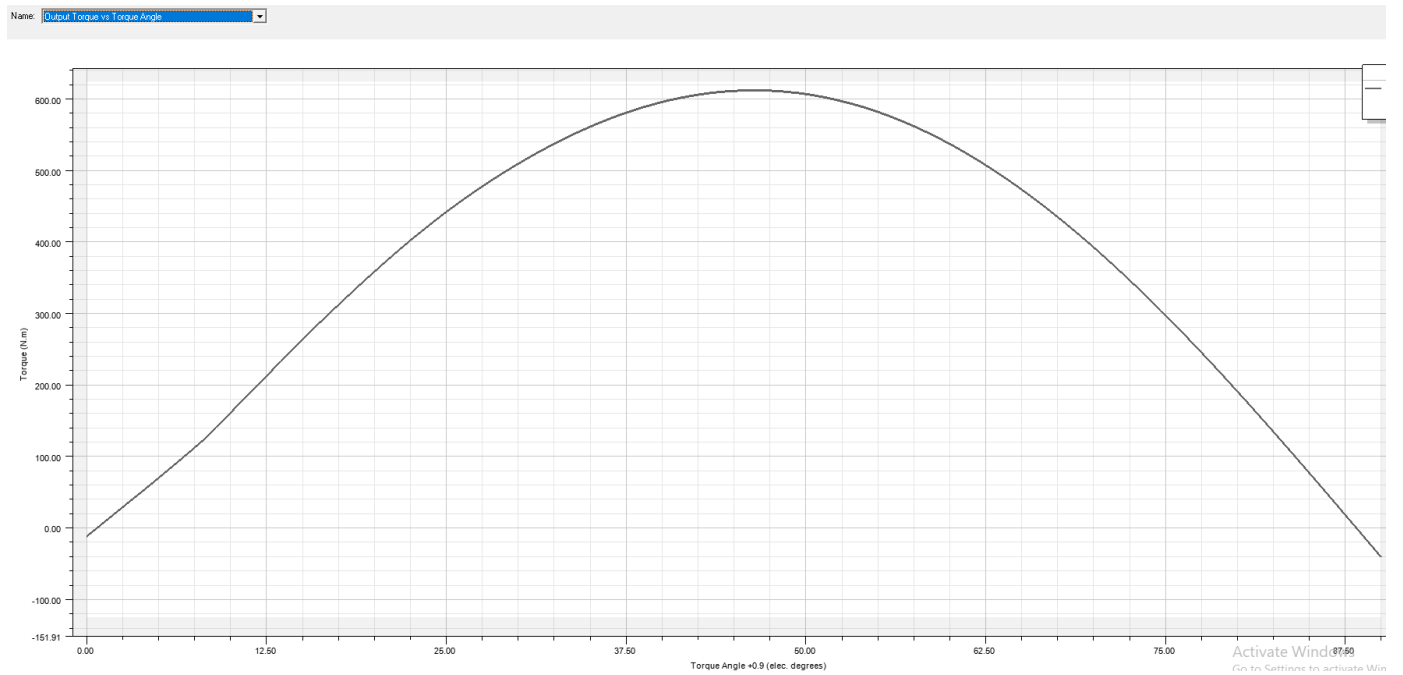


Slika 9.37. Graf ovisnosti induktiviteta o struji statora motora.

9. SIMULACIJE RADA ELEKTROMOTORA U PROGRAMU ANSYS ELECTRONICS

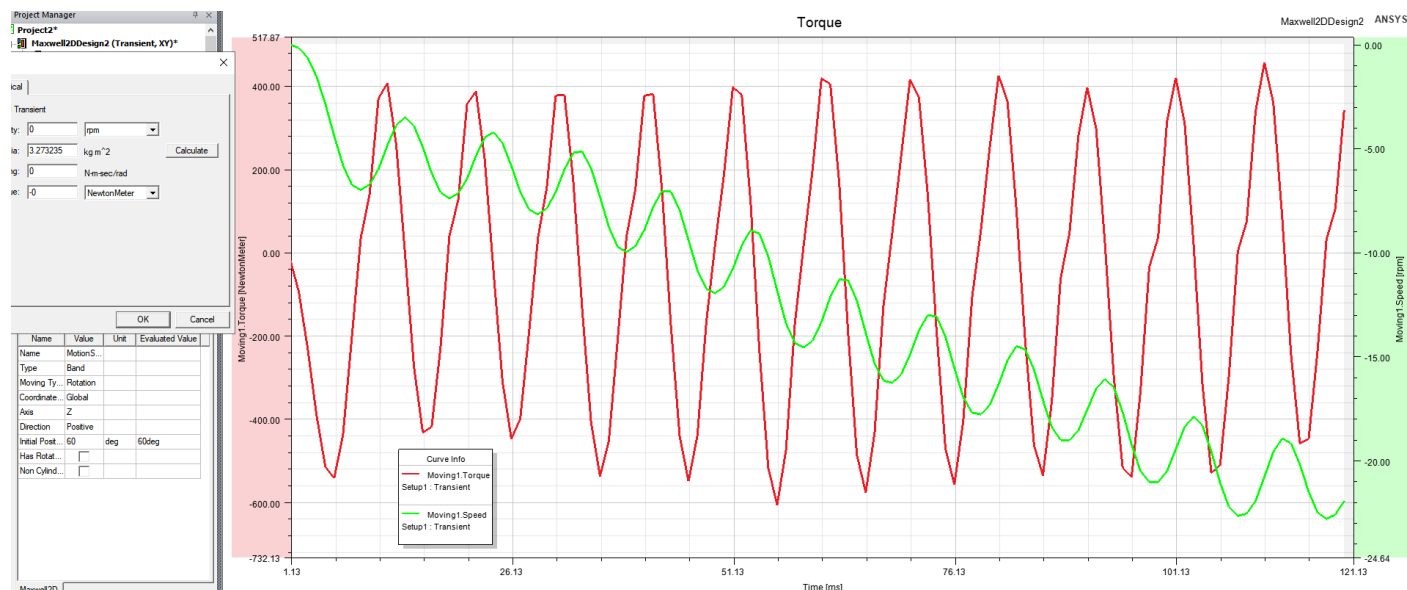


Slika 9.38. Graf ovisnosti struje statora o kutu opterećenja motora



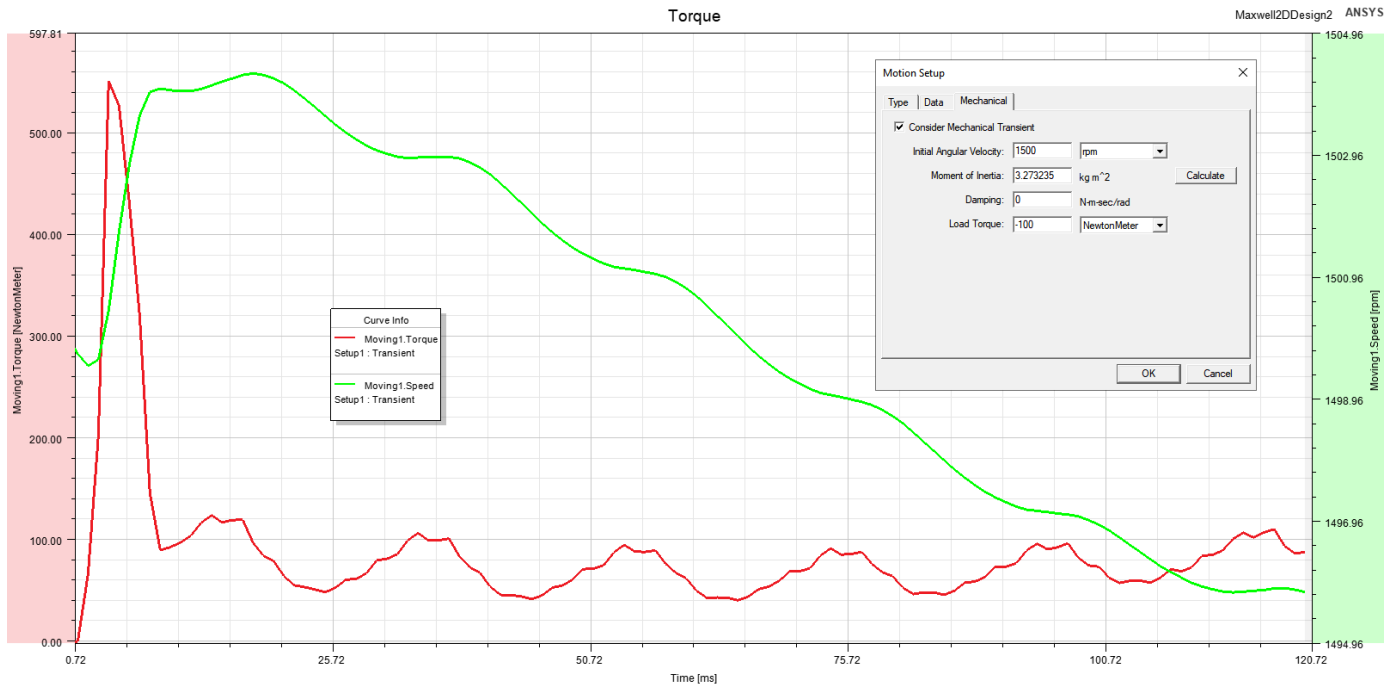
Slika 9.39. Momentna karakteristika AC rektantnoga motora.

Na temelju dobivenih statičkih karakteristika možemo vidjeti kakve su njegove nazivne karakteristike u idealnim uvjetima. Nakon ovoga prebacujemo model u Maxwell 2d gdje će mo napraviti simulacije zaleta motora pri različitim brzinama i teretima te vidjeti kako se mijenjaju njegove radne karakteristike. Rezultati simulacija prikazani su na sljedećim slikama 9.40. – 9.43. Budući da je potvrđeno slikom 9.40. da AC sinkroni motori ne mogu startati sami simulacije zaleta su se radile sa početnom brzinom jednakom nazivnoj.

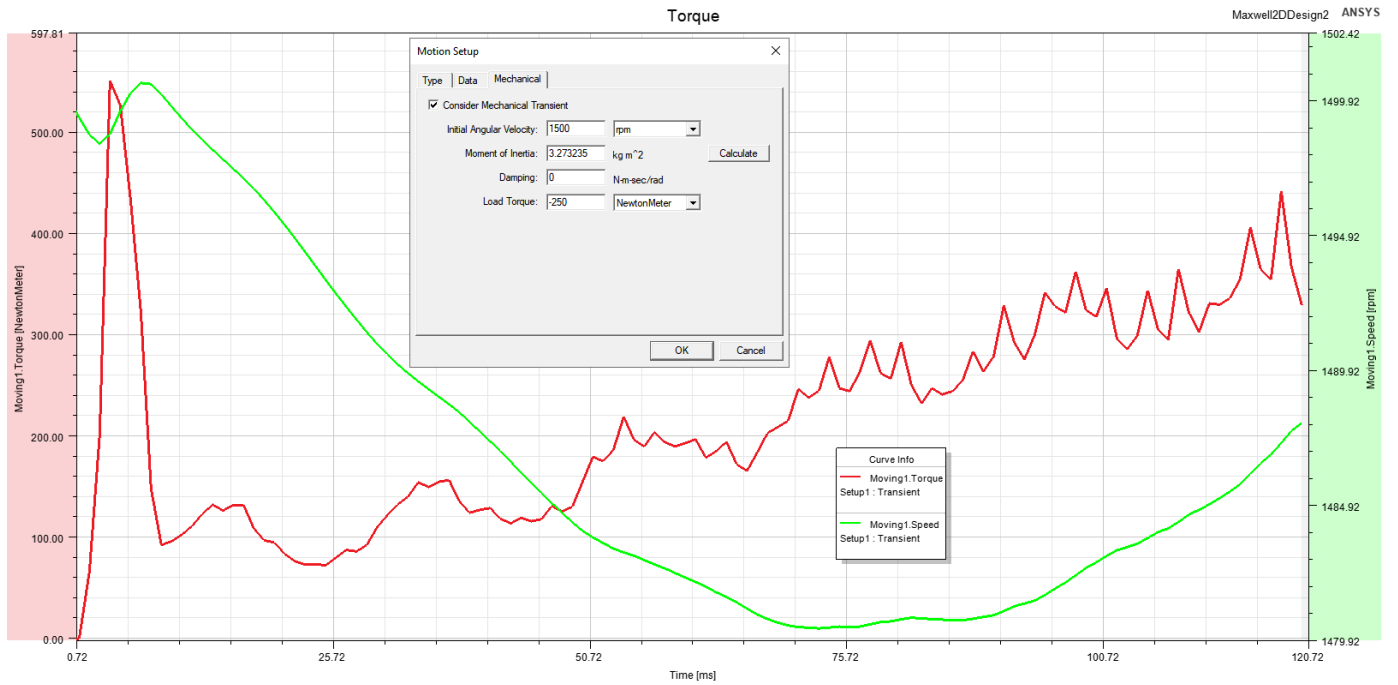


Slika 9.40. Simulacija zaleta AC sinkronoga motora bez tereta.

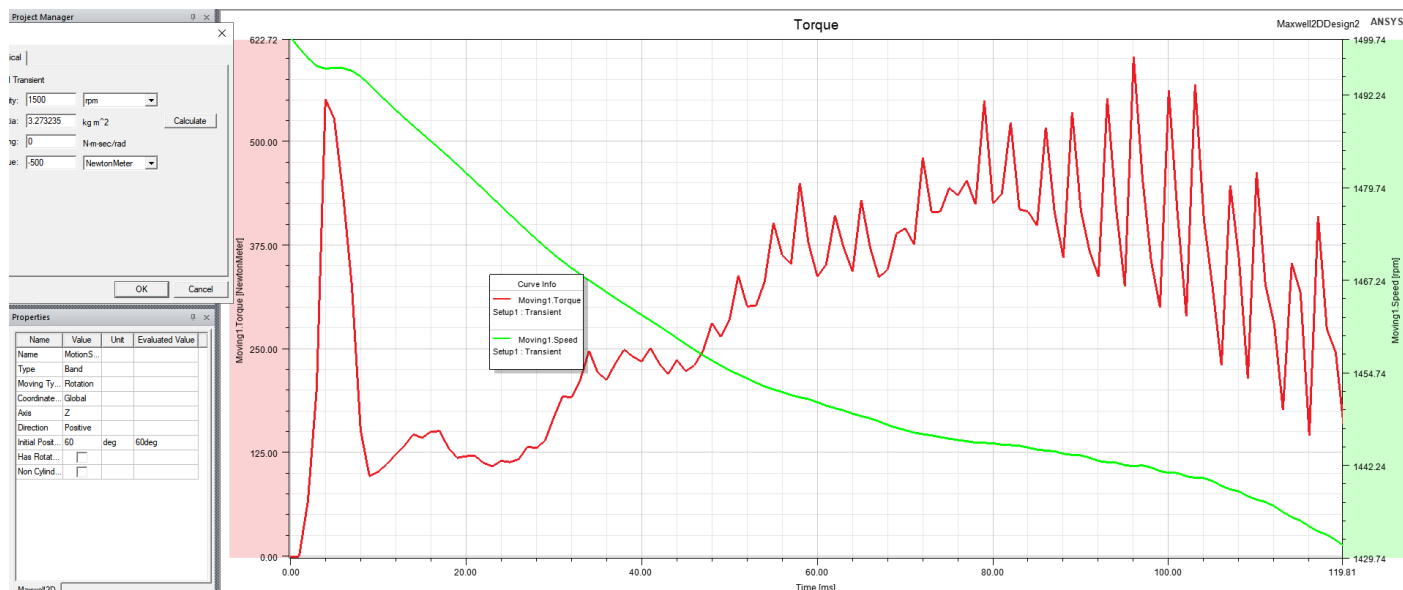
9. SIMULACIJE RADA ELEKTROMOTORA U PROGRAMU ANSYS ELECTRONICS



Slika 9.41. Simulacija zaleta motora s teretom od -100 Nm.

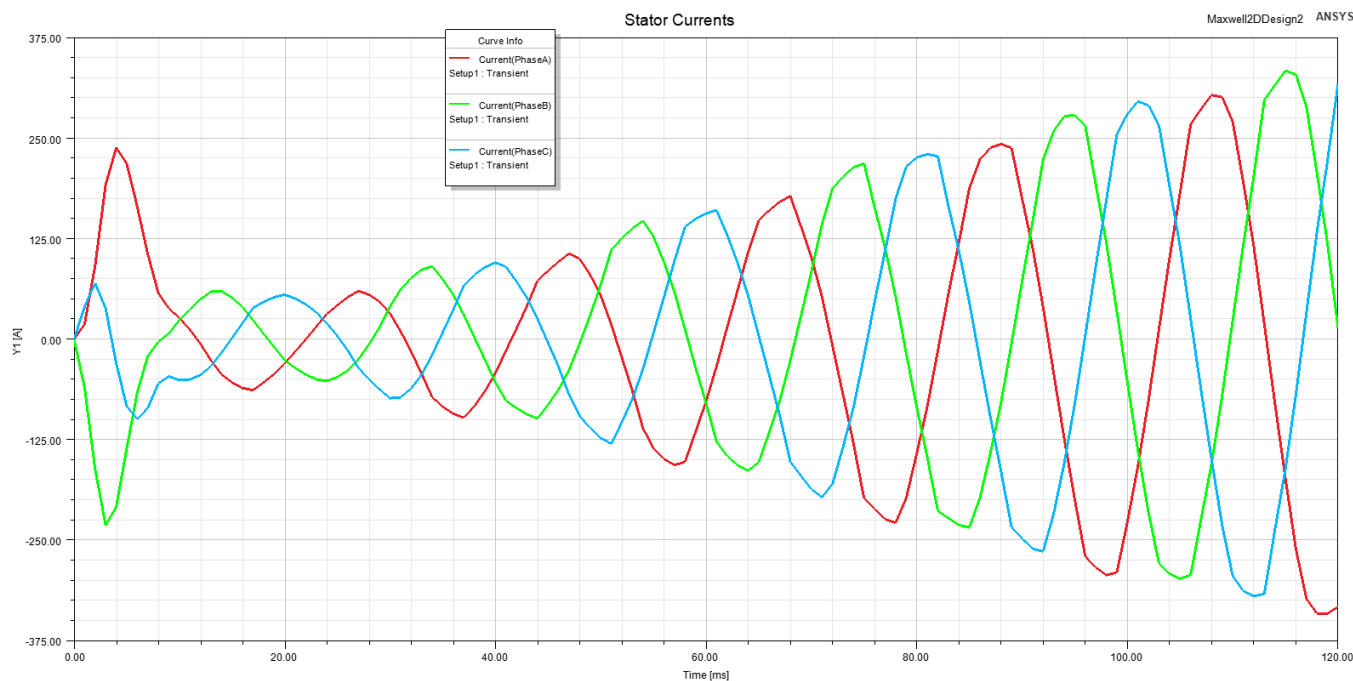


Slika 9.42. Simulacija zaleta motora s teretom od -250 Nm.



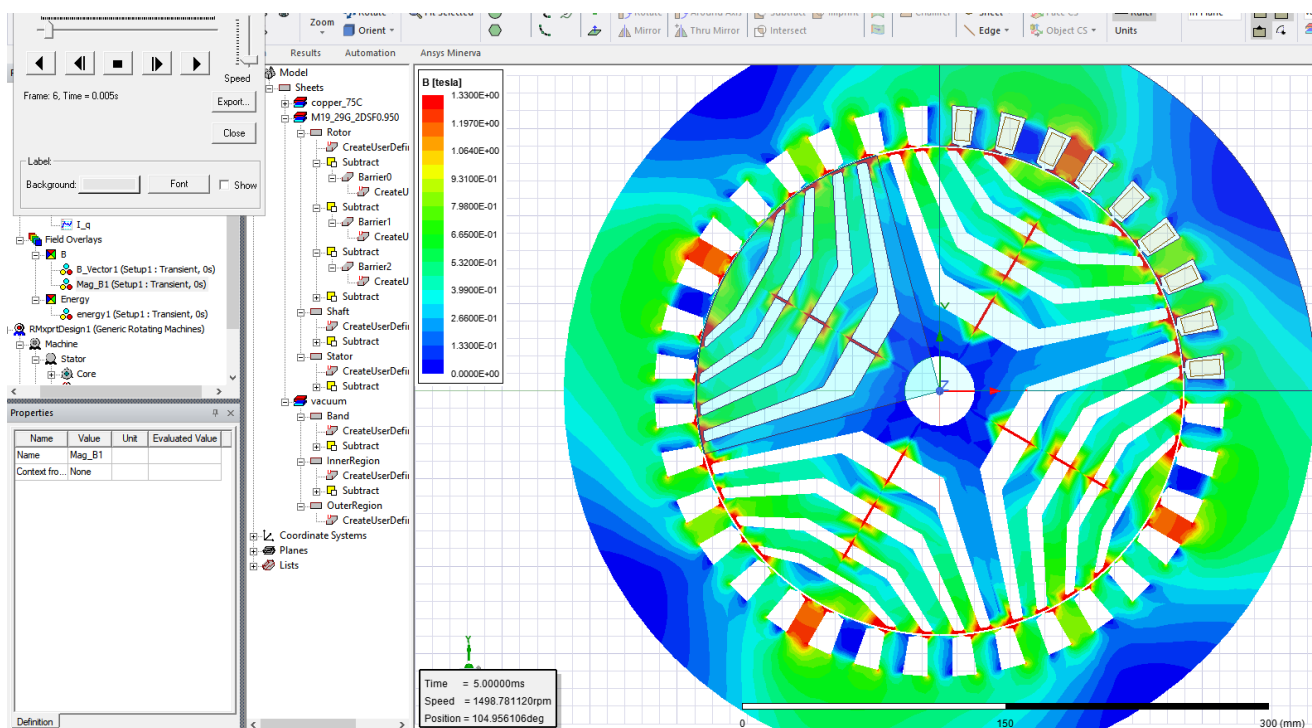
Slika 9.43. Simulacija zaleta motora s teretom od -500 Nm.

Kada promotrimo sliku 9.44. koja prikazuje struje statora zaleta motora sa teretom od -500 Nm vidimo kako smanjenjem brzine motora i povećanjem kuta kašnjenja rotora za statorom pod utjecajem tereta struja motora počinje rasti zato što raste i moment motora što se vidi iz ranije slike momentne karakteristike ovoga motora.

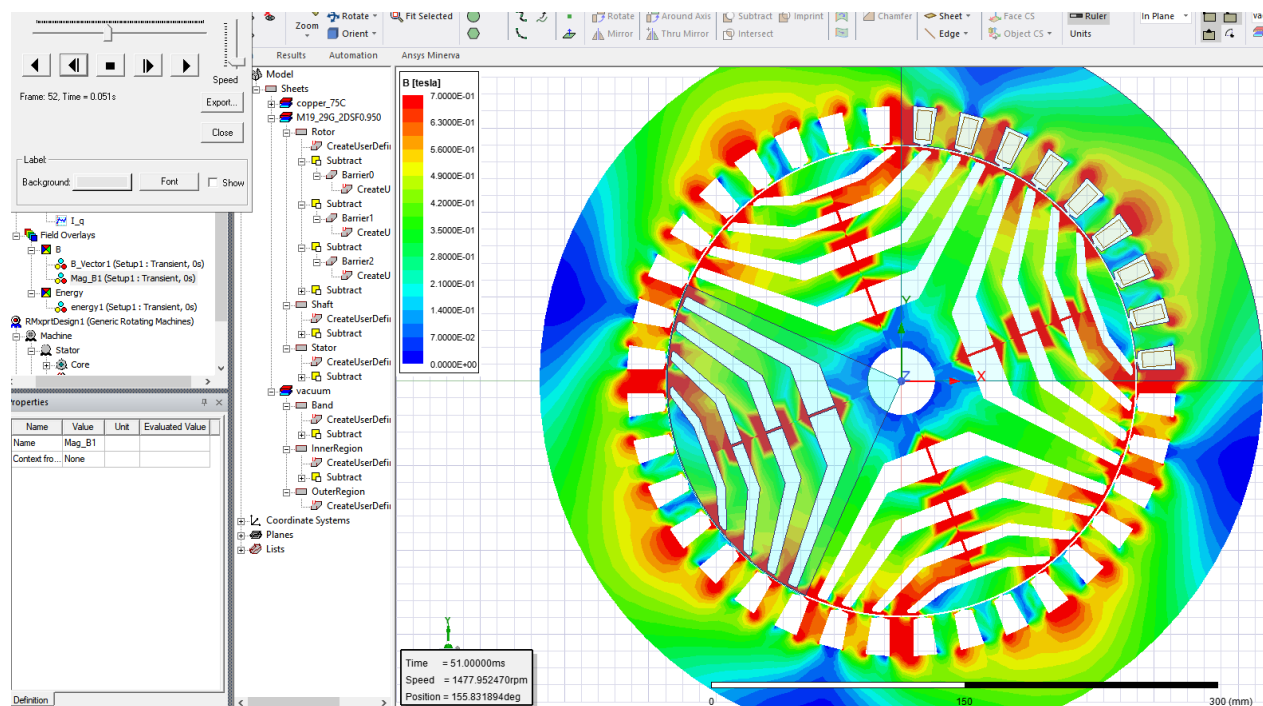


Slika 9.44. Povećanje struja statora kojim se povećava moment da bi motor ostao u sinkronizmu.

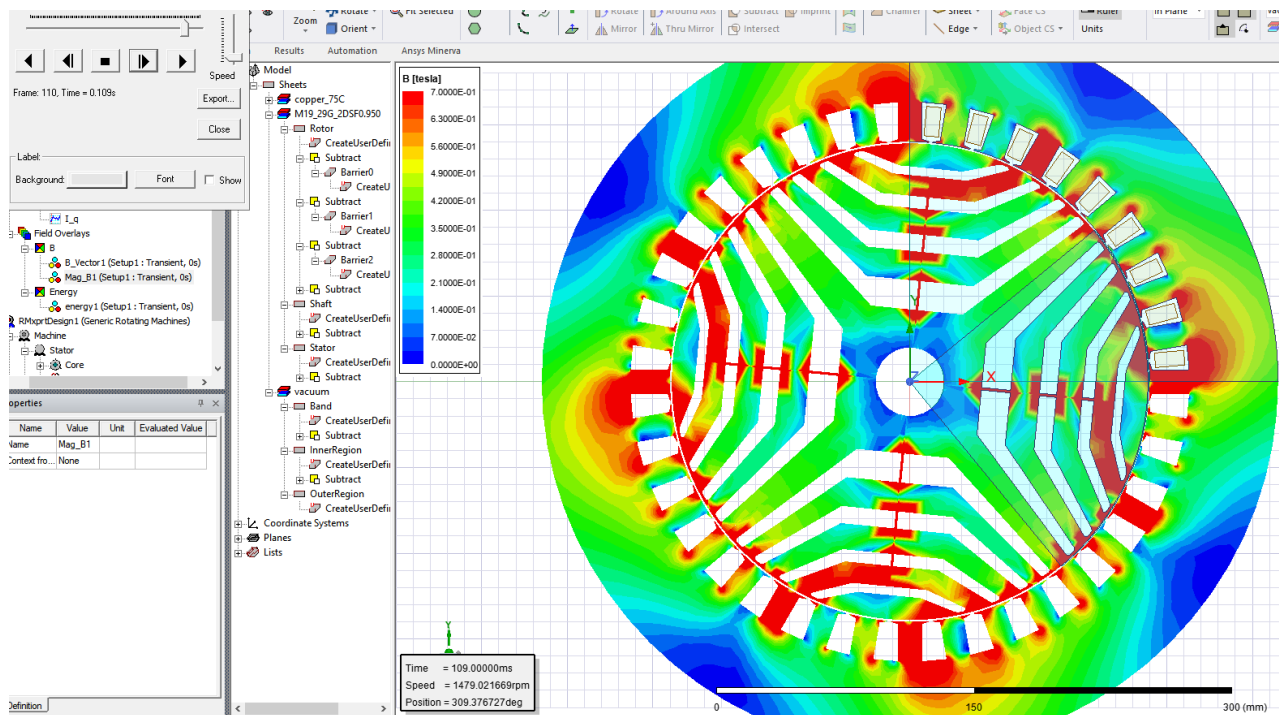
Sada će mo pokrenuti animaciju rada motora gdje će mo vidjeti kako utječu distribuirani namoti na magnetski tok u motoru u odnosu na koncentrirane namote. Utjecaj je vidljiv po tome što je magnetski tok jednolikije raspoređen kroz rotor i stator što za posljedicu ima jednolikije i manje zagrijavanje te na temelju toga bolju učinkovitost i optimalnije korištenje feromagnetskoga materijala rotora. Na slikama 9.45., 9.46. i 9.47. možemo vidjeti raspodjelu magnetskoga toka u motoru za tri vremena i možemo vidjeti da je povećanje magnetskoga toka ravnomjernije u odnosu na DC reluktantni motor gdje se tok i zagrijavanje koncentrira na polove koji su trenutno pod naponom.



Slika 9.45. Početna raspodjela gustoće magnetskoga toka pri zaletu motora.

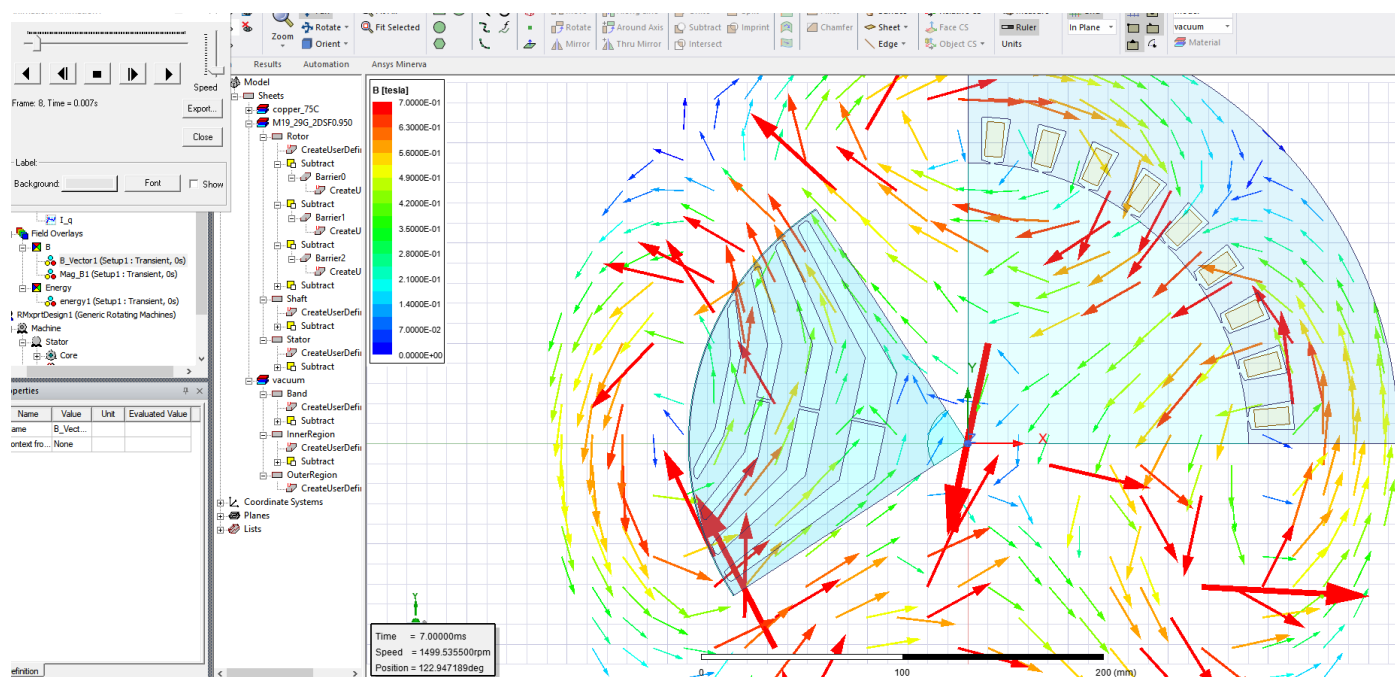


Slika 9.46. Gustoća magnetskog toka u motoru kada počinje rasti moment motora da bi se održao sinkronizam.



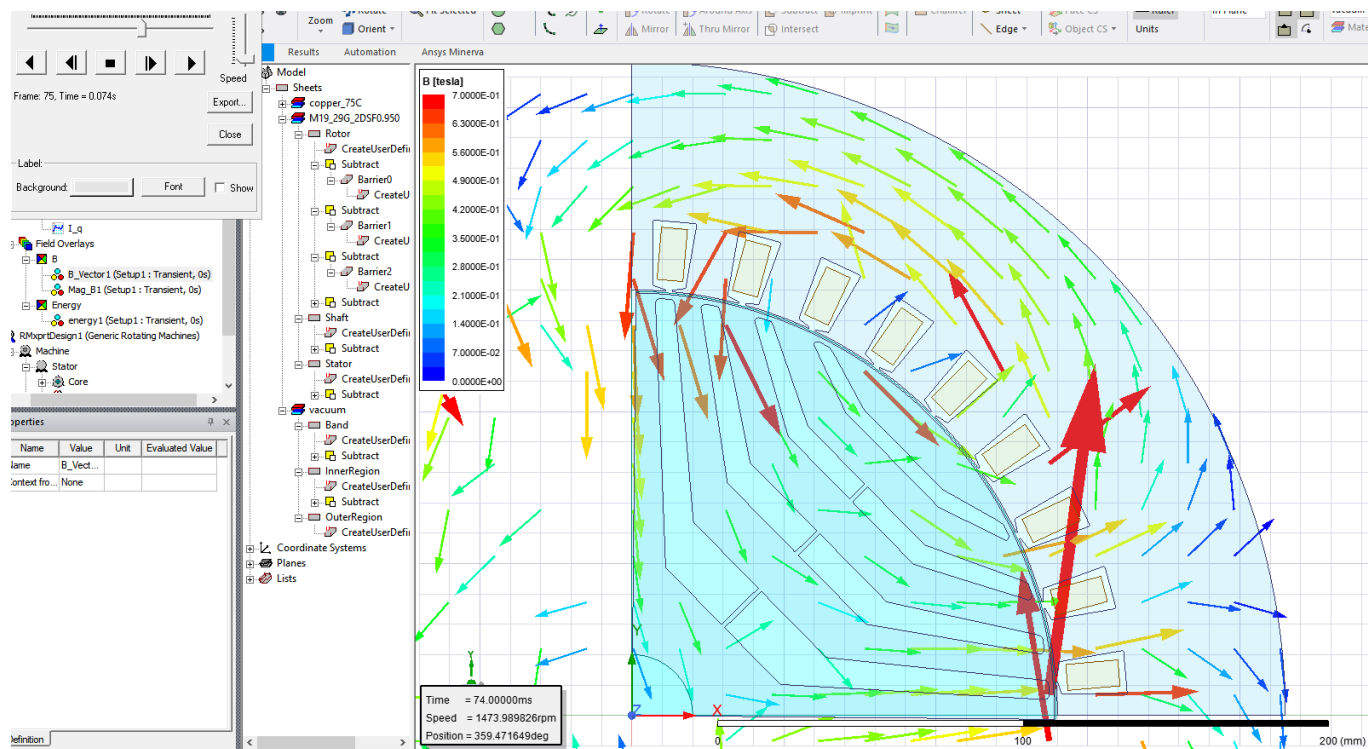
Slika 9.47. Raspodjela gustoće magnetskog toka kroz motor pri maksimalnom kutu opterećenja za zadani teret motora.

Vektorski prikaz magnetskoga toka motora možemo vidjeti na slikama 9.48. i 9.49. na kojima možemo vidjeti drugačiji smjer vektora u odnosu na DC reluktantne motore. Ovdje svaki pol projicira vektore koji imaju kružno gibanje za razliku od pravocrtnog kod DC motora. To uzrokuje veći opseg rotora koji zahvaćaju vektori za razliku od DC motora čime se dobivaju jednolikiji vektori magnetskoga toka. Uz to prikazano je na slikama 9.50. i 9.51. situacija u oscilaciji momenta motora kada moment stagnira ili pada i vidimo da su u tim trenutcima vektori magnetske indukcije vodoravno ili okomito položeni te time ne generiraju moment pošto je za to potreban kut da bih vektor usmjeravao rotor na rotaciju u jednom smjeru.

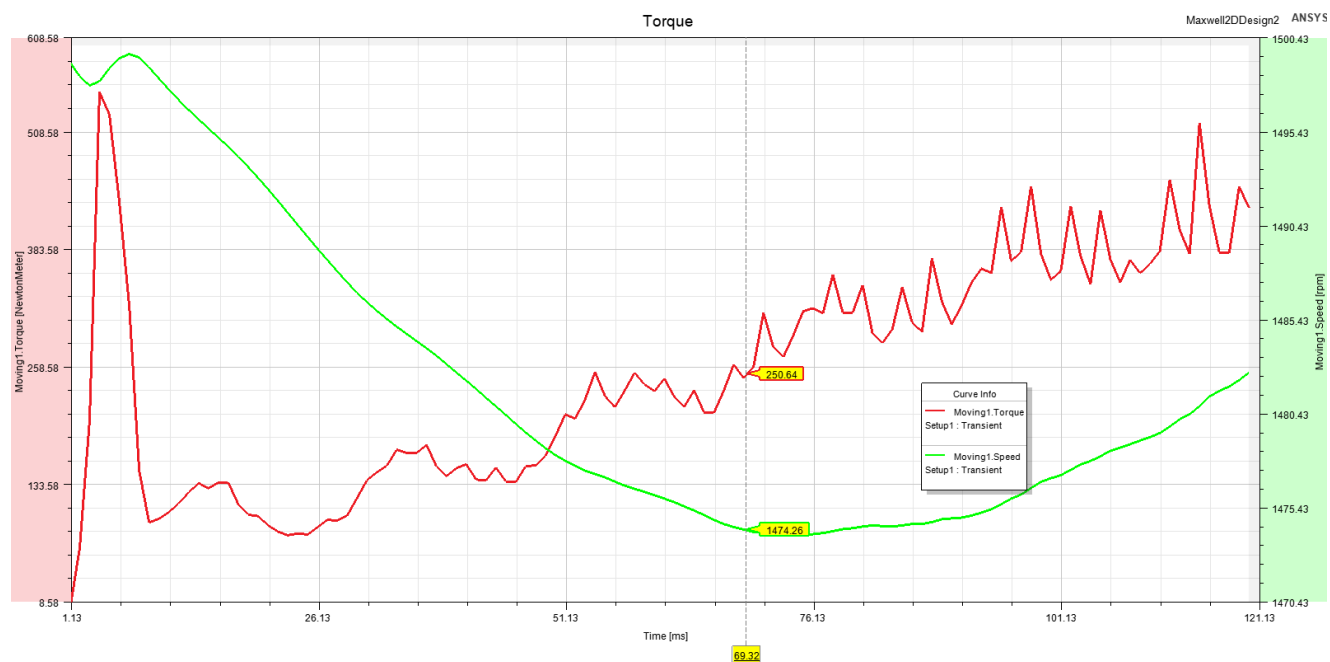


Slika 9.48. Vektorski prikaz gustoće magnetskog toka motora.

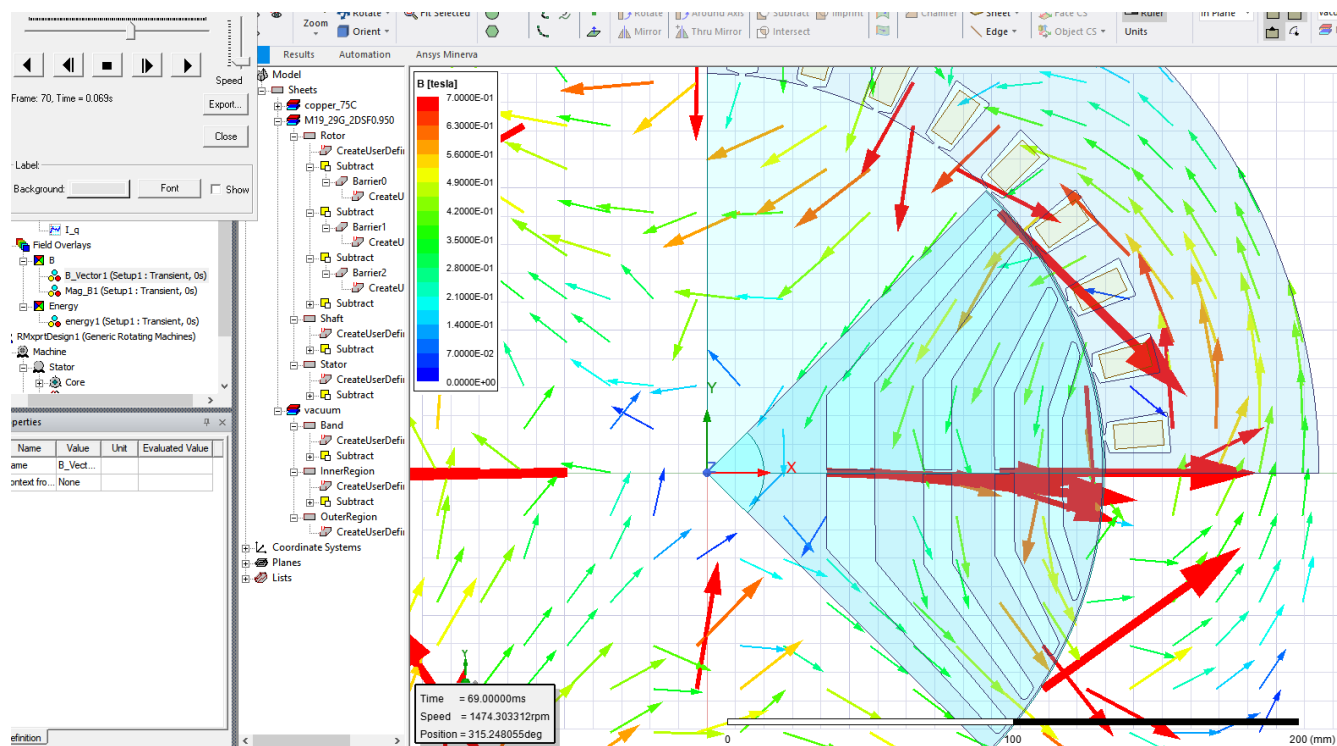
9. SIMULACIJE RADA ELEKTROMOTORA U PROGRAMU ANSYS ELECTRONICS



Slika 9.49. Prikaz vektora gustoće magnetskoga toka koji prolaze vodljivim čeličnim putevima kroz rotor te izlaze nazad u stator.



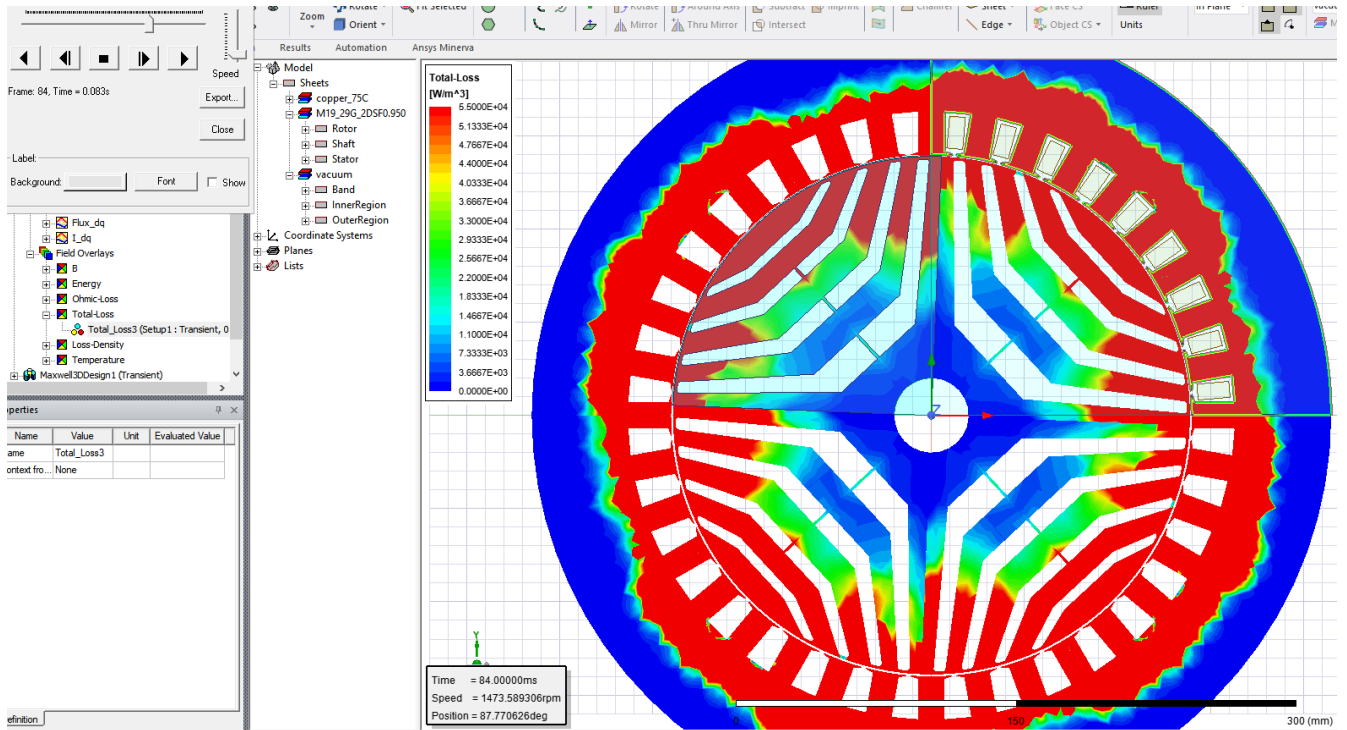
Slika 9.50. Odabir trenutka kada momenta karakteristika opada za promatranje vektora gustoće magnetskoga toka u tome trenutku.



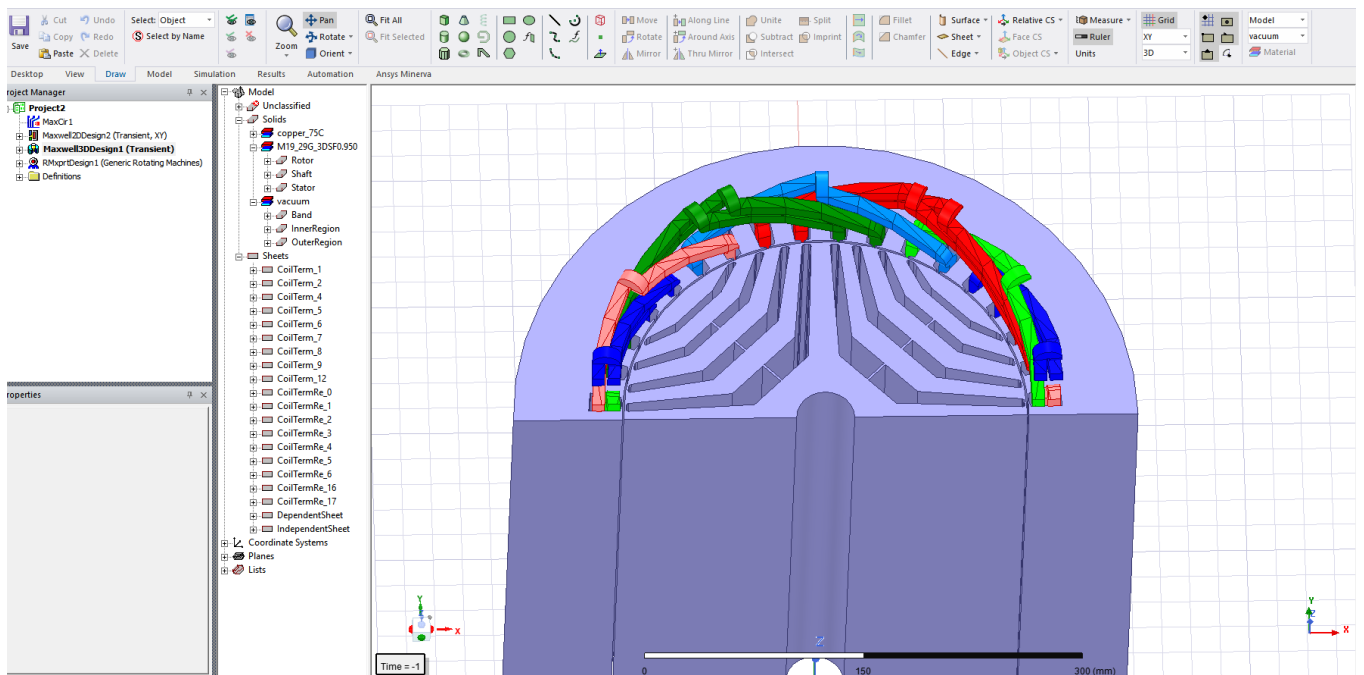
Slika 9.51. Vodoravni vektori magnetske indukcije crvene boje prikazuju u kojemu smjeru se rotor nastoji kretati u slučaju kada je amplituda momenta najmanja rotor se nastoji kretati vodoravno, a ne kružno.

Na kraju će mo slikama 9.52. prikazati raspodjelu ukupnih gubitaka motora u watt-ima po metru kubnom gdje se vidi ravnomjerna raspodjela zagrijavanja motora odnosno njegov 3d model na slici 9.53. iz programa Maxwell 3d gdje vidimo njegov dizajn rotora i namote faza.

9. SIMULACIJE RADA ELEKTROMOTORA U PROGRAMU ANSYS ELECTRONICS



Slika 9.52. Prikaz raspodjele gustoće ukupnih gubitaka motora.



Slika 9.53. Prikaz 3d modela motora iz Maxwell-a 3d.

10. ZAKLJUČAK

Na temelju opisanih motora, upravljanja i odrađenih simulacija zaleta motora gdje smo promatrali magnetske tokove u Ansys Rmxprt-u i Maxwell-u možemo zaključiti da za razliku od koncentriranih namota distribuirani namoti imaju ravnomjernije raspoređen magnetski tok što za posljedicu ima ravnomjernije i manje ukupno zagrijavanje. Kod modeliranja motora jako veliki značaj ima konstrukcija i dizajn rotora koji određuje radne karakteristike motora. Pri zaletima motora vidimo značaj poteznoga momenta i koliko je bitan kod tereta koji se moraju naglo pokrenuti. Za osiguranje najvećeg mogućeg poteznog momenta potrebno je osigurati da je rotor u optimalnoj poziciji s obzirom na stator što se postiže na način da se odredi na koju fazu se prvo mora dovesti napon da bi se dobio maksimalni potezni moment motora zbog optimalnog kuta razmaka od pola rotora. Pri radu motora neizbježne su oscilacije momentna što se smanjuje povećanjem broja polova motora, ali u svakome slučaju određena oscilacija momenta će biti i ona nastaje pri izmjeni faza napajanja koje tvore okretno magnetsko polje.

Simulacijama rada motora i ostalih strojeva možemo predvidjeti njihov rad i smanjiti troškove testiranja i ubrzati pronalaženje rješenja za mane i nedostatke motora u razvoju.

LITERATURA

- [1] Edukacijski materijal, tematska cjelina Farraday-ev zakon, url: <https://www.khanacademy.org/science/physics/magnetic-forces-and-magnetic-fields/magnetic-flux-faradays-law/a/what-is-faradays-law> (13.7.2021.)
- [2] Austin Hughes, Bill Drury, Elsevier Ltd. 2019, Electric Motors and Drives Fundamentals, Types and Applications
- [3] Peter Moreton, Elsevier Ltd. 2000, Industrial Brushless Servomotors
- [4] Edukacijski materijal, Osnove o DC motorima, url: <https://www.testandmeasurementtips.com/basics-of-dc-motors> (13.7.2021.)
- [5] Edukacijski materijal, DC motori s i bez četkica, url: <https://www.monolithicpower.com/en/brushless-vs-brushed-dc-motors> (13.7.2021.)
- [6] Programske tehnike za dizajniranje učinkovitih motora, url: <https://www.embedded.com/software-techniques-for-building-more-efficient-motor-control-designs/> (13.7.2021.)
- [7] John Mouton, Osnove DC motora s četkicama, <https://www.embedded.com/software-techniques-for-building-more-efficient-motor-control-designs/> (13.7.2021.)
- [8] DC motori s rotorom bez željezne jezgre, url: <https://www.automate.org/products/moons-industries-inc/coreless-brushed-dc-motors> (13.7.2021.)
- [9] Yuchen Zhang, Ruiqing Ma, Tianxing Li, Yaoting Xue, Journal of Physics: Conf. Series 1074 (2018) 012053, MEIE 2018, Commutation point correction method of sensorless BLDC motor based on back emf detection
- [10] Chang-liang Xia, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. 2012. PERMANENT MAGNET BRUSHLESS DC MOTOR DRIVES AND CONTROLS
- [11] Edukacijski materijal, opis trofaznih naponskih sustava, url: <https://electrical-engineering-portal.com/single-phase-power-vs-three-phase-power/> (13.7.2021.)
- [12] Edukacijski materijal, vrste koračnih motora, url: <https://www.youtube.com/watch?v=Qc8zcst2blU> (13.7.2021.)
- [13] Edukacijski matarija, Servo motori i uporaba, url: <https://www.electricaltechnology.org/2019/05/servo-motor-types-construction-working.html> (13.7.2021.)
- [14] Bapayya Naidu Kommula, Venkata Reddy Kota, Department of Electrical and Electronics Engineering, Jawaharlal Nehru Technological University Kakinada, A.P, India, September

-
- 2018, Direct instantaneous torque control of Brushless DC motor using fireflyAlgorithm based fractional order PID controller
- [15] Kontrola Servo Motora sa Stm32f103, url: <https://www.engineersgarage.com/interfacing-servo-motor-with-stm32/> (13.7.2021.)
- [16] Edukacijski materijal, Složenost kontrola rada DC reluktantni motora, url: <https://www.motioncontroltips.com/faq-switched-reluctance-motors-srms-difficult-control/> (13.7.2021.)
- [17] Edukacijski materijal, vrste koračnih motora, url: <https://www.linearmotiontips.com/stepper-motors-differences-between-permanent-magnet-variable-reluctance-and-hybrid-types/> (13.7.2021.)
- [18] Myjessie Songkin, N. N. Barsoum, Farrah Wong, P. Y. Lim, Faculty of Engineering Universiti Malaysia Sabah Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia, 2017 IEEE 2nd International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems, A Study on Sabah Grid System Stability
- [19] Zhao, J., Liu, Y., Xu, X. (2018), Comparisons of Concentrated and Distributed Winding PMSM in MV Power Generation, 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM):2437-2443, url: https://research.chalmers.se/publication/508023/file/508023_Fulltext.pdf (13.7.2021.)
- [20] Edukacijski materijal, što su distribuirani i koncentrirani namoti, url: <https://www.electrical4u.net/electrical-basic/what-is-distributed-winding-concentrated-winding/> (13.7.2021.)
- [21] Slika sinkronog generatora s 1 parom polova rotora, url: <https://www.wzk24.de/stromaggregat-e/stromaggregat-zubehoer/1036119614/spule-strom-generator-stator-rotor-fuer-stromerzeug-er-13-ps-1-phase-von-detec.> (25.7.2021.)
- [22] Fang Qi, Daniel Scharfenstein, Claude Weiss, Institute for Power Electronics and Electrical Drives, RWTH Aachen University, Motor Handbook, version 2.1, release date:12.3.2019., url:https://www.infineon.com/dgdl/Infineonmotorcontrol_handbookAdditionalTechnicalInformation-v01_00EN.pdf?fileId=5546d4626bb628d7016be6a9aa637e69 (13.7.2021.)
- [23] Sanjay Jain, Department Of EE/EX, Single Phase Induction Motor
- [24] Ayman M. EL-Refaie, Thomas M. Jahns, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 41, NO. 3, MAY/JUNE 2005, Optimal Flux Weakening in Surface PM Machines Using Fractional-Slot Concentrated Windings
- [25] Edukacijski material, histerezni motori, url: <https://www.slideshare.net/DivyaKritika/hysteresis-motor-77441952> (1.9.2021.)
-

- [26] Edukacijski materijal, Histerezni motori, url: <https://www.theengineeringknowledge.com/hysteresis-motor-working-principle-applications/> (1.9.2021.)
- [27] Gerry Oscarson, Jack Imbertson, Ben Imbertson, Steve Moll, The ABC's of Synchronous Motors, WEG Electric Corp., url: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hfe/hf4/WEG-the-abcs-of-synchronous-motors-usaem200syn42-brochure-english.pdf> (1.9.2021.)
- [28] Adhavan Balashanmugham and Mockaisamy Maheswaran, Permanent-Magnet Synchronous Machine Drives, September 6th 2019, url: <https://www.intechopen.com/chapters/68961> (1.9.2021.)
- [29] Edukacijski material, asinkroni motori s kliznim prstenovima, url: <https://come4concepts.com/slip-ring-induction-motor-in-detail/> (1.9.2021.)
- [30] Edukacijski material, razlog zakrivljenih rotorskih šipki asinkronih motora, url: <https://www.electricalvolt.com/2019/03/why-are-rotor-bars-skewed-in-an-induction-motor/> (1.9.2021.)
- [31] Edukacijski materijal, kontroleri rada DC motora, url: <https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/dc-motor-controllers/> (1.9.2021.)
- [32] Xianhu Gao, BLDC Motor Control with Hall Sensors Based on FRDM-KE02Z, Document Number:AN4776, url: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN4776.pdf> (1.9.2021.)
- [33] Edukacijski materijal, uporaba frekvencijskih pretvarača url: <http://www.vfds.org/variable-voltage-inverter-361096.html> (1.9.2021.)
- [34] Edukacijski materijal, implementacija frekvencijskih pretvarača za rad motora, url: <https://www.motioncontroltips.com/what-are-methods-for-vfd-control-of-ac-motors/> (1.9.2021.)
- [35] Formula za moment asinkronih motora, url: <https://come4concepts.com/induction-motor-starting-torque-equation/> (1.9.2021.)
- [36] Edukacijski materijal, sinkroni motor s pomoćnim motorom za zalet, url: <https://www.practicalmachinist.com/vb/gunsmithing/south-bend-9-40-a-262564/> (5.9.2021.)
- [37] Edukacijski materijal, kavezni zalet sinkronog motora s elektromagnetima, url: <https://seminar topics.info/engineering-topics/electrical-topics/ac-synchronous-generators/> (1.9.2021.)
- [38] Edukacijski materijal, histerezni motor slika, url: <https://www.yourelectricalguide.com/2017/01/hysteresis-motor.html> (6.9.2021.)
- [39] Edukacijski materijal, petlje histereze, url: https://www.homofaciens.de/technics-electrical-engineering-ferromagnetic-materials_en.htm (6.9.2021.)

-
- [40] Gallicchio Gianvito, Palmieri Marco, Di Nardo Mauro, Cupertino Francesco, Mdpi energies article, 2019, Fast Torque Computation of Hysteresis Motors and Clutches Using Magneto-static Finite Element Simulation (6.9.2021.)
- [41] Edukacijski materijal, slika sinkronog reluktantnog motora, url: <https://new.siemens.com/global/en/products/drives/topic-areas/reluctance-drive-system.html> (6.9.2021.)
- [42] Edukacijski materijal, Princip rada AC reluktantnog motora, url: <https://www.youtube.com/watch?v=vvw6k4ppUZU> (6.9.2021.)
- [43] Slika sinkronog motora s umetnutim magnetima, JD Engineering Works product, JDPM PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR, www.pmsgen.com (6.9.2021.)
- [44] Jacek F. Gieras, Ezio Santini, and Mitchell Wing, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 34, NO. 5, SEPTEMBER 1998., Calculation of Synchronous Reactances of Small Permanent-Magnet Alternating-Current Motors: Comparison of Analytical Approach and Finite Element Method with Measurements, url: https://www.researchgate.net/publication/3100873_Calculation_of_synchronous_reactances_of_small_permanentmagnet_alternatingcurrent_motors_Comparison_of_analytical_approach_and_finite_element_method_with_measurements (6.9.2021.)
- [45] Tablica s podacima o vrstama elektromotra koje se koriste, url: <https://www.electricmotorengineering.com/synchronous-reluctance-motor-a-rare-earth-free-solution-for-electric-vehicles/> (7.9.2021.)
- [46] Bulent Sarlioglu, Casey T. Morris, Di Han, Silong Li, Wisconsin Electric Machines and Power Electronics Consortium (WEMPEC) University of Wisconsin-Madison Madison, WI 53706 USA, 2015, Benchmarking of Electric and Hybrid Vehicle Electric Machines, Power Electronics, and Batteries
- [47] Edukacijski materijal, Tesla model 3 motor video principa rada, url: <https://www.youtube.com/watch?v=esUb7Zy5Oio> (7.9.2021.)
- [48] Edukacijski materijal, osnovni principi rada i kontrole asinkronih motora, url: https://www.youtube.com/watch?v=AQqyGNOP_3o (7.9.2021.)
- [49] Nobuyuki Kurita, Takeo Ishikawa, Genri Suzuki, Mechanical Engineering Journal, © The Japan Society of Mechanical Engineers Proposal of a magnetically levitated shaded pole induction motor, Publication date : 8 December, 2015, url: https://www.researchgate.net/publication/286397354_Proposal_of_a_magnetically_levitated_shaded_pole_induction_motor (7.9.2021.)
- [50] Edukacijski materijal, karakteristike servo motora, url: <https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/technology/speed-torque-curves-for-stepper-motors.html> (9.9.2021.)
-

- [51] Edukacijski materijal, trofazni asinkroni motor, url: <https://www.youtube.com/watch?v=yPvYd03cKJU> (12.9.2021.)
- [52] Slika elektromotora, url: <http://www.electromotors.ca/image-gallery/wound-rotor-motors/> (12.9.2021.)
- [53] Edukacijski materijal, opis motora s kliznim prstenovima, url: <https://www.youtube.com/watch?v=70bOVCWxs78> (12.9.2021.)
- [54] Edukacijski materijal, Dr. Suad Ibrahim Shahl, Electrical machines 2, url: https://www.academia.edu/6802781/I_Introduction_to_AC_Machine_II_Synchronous_Generators_III_Synchronous_Motors_IV_Three_Phase_Induction_Machines_V_Three_Phase_Induction_Motors_VI_Induction_Generators_VII_Induction_Regulators (12.9.2021.)
- [55] Edukacijski materijal, motor s dvostrukim kavezom, url: <https://beingelectricalengineer.blogspot.com/2018/05/double-cage-induction-motor-working-and.html> (12.9.2021.)
- [56] Edukacijski materija, opis kontrole servo motora, url: <https://www.cypress.com/applications/home-appliances/servo-motor-speed-control> (12.9.2021.)
- [57] Edukacijski materijal, kontrola zaleta asinkronog motora skalarnom metodom, url: <https://www.semanticscholar.org/paper/Loop-Speed-Control-of-Induction-Motor-using-V-%2F-F-Alizadeh-Masoumi/5a839c9a19cd466f3c3895509dae8c28a4b3aadf> (12.9.2021.)
- [58] Jacek F. Gieras, Mitchell Wing, Marcel Dekker, 2002, Permanent magnet motor technology: design and applications

SAŽETAK

U diplomskome radu opisani su DC motori sa i bez četkica te navedena njihova podjela i opisan princip rada. Isto to je napravljeno za sinkrone i asinkrone motore. Za svaki motor je prikazana građa te na kraju navede mane pojedinih motora. Objašnjenje su metode kontrole DC i AC motora i objašnjen princip na koji oni generiraju napon potreban motoru za stvaranje okretnoga magnetskoga polja. Simulacijama u Ansys-u dobili smo karakteristike zaleta motora odabranih tako da pokrijemo sve kategorije motora, a to su: DC, AC sinkroni i AC asinkroni. Na temelju dobivenih grafova zaleta donosimo zaključke o radu motora i potvrđujemo opisane karakteristike rada motora opisane u teorijskome dijelu. Uspoređujemo karakteristike zaleta DC i AC reluktantnih motora da bih vidjeli kako promjena konstrukcije i vrste napajanja utječe na radne karakteristike motora.

Ključne riječi: elektromotor, rotor, stator, namoti, magnetski tok, moment, trajni magnet, sinkroni, asinkroni, upravljanje, kontrola

ABSTRACT

The diploma thesis describes DC motors with and without brushes and states their division and describes the principle of operation. The same is done for synchronous and asynchronous motors. For each engine, the material is shown and at the end it lists the shortcomings of individual engines. The explanation is the methods of controlling DC and AC motors and the principle on which they generate the voltage required by the motor to create a rotating magnetic field is explained. Simulations in Ansys gave the motor start characteristics selected to cover all motor categories, namely: DC, AC synchronous and AC asynchronous. Based on the obtained start-up graphs, we draw conclusions about the operation of the engine and confirm the described characteristics of the engine operation described in the theoretical part. We compare the starting characteristics of DC and AC reluctant motors to see how a change in design and type of power supply affects the performance of the motor.

Keywords: electric motor, rotor, stator, windings, magnetic flux, torque, permanent magnet, synchronous, asynchronous, control, monitoring

ŽIVOTOPIS

Karlo Marković rođen je 7. Svibnja 1997. Godine u Slavonskome Brodu. U Sikirevcima 2011. Godine završava osnovnu školu "Sikirevci". Iste godine upisuje Tehničku školu Slavonski Brod koju je završio 2015. godine. Naposljetku nakon mature upisuje Elektrotehnički fakultet Osijek preddiplomski studij smjer energetika, a nakon toga i diplomski studij na FERIT-u smjer elektroenergetski sustavi.

U Osijeku, rujan 2021.

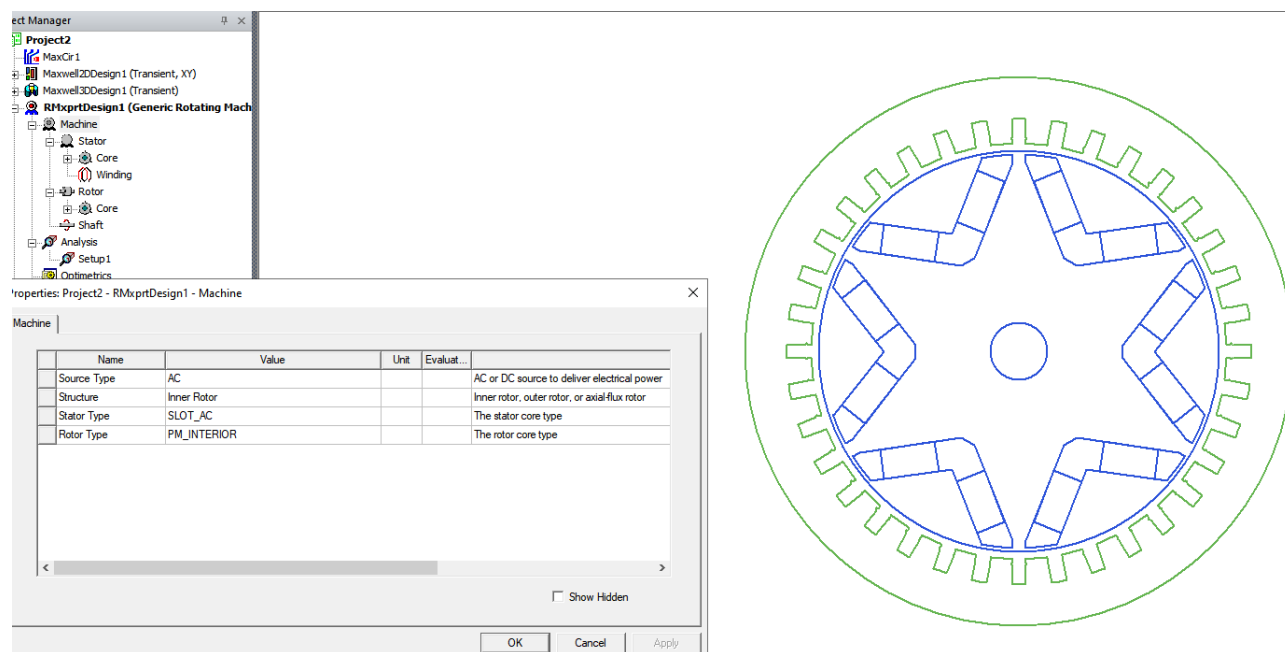
Karlo Marković

Potpis: _____

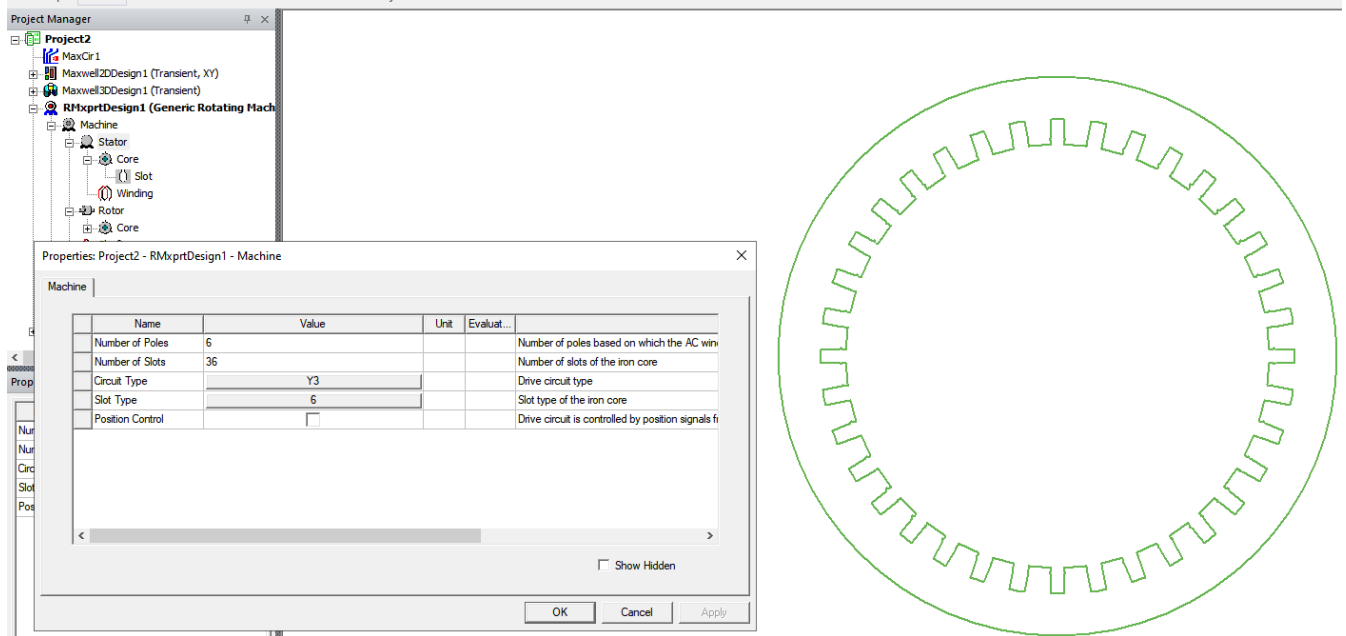
PRILOG P.6.4.

Simulacija rada AC sinkronih reluktantnih motora s umetnutim magnetima

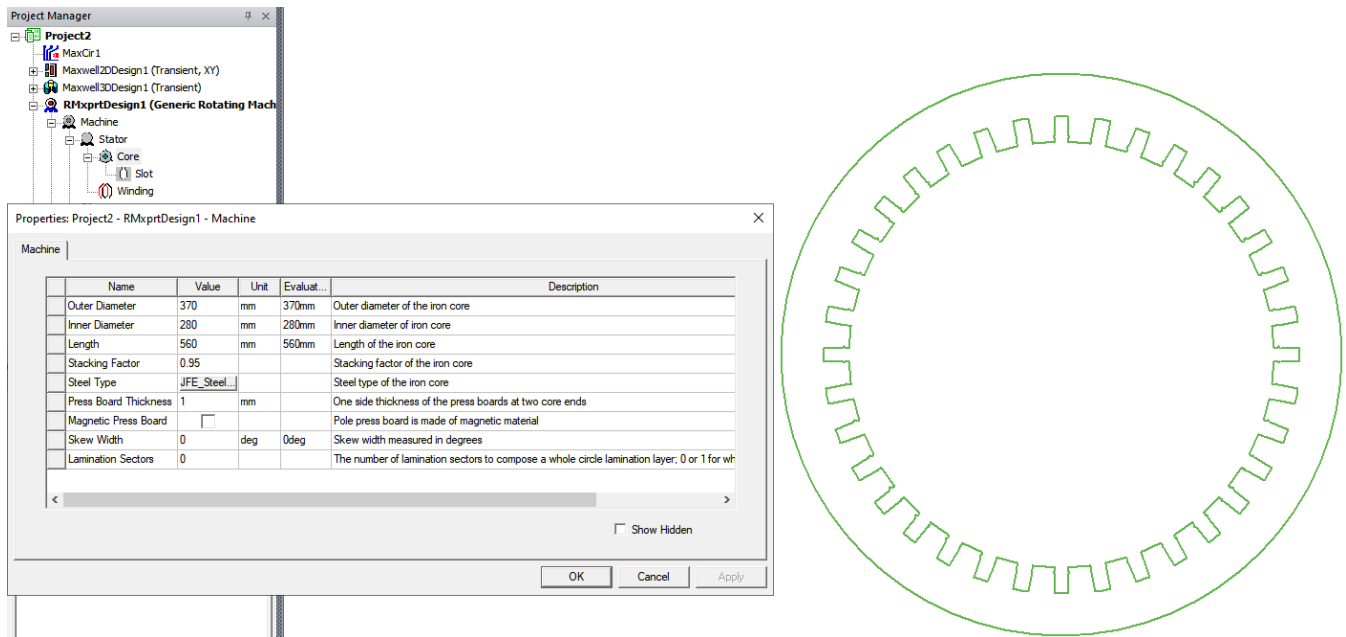
Ovi motori imaju moment iz dva izvora što ćemo i vidjeti iz statičke momentne karakteristike koju će mo dobiti u Rmxprt. Prvi izvor momenta je reluktantni moment koji nastaje prolaskom silnica magnetskog polja kroz rotor s tendencijom da ostvari najmanju reluktanciju koja se ostvaruje tako što se rotor povlači u poziciju kada su poravnati statorski pol i rotorski pol. Drugi izvor momenta je moment magnetskoga povezivanja statorskih polova s rotorskim umetnutim magnetima. Položaj kada su rotorski magnetski polovi zaključani s statorskim i kada je moment iz ovoga izvora nula je kada se statorski pol nalazi između južnoga i sjevernoga magnetskoga pola rotora. Kada je motor u tome položaju magnetske silnice statorskog magnetskoga polja se zatvaraju u magnetima koji su umetnuti u proreze rotora. Ovakva konstrukcija omogućuje motoru veću specifičnu momentnu karakteristiku u odnosu na obični reluktantni motor i veću učinkovitost. Motor je dimenzioniran u Ansys Rmxprt-u na temelju podataka motora proizvođača Toshiba model TAYL FCKW dimenzija serijskoga koda 180M. Postupak kreiranja motora u program Rmxprt prikazan je na slikama P.6.4.1. - P.6.4.8.



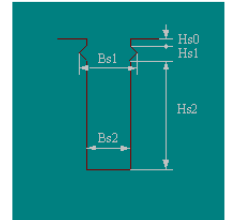
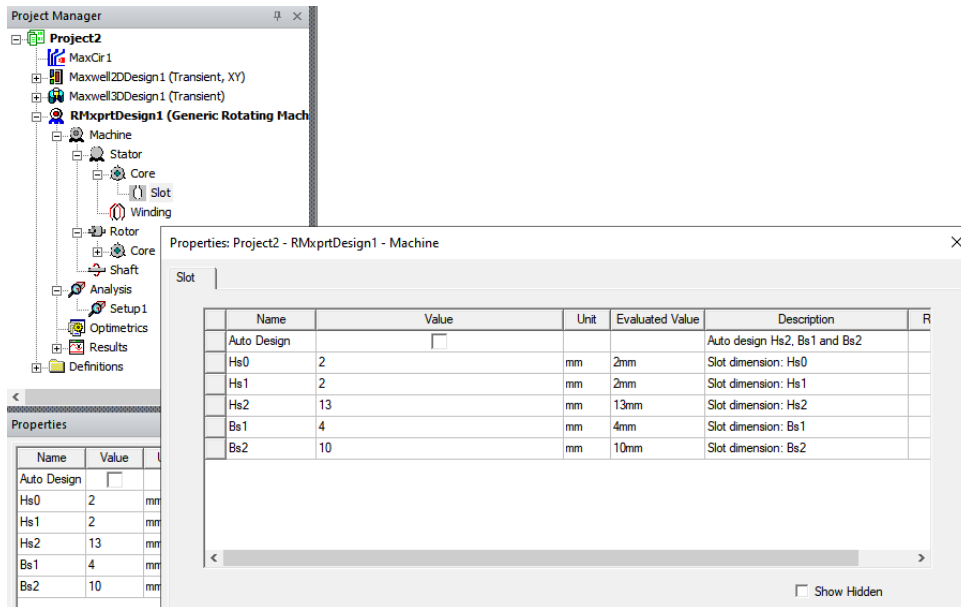
Slika P.6.4.1. Odabir tipa motora za modeliranje.



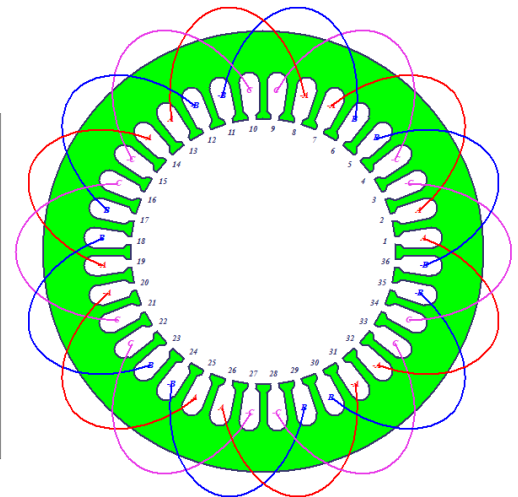
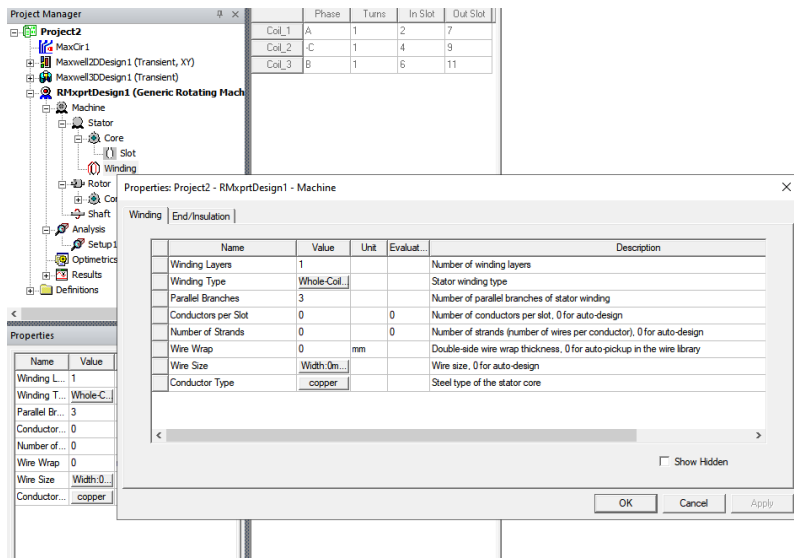
Slika P.6.4.2. Određivanje građe statora motora.



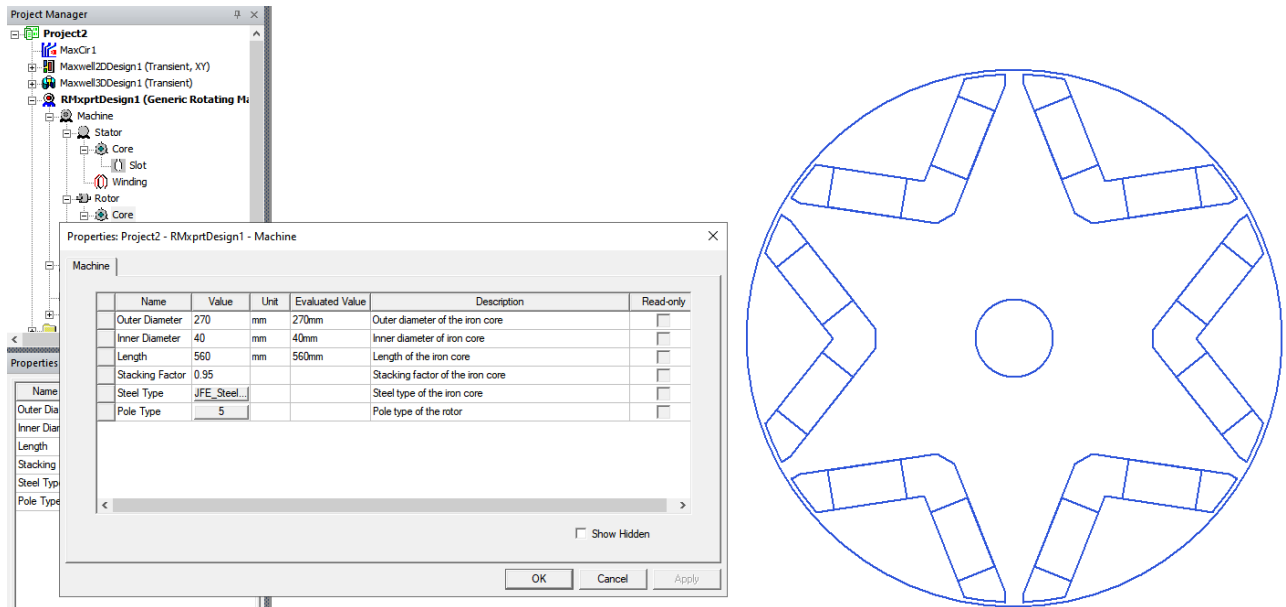
Slika P.6.4.3. Dimenzioniranje statora motora.



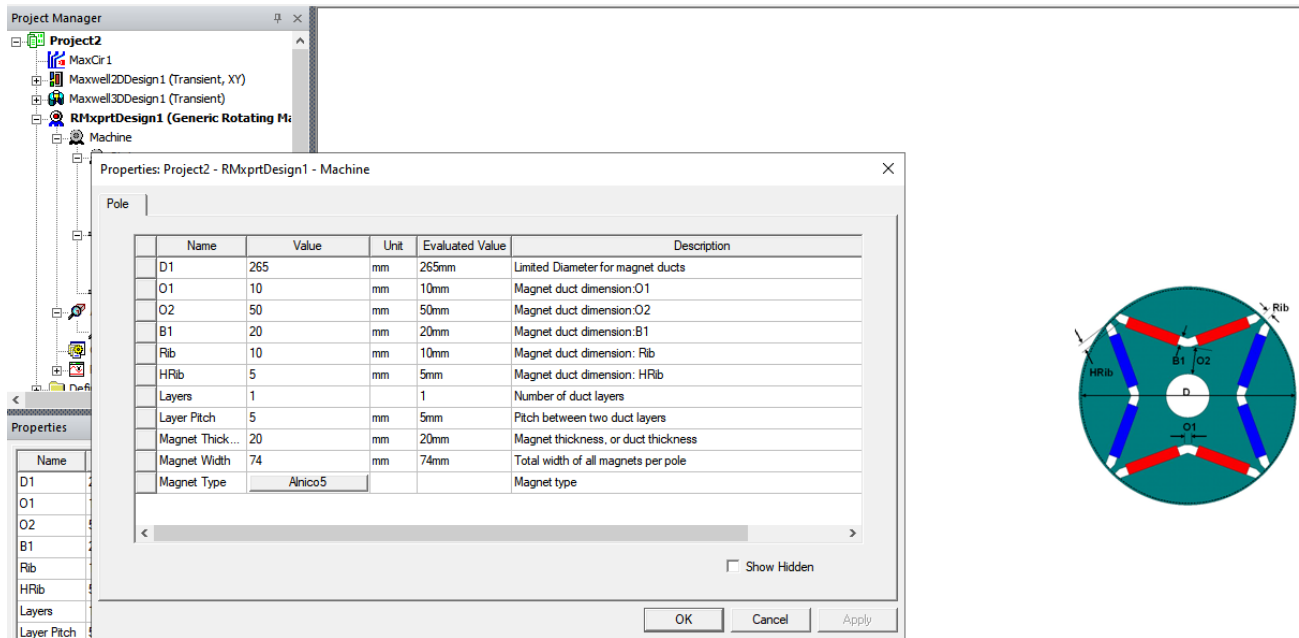
Slika P.6.4.4. Dimenzioniranje statorskih utora za namote.



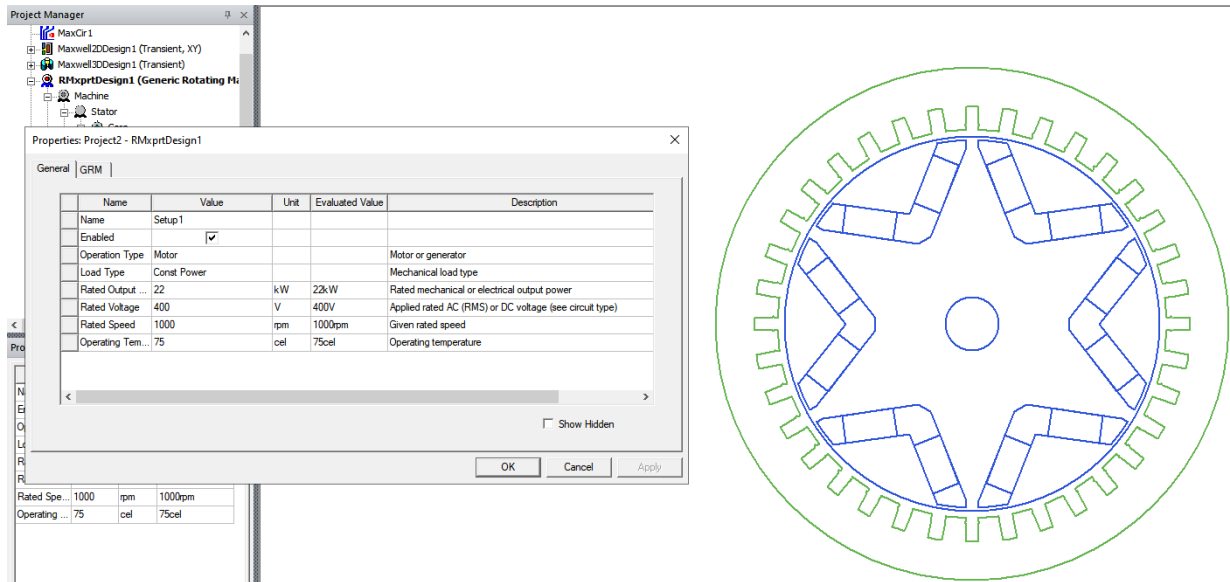
Slika P.6.4.5. Modeliranje namota statora.



Slika P.6.4.6. Dimenzioniranje rotora motora.

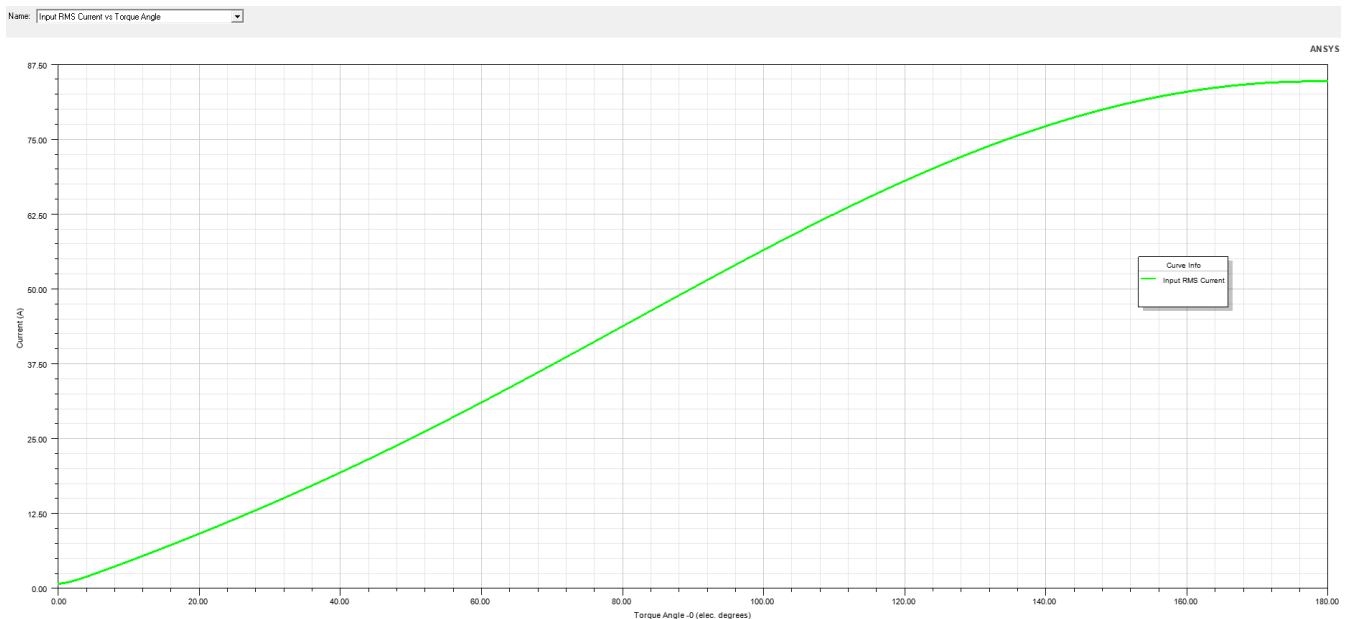


Slika P.6.4.7. Dimenzioniranje rotorskih proreza za magnet.

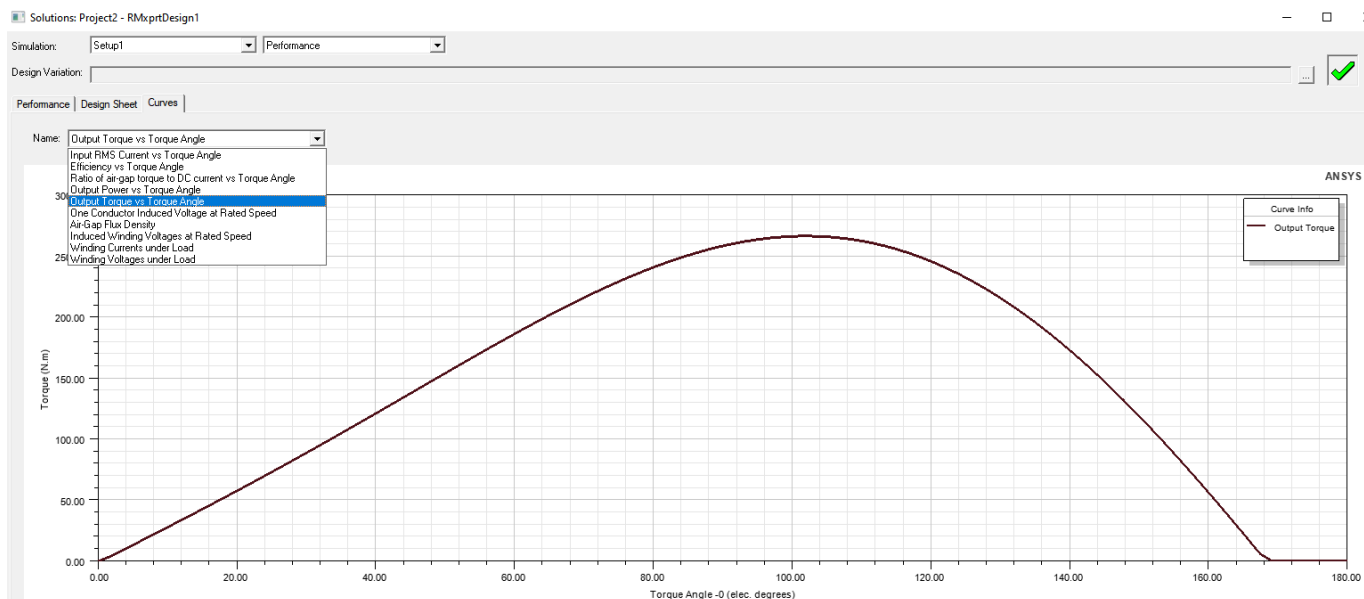


Slika P.6.4.8. Unošenje nazivnih podataka motora.

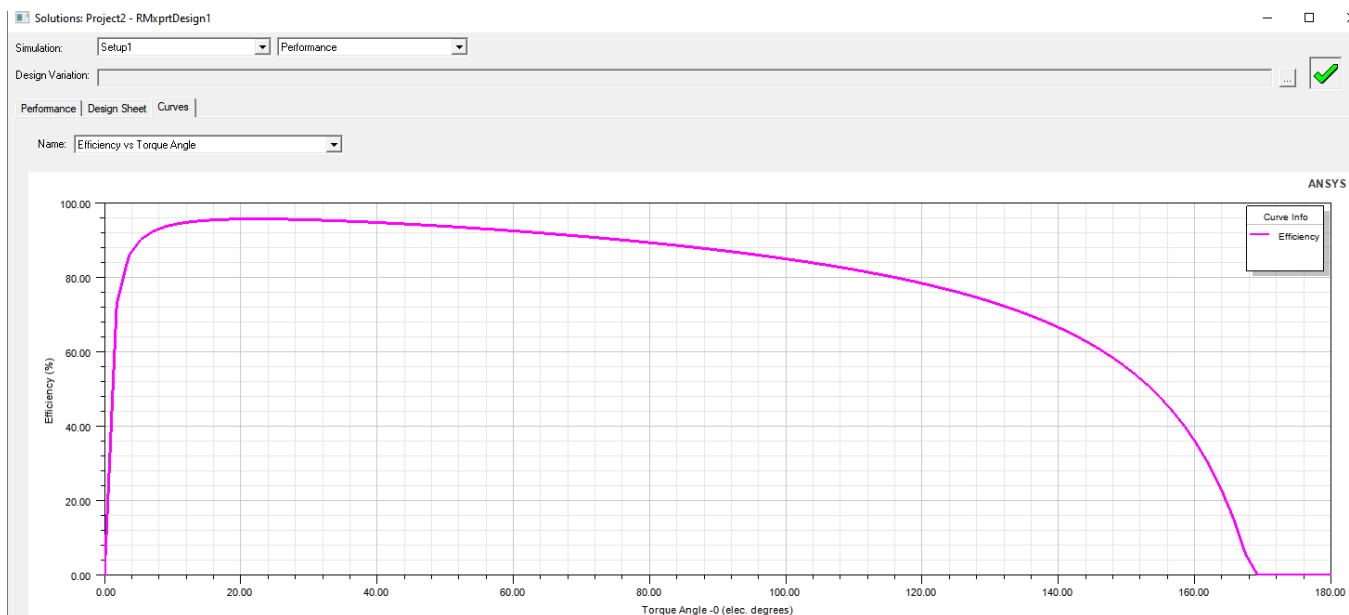
Kada je motor dizajniran pokrećemo analizu napravljenoga modela i njegovih parametara koje smo zadali te na temelju toga dobivamo statičke karakteristike motora, a neke od njih prikazane su na slikama P.6.4.9., P.6.4.10. i P.6.4.11.



Slika P.6.4.9. Graf statorske struje motora.



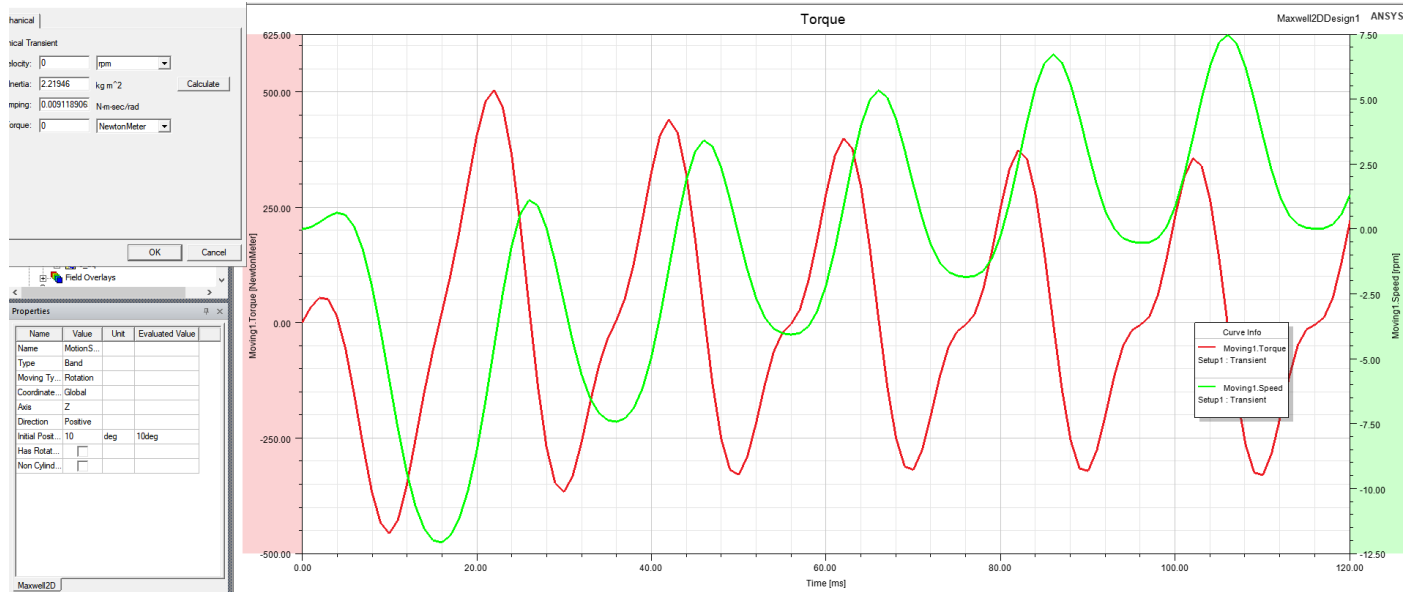
Slika P.6.4.10. Statička momentna karakteristika motora u ovisnosti o električnome kutu.



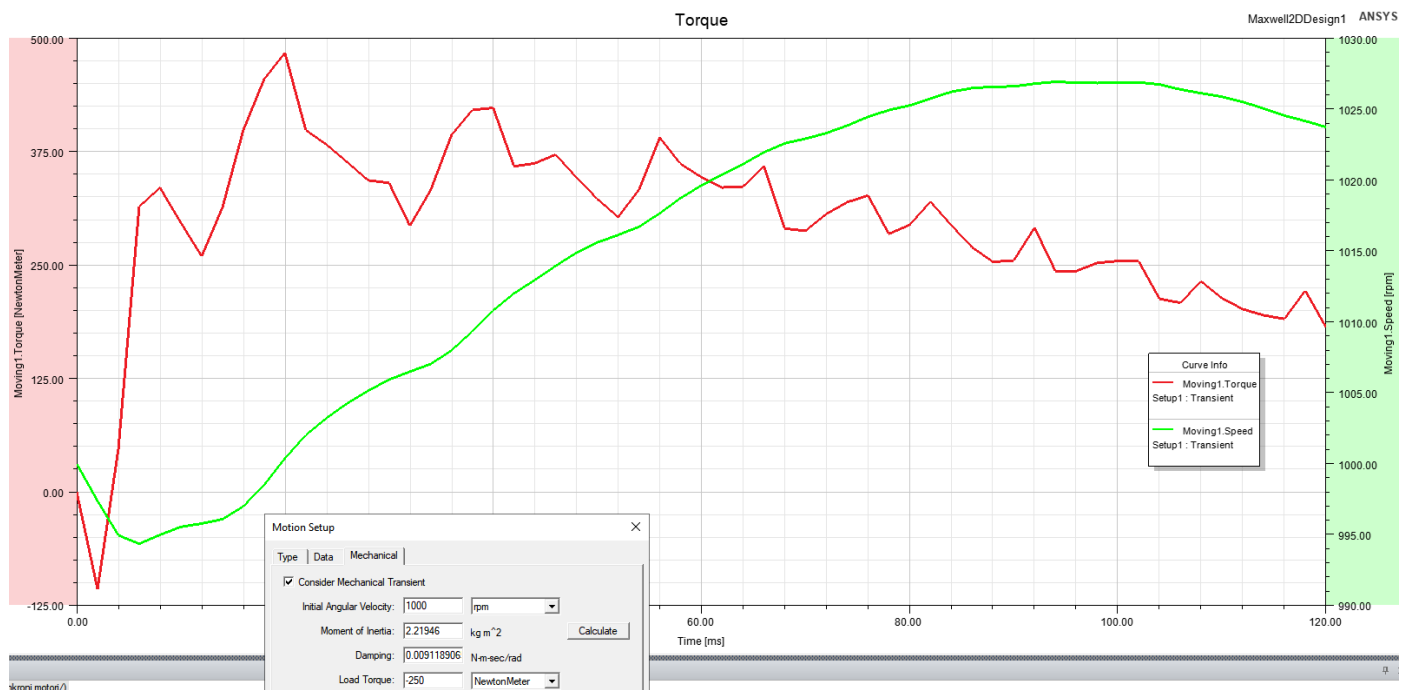
Slika P.6.4.11. Graf učinkovitosti motora.

Na temelju dobivenih statičkih karakteristika možemo vidjeti kakve su njegove nazivne karakteristike u idealnim uvjetima. Nakon ovoga prebacujemo model u Maxwell 2d gdje će mo napraviti simulacije zaleta motora pri različitim brzinama i teretima te vidjeti kako se mijenjaja moment motora tijekom zaleta. Rezultati simulacija prikazani su na sljedećim slikama od P.6.4.12.- P.6.4.15. gdje će mo vidjet kako se moment motora mijenja od situacije zaleta bez tereta s brzinom

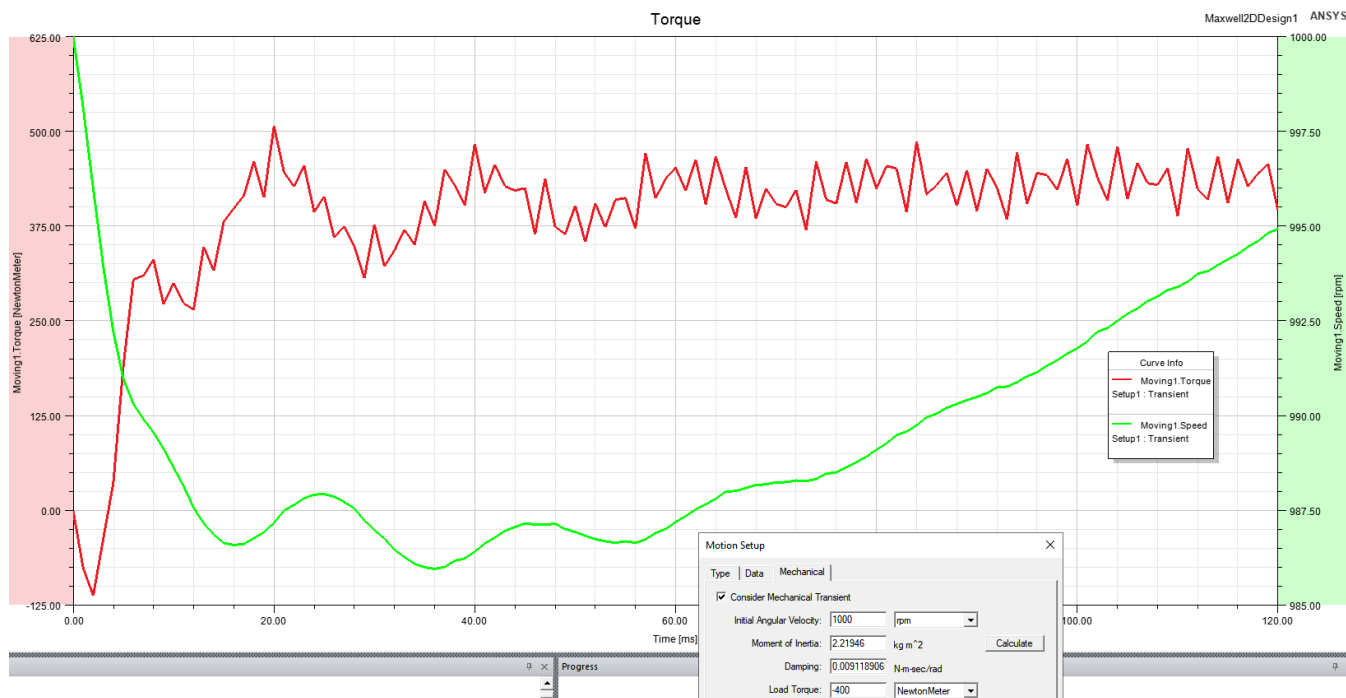
0 okr/min do situacije starta od sinkrone brzine s teretom za kojega motor nema dovoljno momenta za pogon što se može vidjeti po tome što motor nakon određenoga vremena ispada iz sinkronizma i moment motora oscilira oko nule.



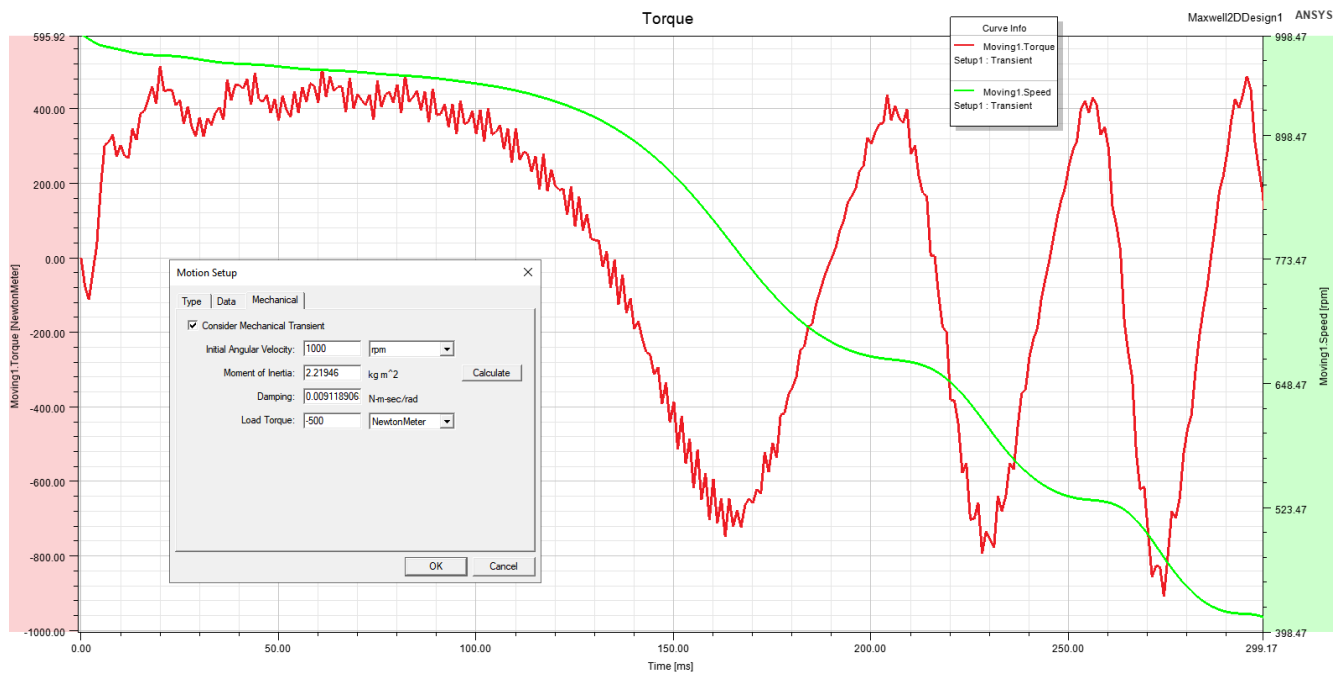
Slika P.6.4.12. Zalet motora bez tereta sa početnom brzinom 0 okr/min.



Slika P.6.4.13. Zalet motora s teretom od -250 Nm.



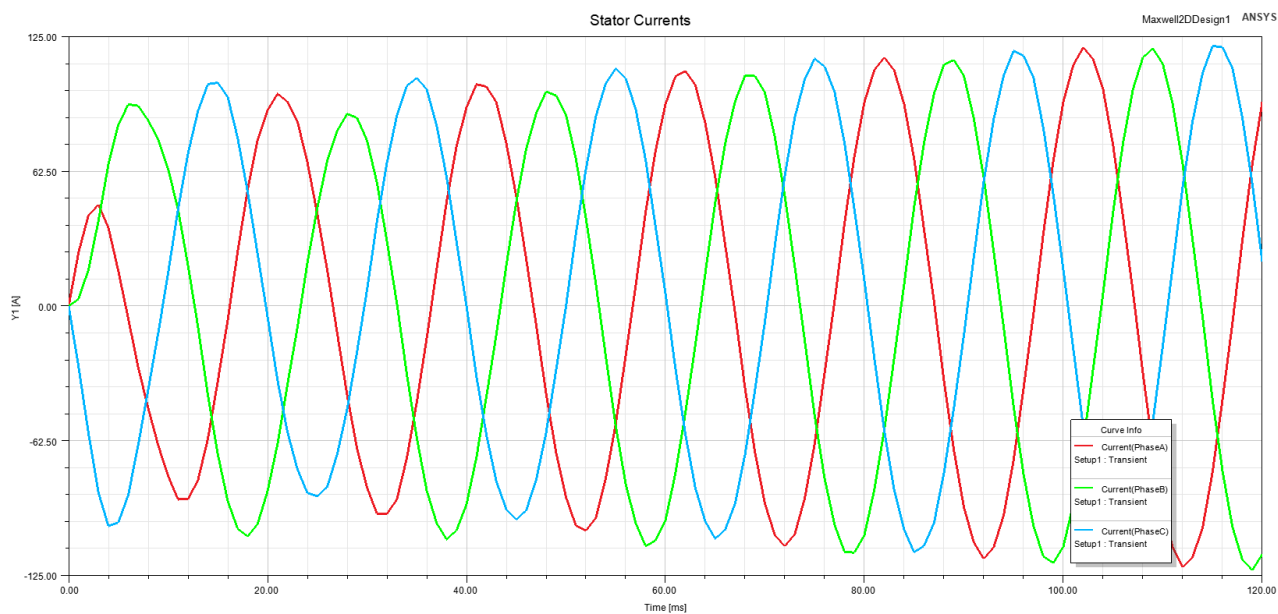
Slika P.6.4.14. Zalet motora s teretom od -400 Nm.



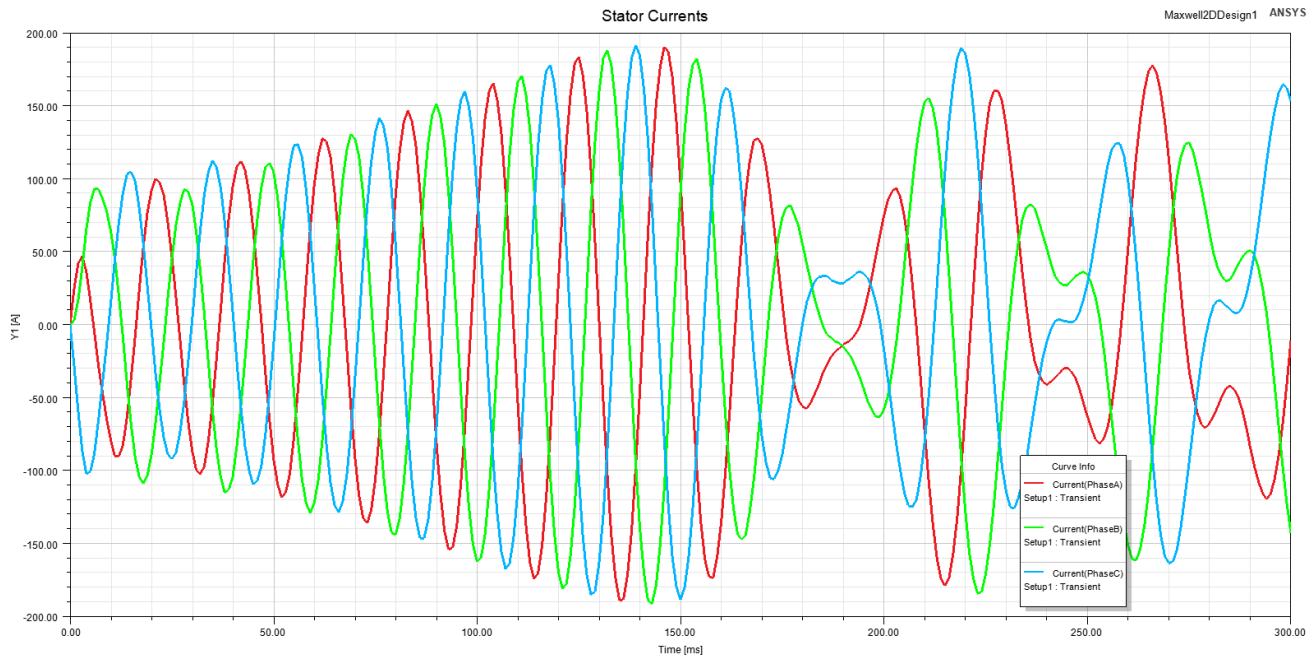
Slika P.6.4.15. Zalet motora s prevelikim teretom kojeg ne može svladati.

Na slikama P.6.4.16. i P.6.4.17. vidimo struje statora za zalet motora sa teretom od 400 i 500 Nm na kojima vidimo kako se ponašaju struje motora pri ovim zaletima i vidimo da kod tereta od 400

Nm moment raste zajedno sa strujom statora dok to nije situacija kod tereta koji je prevelik za motor gdje statorska struja raste, ali moment motora opada pošto ne može svladati teret na osovini.

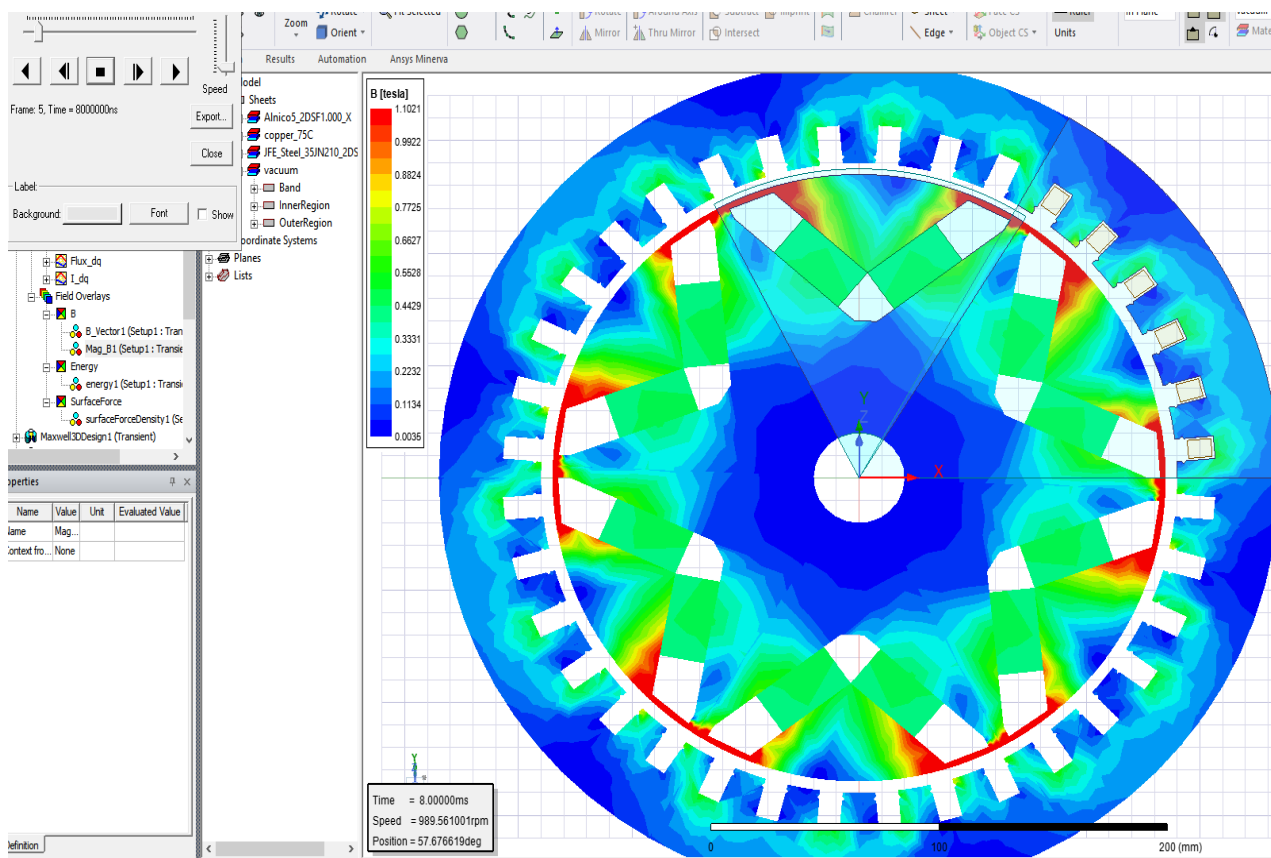


Slika P.6.4.16. Struja motora s teretom od 400 Nm.

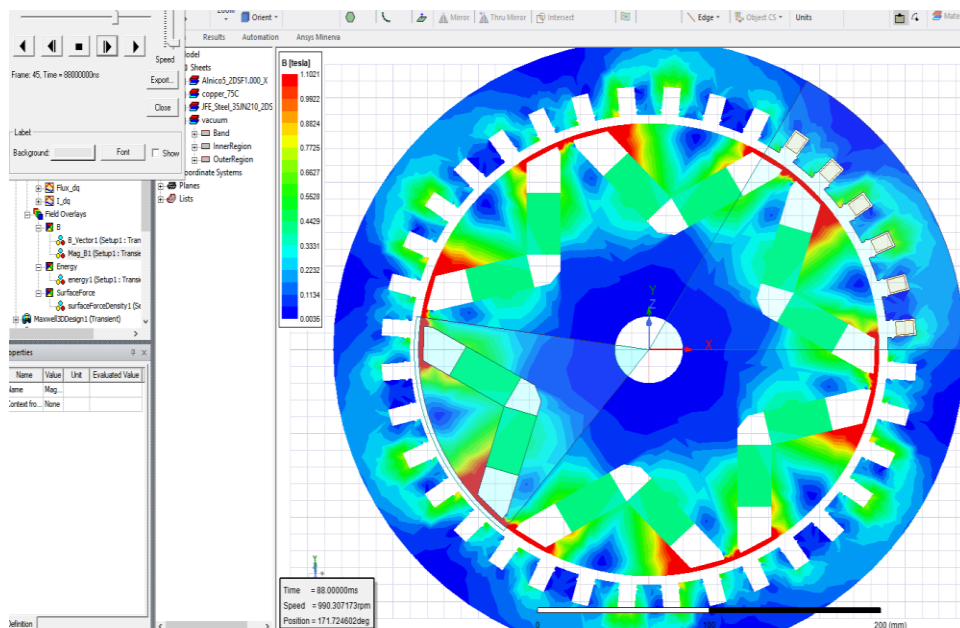


Slika P.6.4.17. Struja motora s teretom od 500 Nm.

Budući da motor nije mogao pogoniti teret od 500 Nm promatrati će mo zalet sa teretom od 400 Nm. U usporedbi sa momentnom reluktantnoga AC motora vidimo da ovdje čim se motor optereti moment odmah reagira i motor bez velikih oscilacija drži maksimalni moment dok se brzina tereta ne dovede do sinkrone. Kod reluktantnih AC motora moment sporije reagira na opterećenje motora i ima veće oscilacije pri radu što može biti nepoželjna karakteristika u nekim situacijama. Na slikama P.6.4.18. i P.4.6.19. vidimo da magnetsku indukciju opterećenoga motora te možemo vidjeti da su slike veoma slične pošto je u oba slučaja moment u tome trenutku bio podjednak.

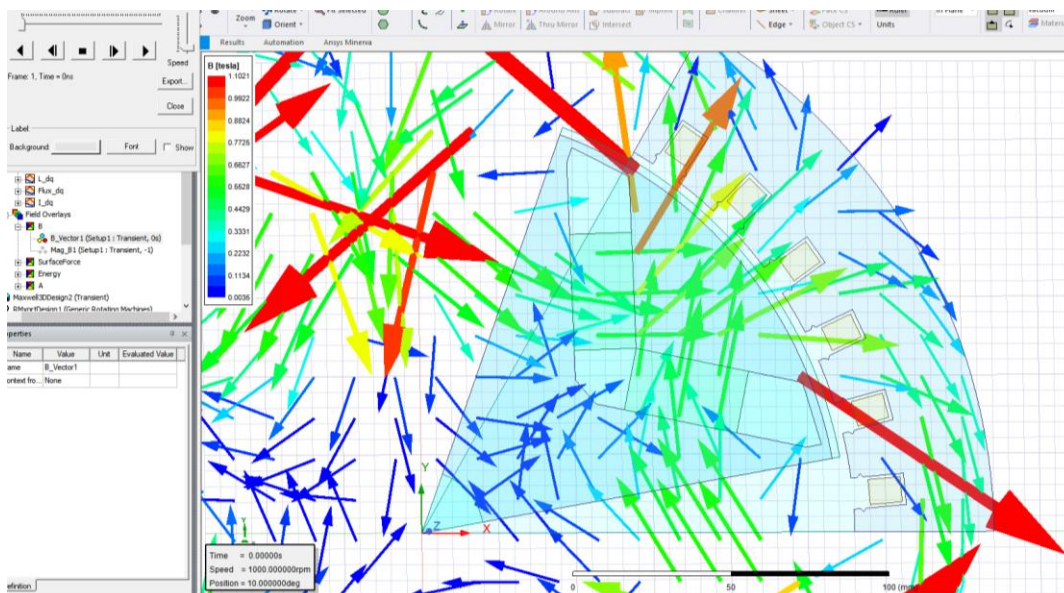


Slika P.6.4.18. Prikaz gustoće magnetskog toka motora pri početku povećanja momenta uslijed povećanja kašnjenja rotora za okretnim magnetskim poljem statora.



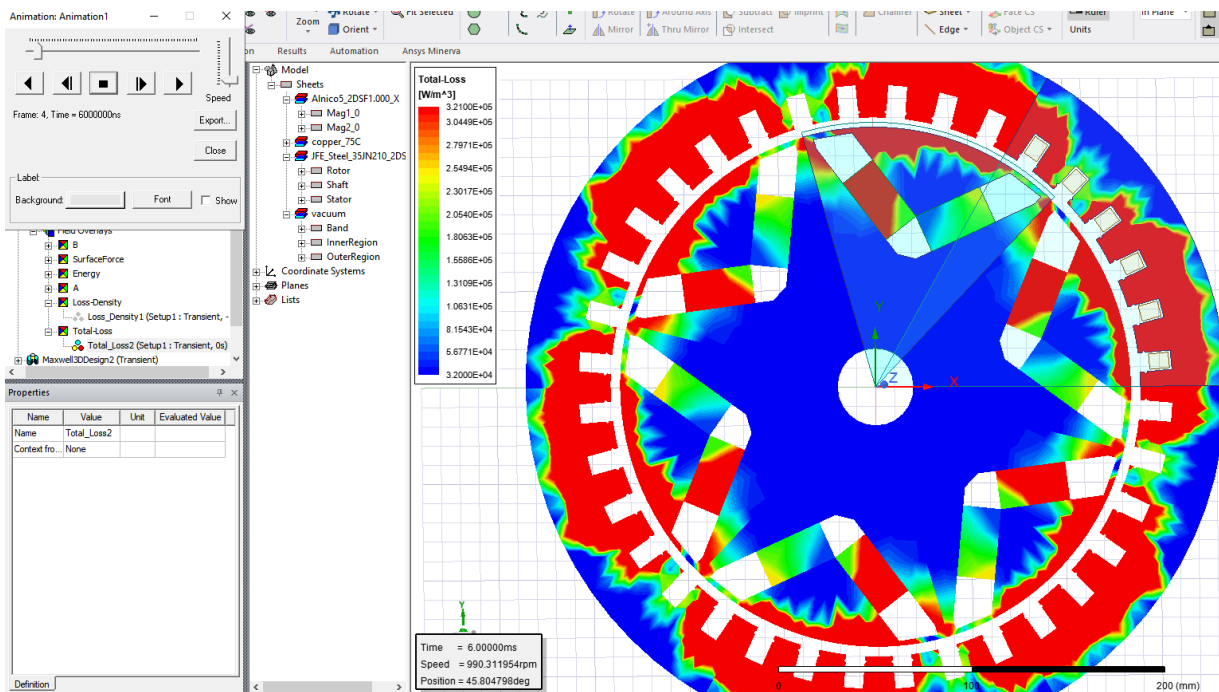
Slika P.6.4.19. Prikaz gustoće magnetskog toka motora pri kraju simulacije kada je brzina počela rasti, a moment kao i kut kašnjenja rotora su se počeli smanjivati.

Na slici P.6.4.20. vidimo kojim se putevima kreću vektori magnetske indukcije kod ovih motora i možemo vidjeti da magnetski krugovi velikom većinom zatvaraju preko trajnih magneta umetnutih u rotor iz kojih izlaze ili ulaze magnetski vektori ovisno o orijentaciji magneta.

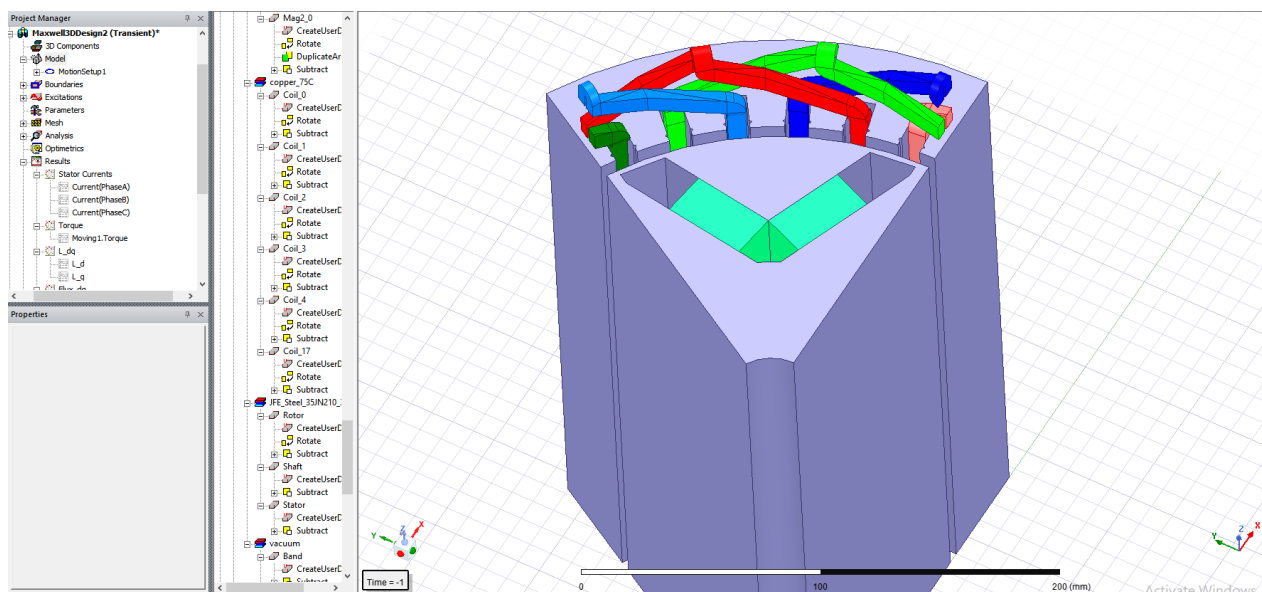


Slika P.6.4.20. Prikaz vektora gustoće magnetskog toka gdje vidimo njihov smjer strujanja u motoru.

Na zadnje dvije slike P.6.4.21. i P.6.4.22. možemo vidjeti prikaz raspodjele ukupnih gubitaka motora i prikaz 3d modela generiranoga u Maxwell 3d sučelju da bi dobili predodžbu kako unutrašnjost modeliranog motora izgleda u stvarnosti.



Slika P.6.4.21. Prikaz raspodjele gustoće ukupnih gubitaka motora pri maksimalnom opterećenju kada se motor optereti.

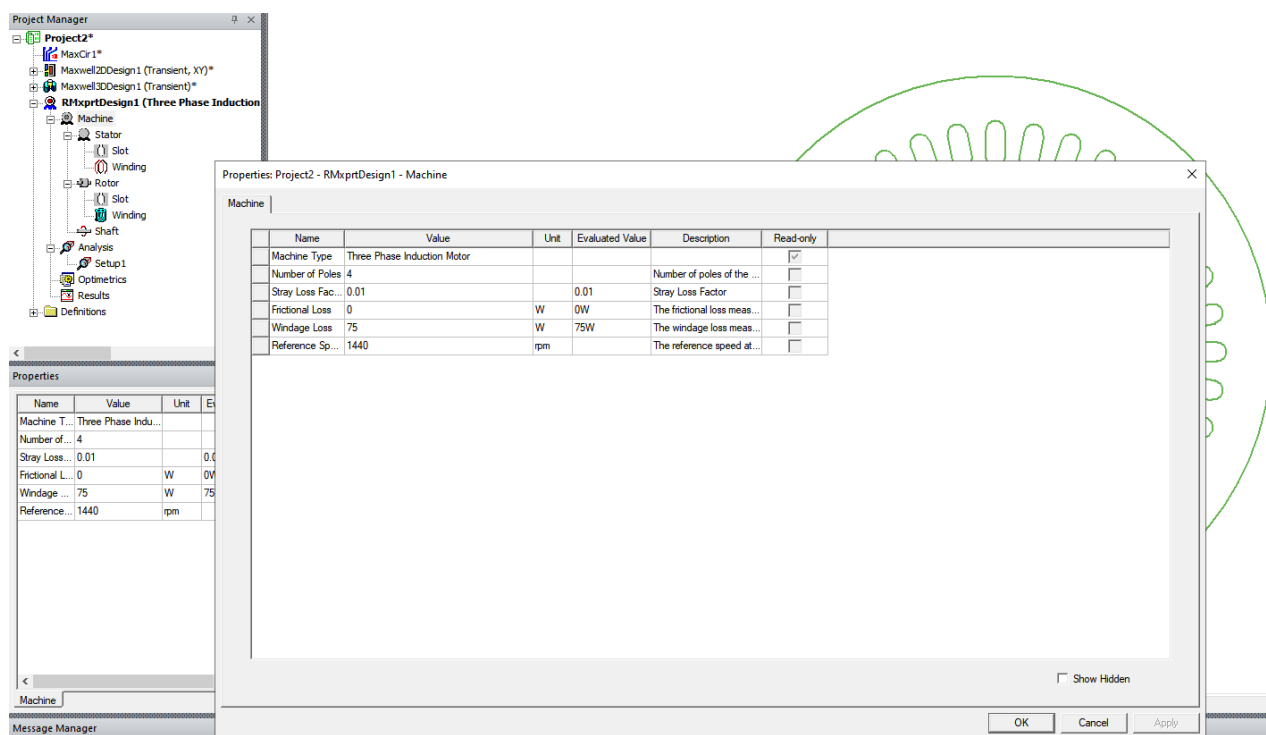


Slika P.6.4.22. Prikaz 3d modela motora iz Maxwell-a 3d.

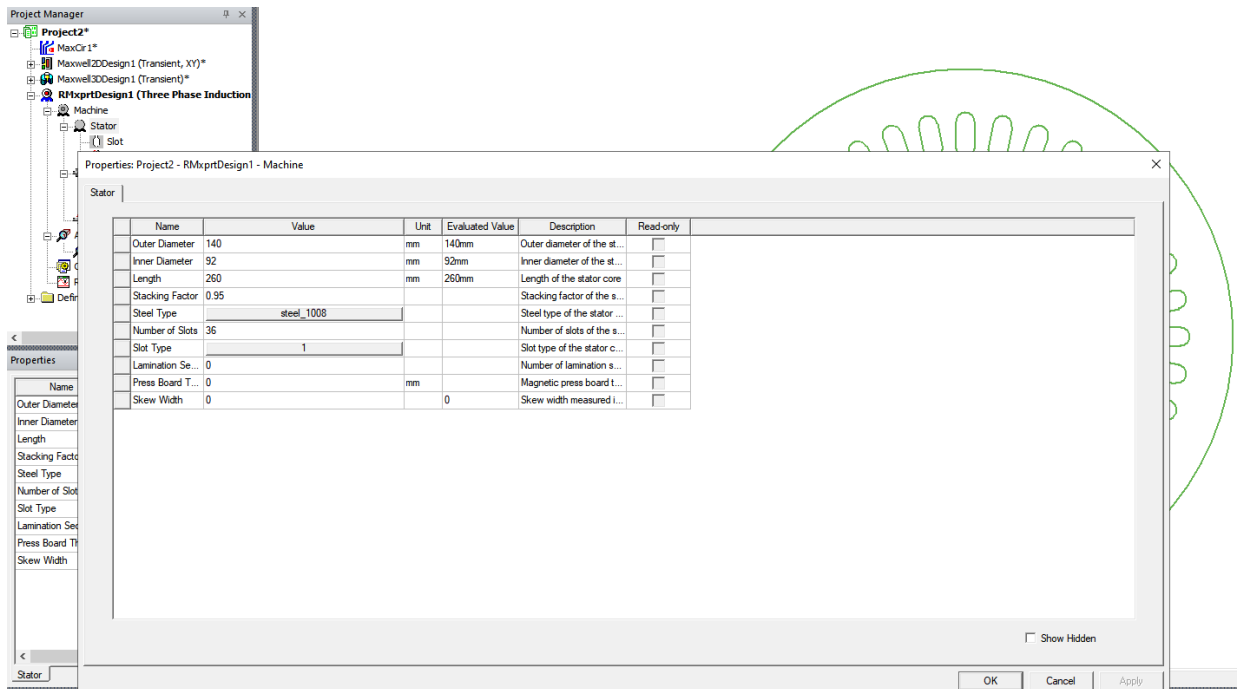
PRILOG P.7.2.

Simulacija zaleta trofaznog asinkronog motora s kaveznim rotorom

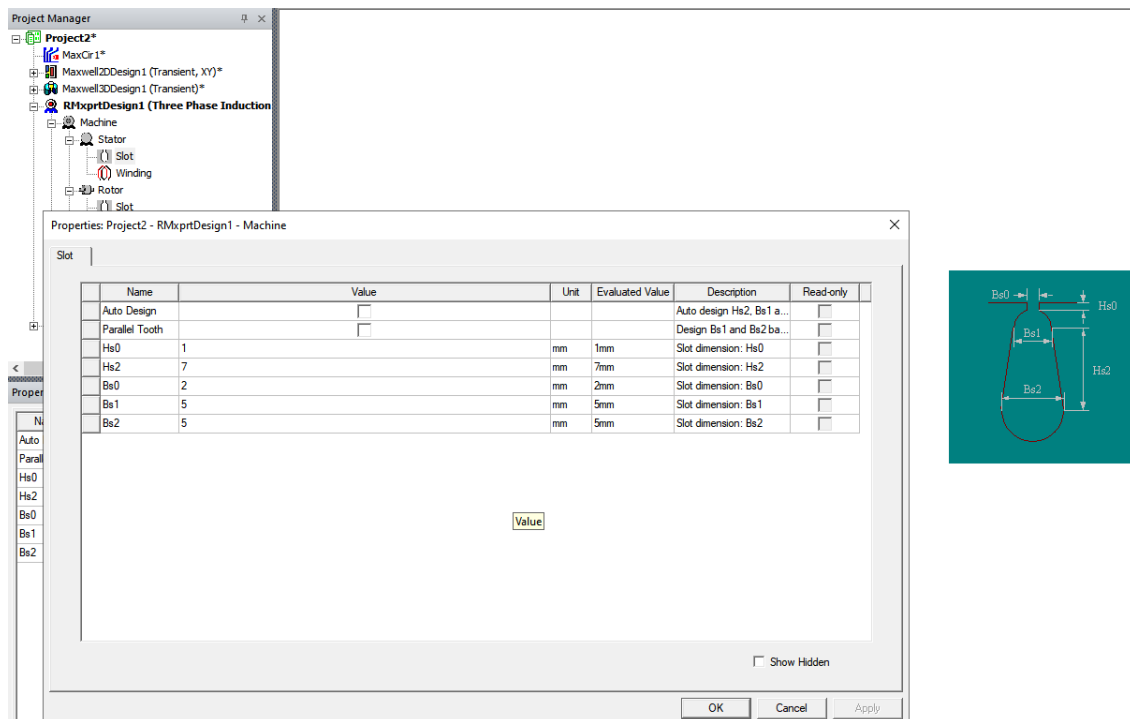
Ovaj tip motora do pojave frekvencijskih pretvarača nije imao alternative i upotrebljavao se u svim mogućim ulogama. Budući da ima indukciju struja u rotoru ima i omske gubitke rotora zbog čega ima generalno nešto nižu učinkovitost u odnosu na sinkrone motore kao i manji omjer snage motora i njegovog volumena. Zbog te niže učinkovitosti u današnja vremena kada se puno pažnje posvećuje na ekologiju i potrošnju ovi motori se zamjenjuju sa sinkronim. Rotorska struja koja izaziva gubitke je nužna pošto o njoj ovisi rad ovoga motora i njezin iznos te fazni kut određuje moment motora. Parametri ovoga motora modeliranoga u Rmxprt-u su određeni podacima i dimenzijama stvarnoga motora proizvođača VEM modela K8UR 132S-4 i na sljedećim slikama P.7.2.1. – P.7.2.8. vidimo navažnije korake u modeliranju trofaznog kaveznog asinkronog motora.



Slika P.7.2.1. Određivanje broja polova statora i gubitaka trenja i hlađenja.



Slika P.7.2.2. Dimenzioniranje jezgre statora.



Slika P.7.2.3. Dimenzioniranje statorskih utora za namote.

Project Manager

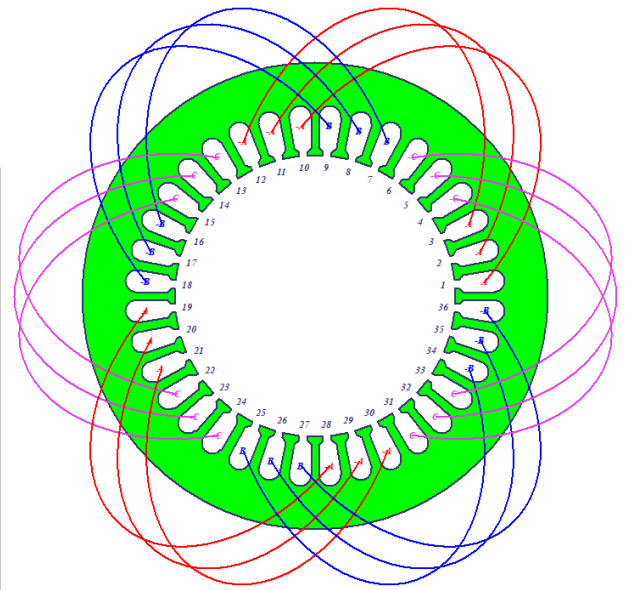
| Coil | Phase | Turns | In Slot | Out Slot |
|--------|-------|-------|---------|----------|
| Coil_1 | A | 1 | 1 | 10 |
| Coil_2 | A | 1 | 2 | 11 |
| Coil_3 | A | 1 | 3 | 12 |
| Coil_4 | B | 1 | 7 | 16 |
| Coil_5 | B | 1 | 8 | 17 |
| Coil_6 | B | 1 | 9 | 18 |
| Coil_7 | C | 1 | 13 | 22 |
| Coil_8 | C | 1 | 14 | 23 |
| Coil_9 | C | 1 | 15 | 24 |

Properties: Project2 - RMXprtDesign1 - Machine

Winding | End/Insulation |

| Name | Value | Unit | Evaluated Value | Description | Read-only |
|-----------------|---------------|------|-----------------|-----------------------------|--------------------------|
| Winding Layers | 1 | | | Number of winding layers | <input type="checkbox"/> |
| Winding Type | Half-Coiled | | | Stator winding type | <input type="checkbox"/> |
| Parallel Branch | 1 | | | Number of parallel bran... | <input type="checkbox"/> |
| Conductors per | 0 | | 0 | Number of conductors ... | <input type="checkbox"/> |
| Number of Strs | 0 | | 0 | Number of strands (hu... | <input type="checkbox"/> |
| Wire Wrap | 0 | mm | | Double-side wire wrap t... | <input type="checkbox"/> |
| Wire Size | Diameter: 0mm | | | Wire size, 0 for auto-de... | <input type="checkbox"/> |

OK Cancel Apply



Slika P.7.2.4. Dimenzioniranje statorskih namota motora.

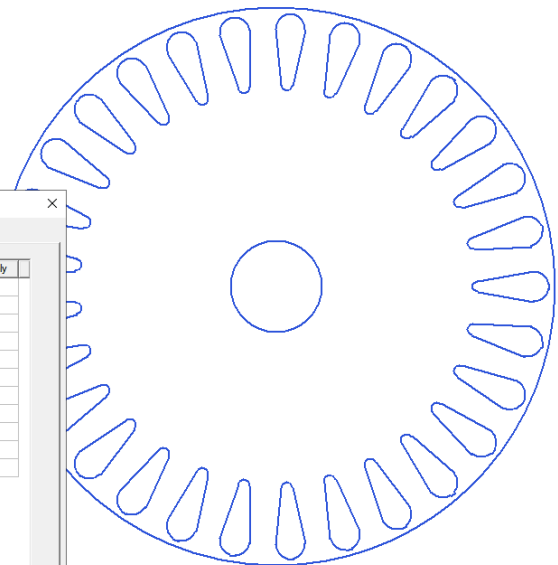
Project Manager

Properties: Project2 - RMXprtDesign1 - Machine

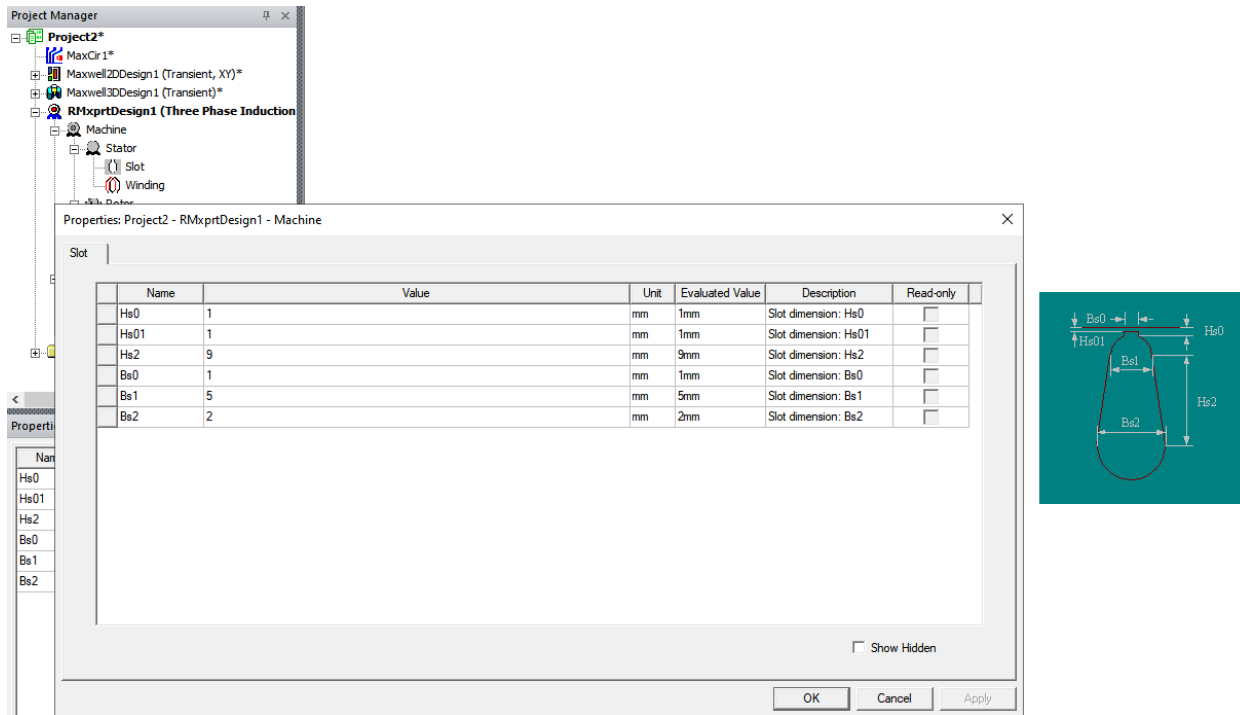
Rotor |

| Name | Value | Unit | Evaluated Value | Description | Read-only |
|-----------------|--------------------------|------|-----------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Stacking Factor | 0.95 | | | Stacking factor of the rotor core | <input type="checkbox"/> |
| Number of Slots | 29 | | | Number of slots of the rotor core | <input type="checkbox"/> |
| Slot Type | 1 | | | Slot type of the rotor core | <input type="checkbox"/> |
| Outer Diameter | 90 | mm | 90mm | Outer diameter of the rotor core | <input type="checkbox"/> |
| Inner Diameter | 15 | mm | 15mm | Inner diameter of the rotor core | <input type="checkbox"/> |
| Length | 260 | mm | 260mm | Length of the rotor core | <input type="checkbox"/> |
| Steel Type | steel_1008 | | | Steel type of the rotor core | <input type="checkbox"/> |
| Skew Width | 1 | | 1 | Skew width measured in slot number | <input type="checkbox"/> |
| Cast Rotor | <input type="checkbox"/> | | | Rotor squirrel-cage winding is cast | <input type="checkbox"/> |
| Half Slot | <input type="checkbox"/> | | | Half-shaped slot (un-symmetric) | <input type="checkbox"/> |
| Double Cage | <input type="checkbox"/> | | | Double-squirrel-cage winding | <input type="checkbox"/> |

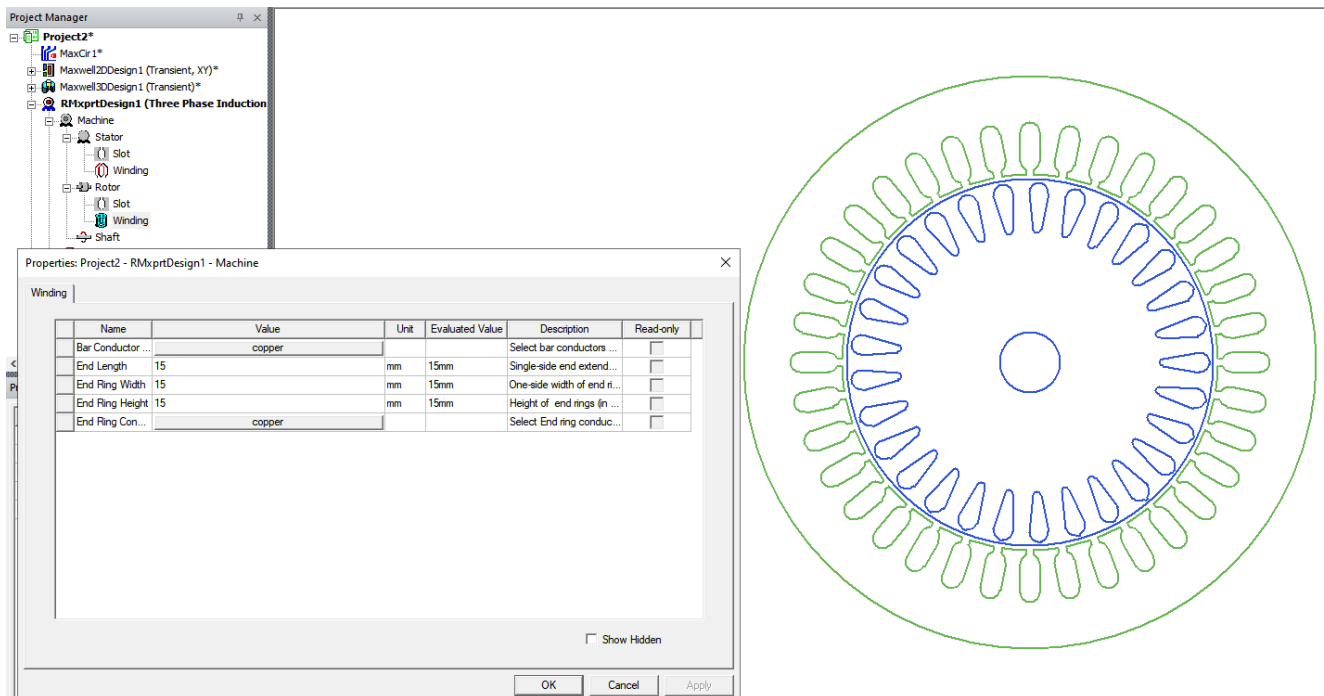
OK Cancel Apply



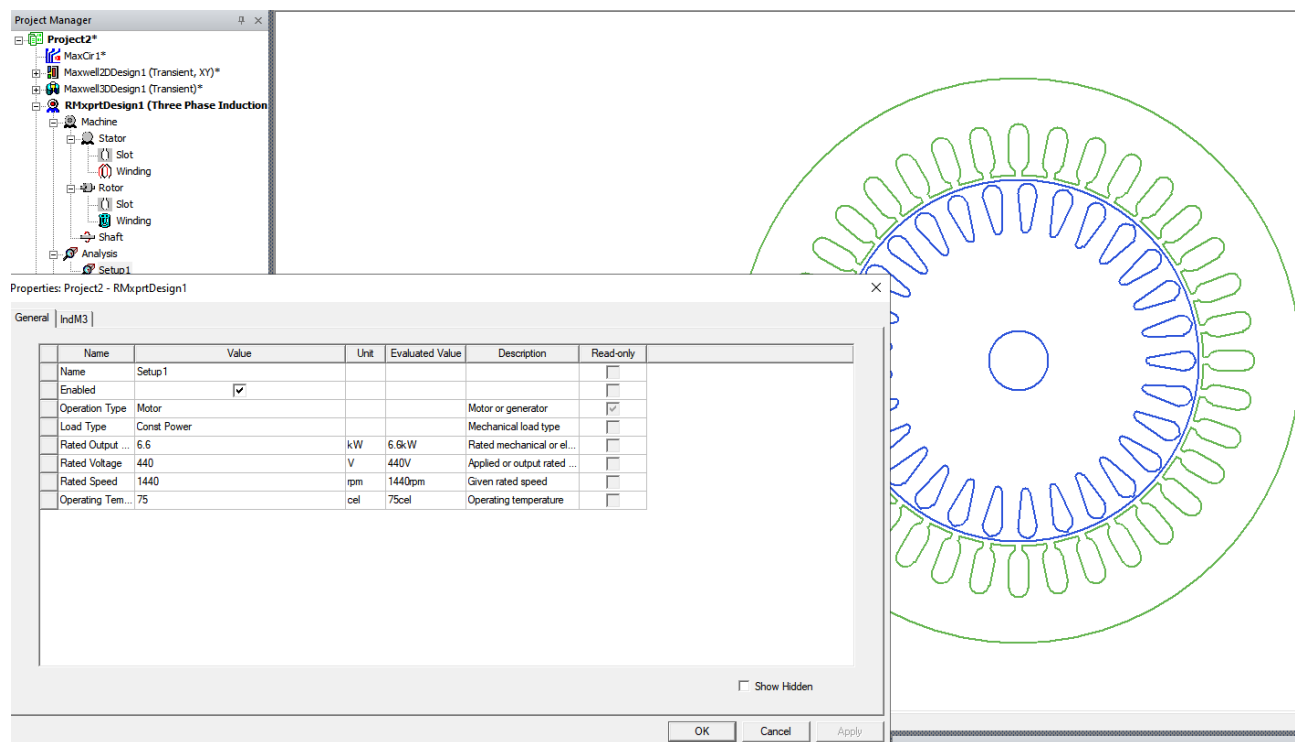
Slika P.7.2.5. Dimenzioniranje rotora motora.



Slika P.7.2.6. Dimenzioniranje rotorskoga kaveza motora.

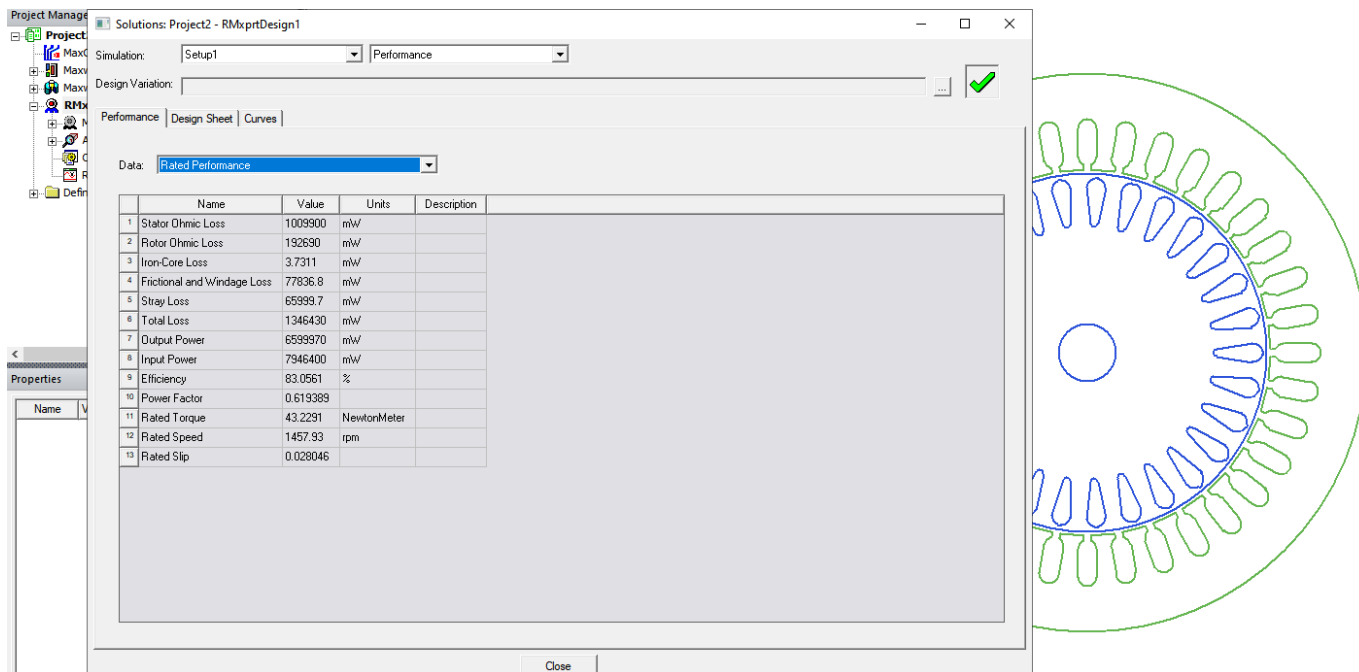


Slika P.7.2.7. Dimenzioniranje prstena koji kratko spaja rotorski kavez.

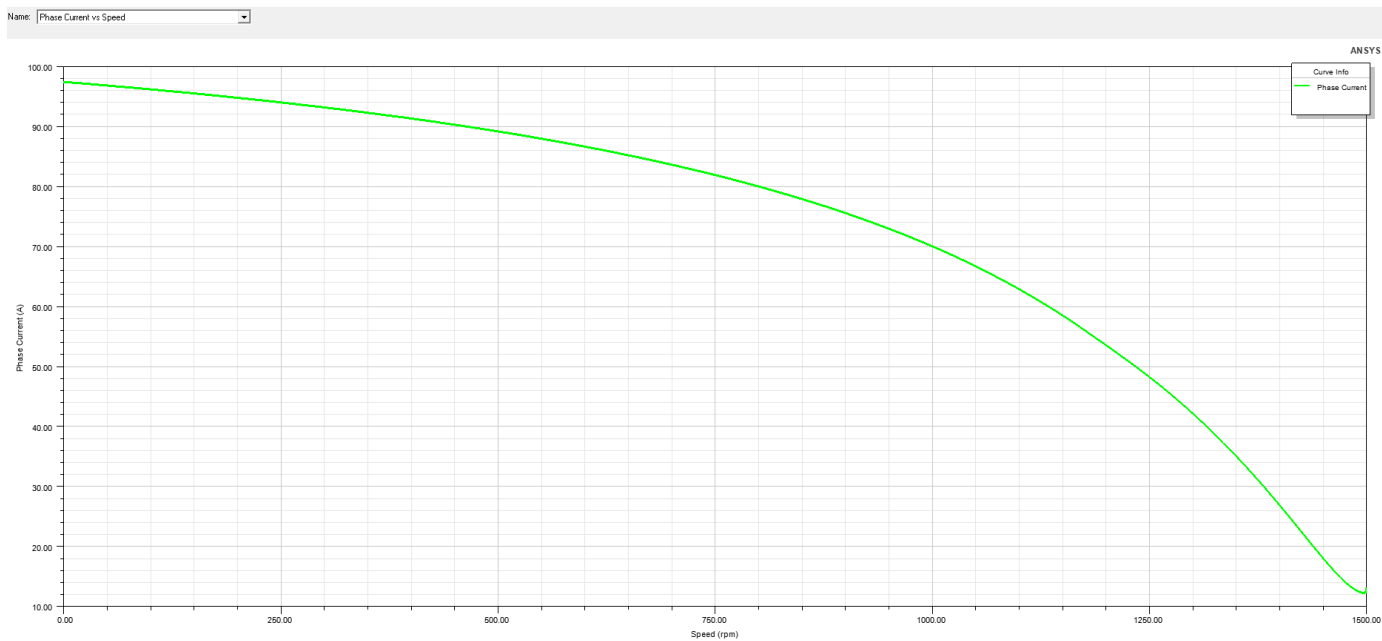


Slika P.7.2.8. Zadavanje nazivnih podataka motora.

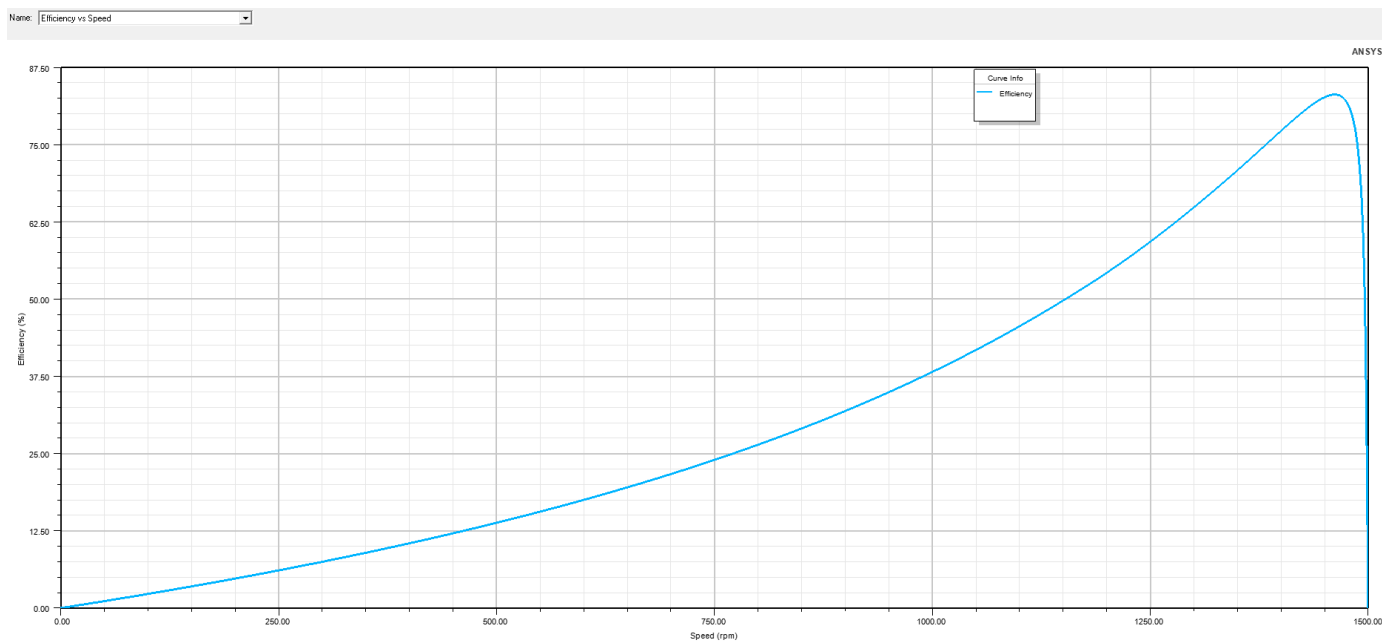
Na temelju dimenzija i nazivnih veličina motora dobivamo statičke karakteristike motora koje predstavljaju njegove nazivne karakteristike za idealne slučajeve rada motora pri nazivnoj učinkovitosti na sljedećim slikama su prikazane nazivne veličine motora i karakteristike. Na tim karakteristikama možemo vidjeti koje vrijednosti možemo očekivati kada budemo radili simulacije zaleta u Maxwell-u 2d. Za zalet motora korištena je početna brzina od 0 okr/min iz razloga što ovi motori mogu startati sami pod uvjeton da imaju dovoljno poteznog momenta. Na slikama P.7.2.9. – P.7.2.13. vidimo statičke karakteristike motora i možemo vidjeti velike razlike u usporedbi sa sinkronim motorom pošto su to dva potpuno različita motora iako koriste iste konstrukcije statora njihov princip rada je drugačiji. Na slici P.7.2.11. vidimo jednu od najvećih mana ovih motora, a to je učinkovitost koja je objektivno jako dobra, ali zaostaje za sinkronim motorima kao što je motor s trajnim umetnutim magnetima modeliran u Prilogu 6.4.



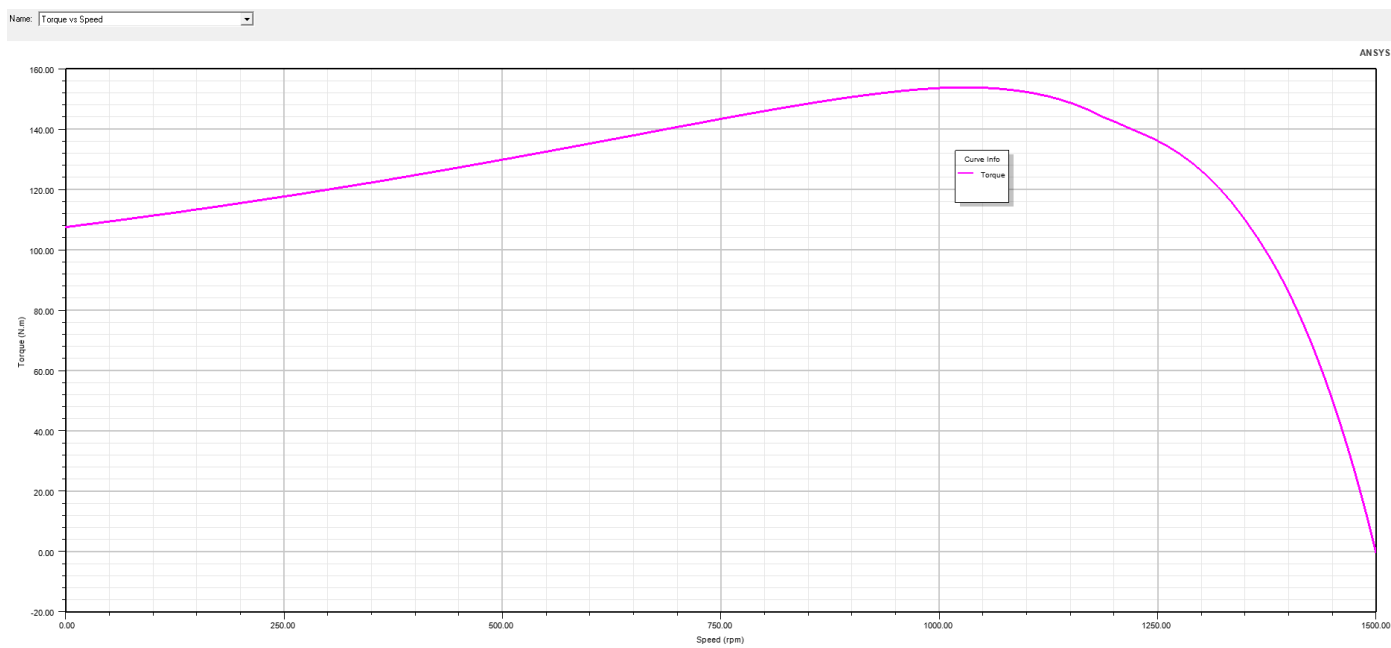
Slika P.7.2.9. Nazivne vrijednosti perfomansi motora.



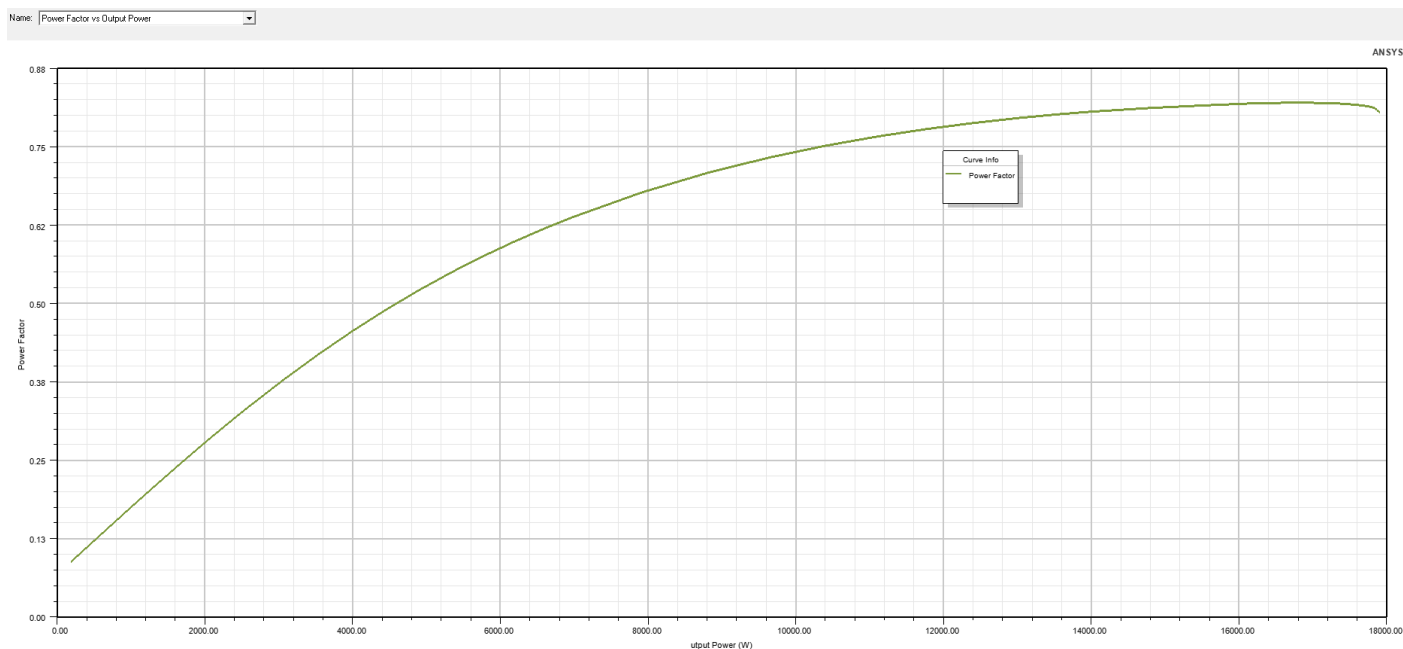
Slika P.7.2.10. Statička strujna karakteristika motora.



Slika P.7.2.11. Karakteristika učinkovitosti motora.

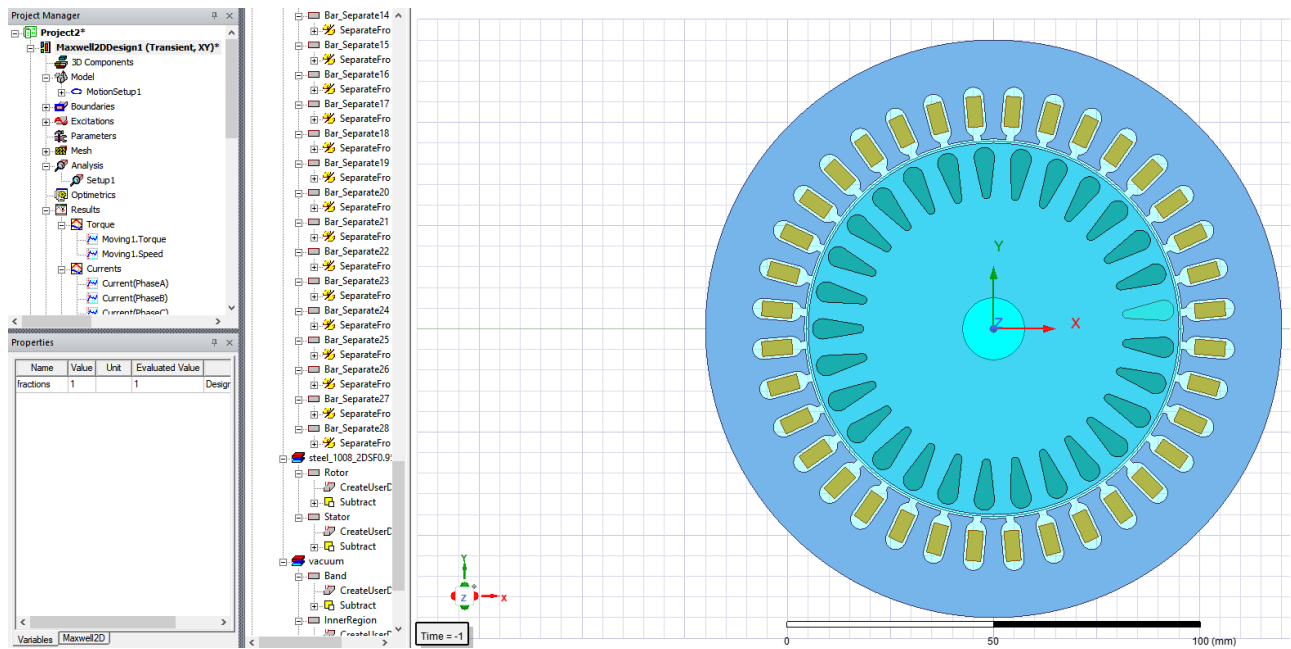


Slika P.7.2.12. Momentna karakteristika motora dobivena iz zadanih parametara modela.

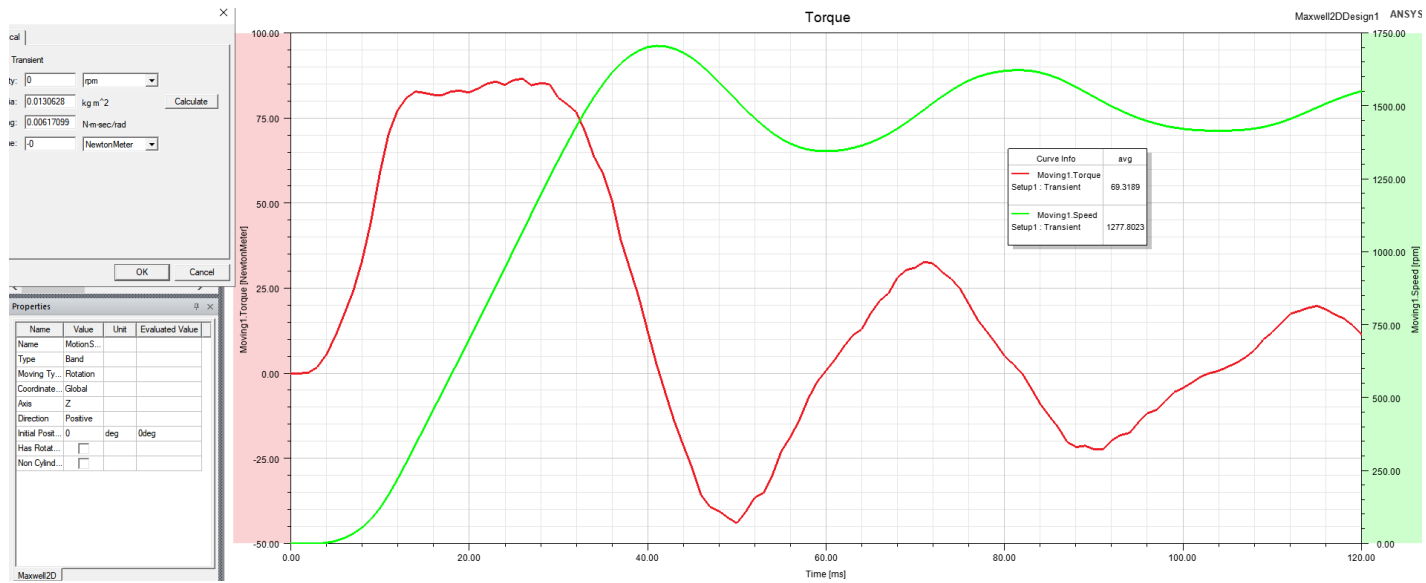


Slika P.7.2.13. Karakteristika faktora snage motora u ovisnosti o izlaznoj snazi.

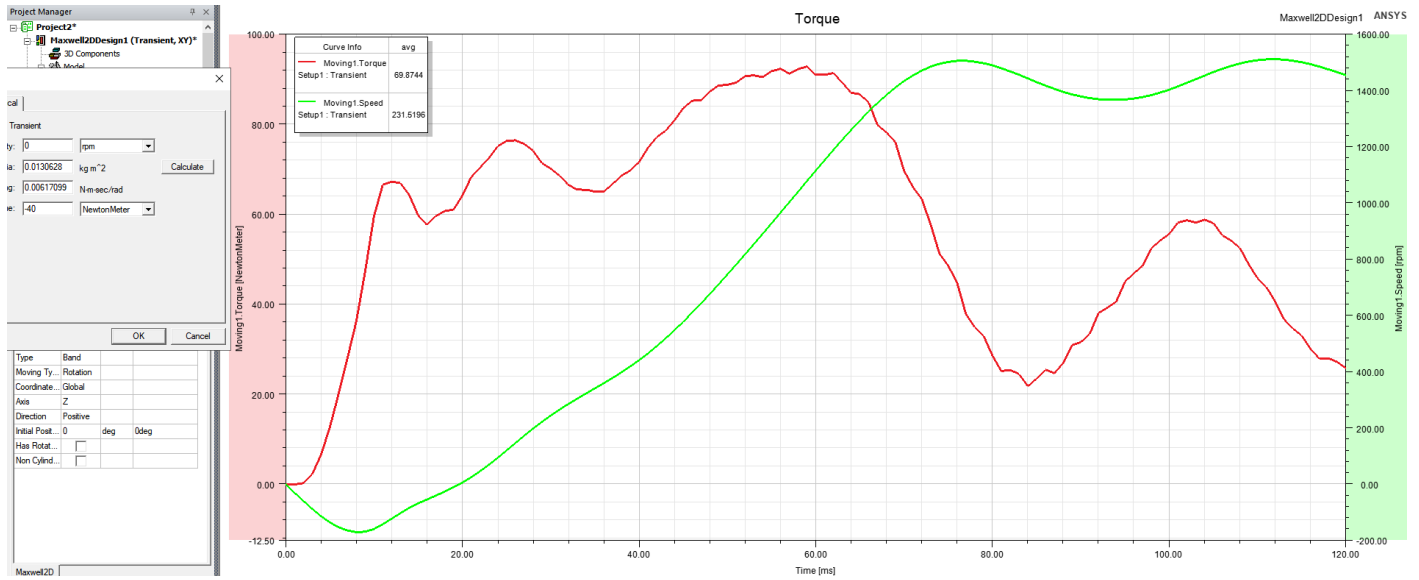
Na temelju dobivenih statičkih karakteristika možemo vidjeti kakve su njegove nazivne karakteristike u idealnim uvjetima. Nakon ovoga prebacujemo model u Maxwell 2d gdje će mo napraviti simulacije zaleta motora pri različitim brzinama i teretima te vidjeti kako reagira moment motora za zalet različitoga opterećenja. Budući da je ovdje riječ o asinkronim motorima koji mogu sami startati od 0 okr/min početna brzina na početku će biti 0, a krajnja brzina na kraju simulacije će ovisiti o veličini tereta. Rezultati simulacija prikazani su na slikama P.7.2.14. – P.7.2.18.



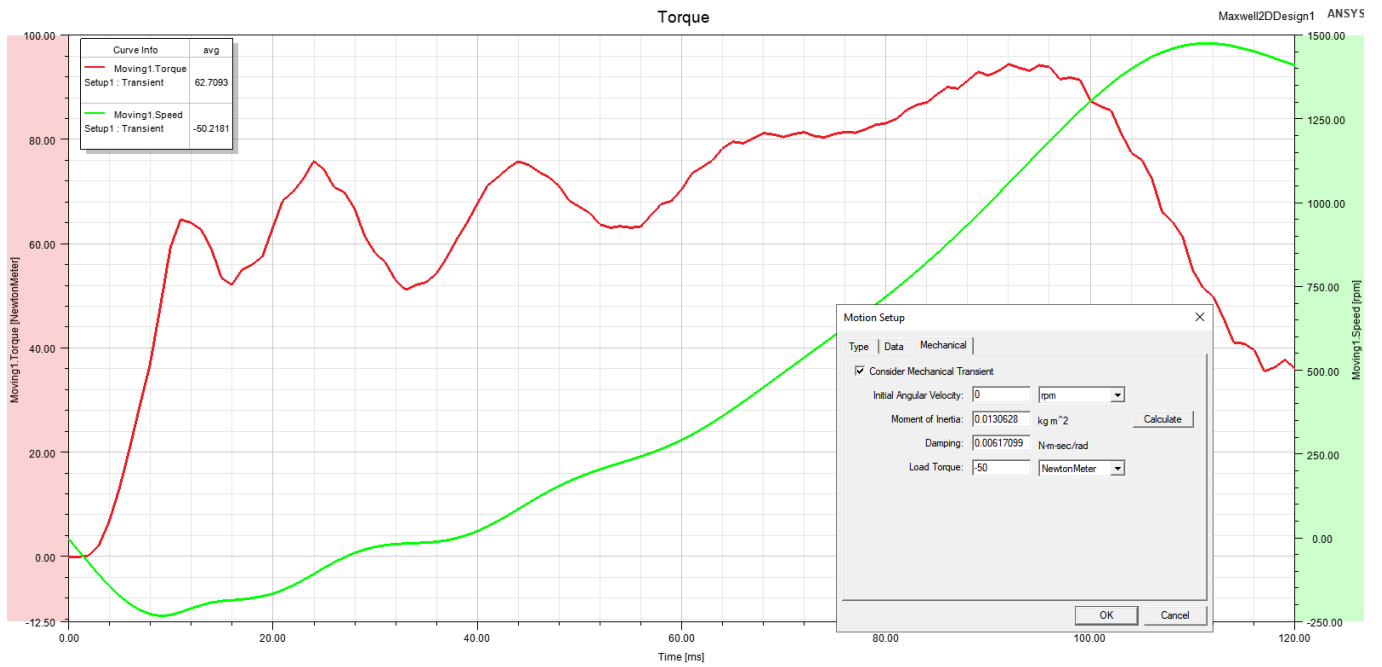
Slika P.7.2.14. Model motora generiran u Maxwell-u 2d na temelju karakteristika dobivenih u Rmxprt-u.



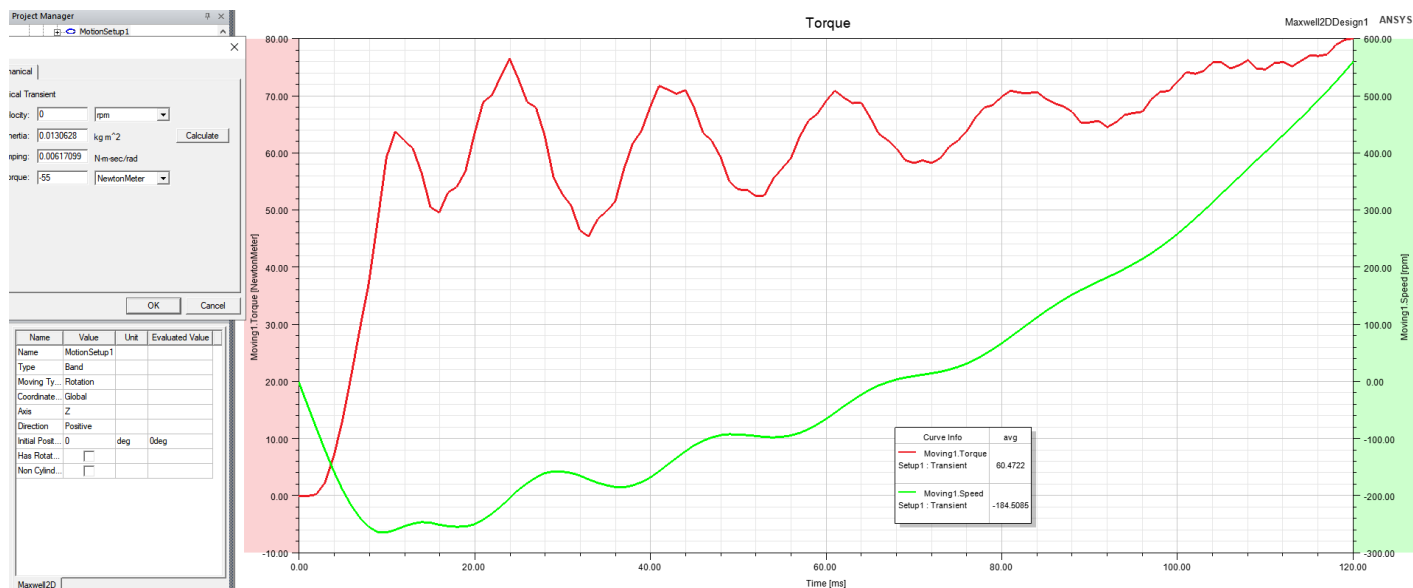
Slika P.7.2.15. Zalet asinkronog motora bez opterećenja s početnom brzinom od 0 okr/min.



Slika P.7.2.16. Zalet motora s momentom tereta od 40 Nm.

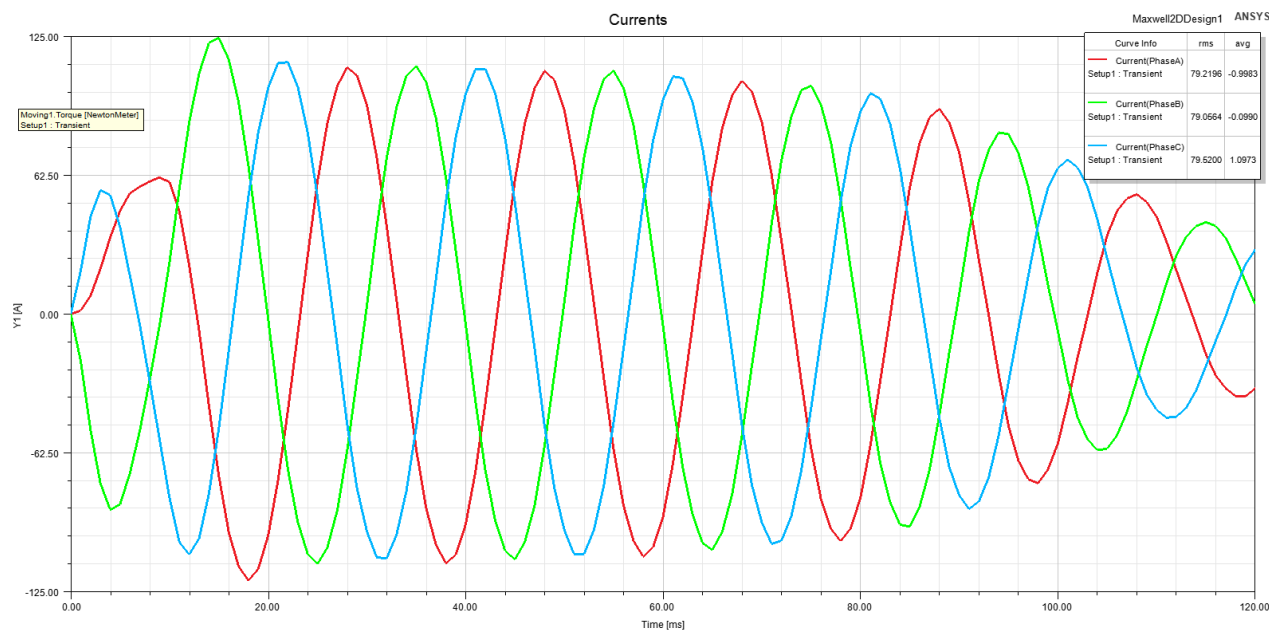


Slika P.7.2.17. Zalet motora s momentom tereta od 50 Nm.

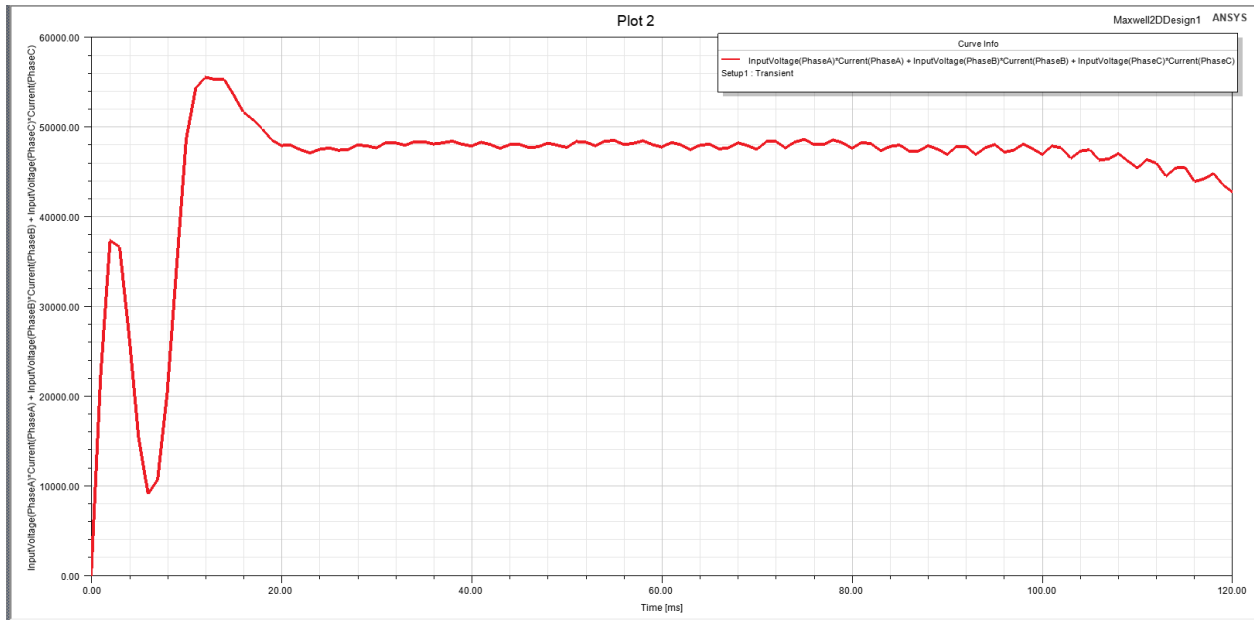


Slika P.7.2.18. Zalet motora s maksimalnim opterećenjem koje motor može pokrenuti s početnom brzinom od 0 okr/min bez uključenih gubitaka vrtložnih struja.

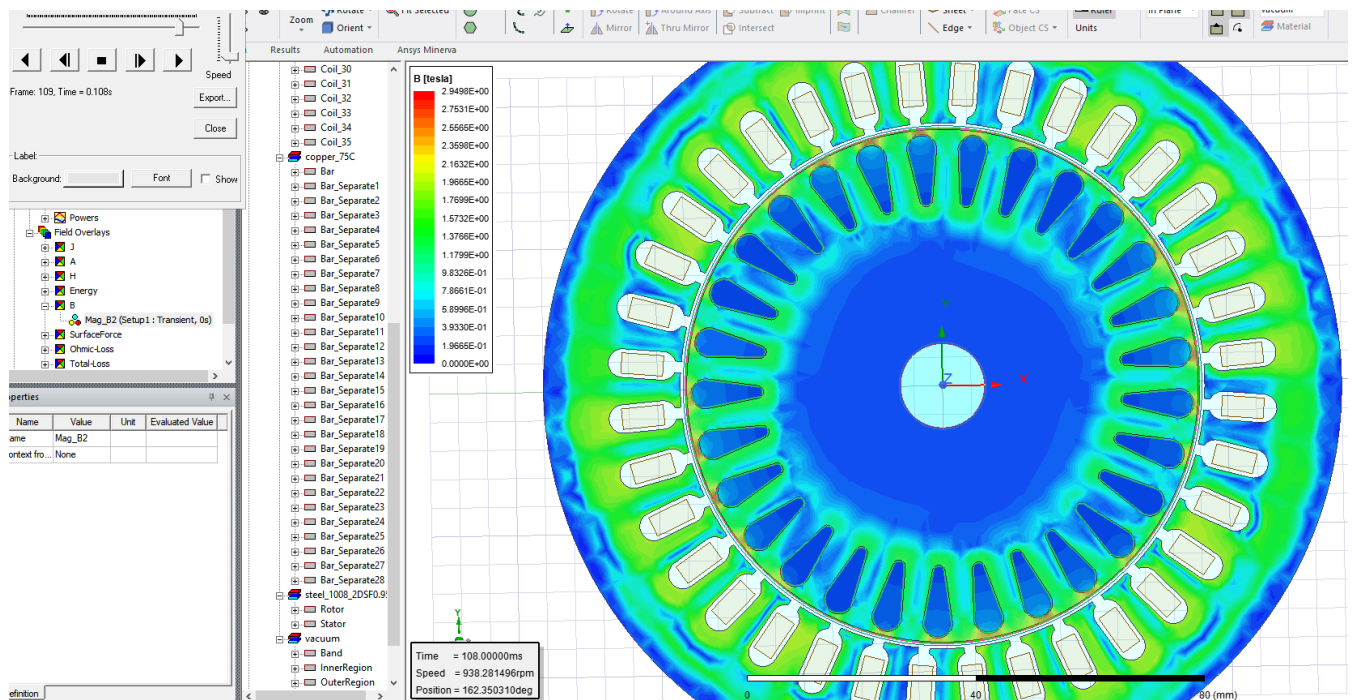
Na osnovu dobivenih karakteristika zaleta motora vidimo da je maksimalni teret koji motor može pouzdano pokrenuti je oko 40 do 50 Nm te će mo taj primjer uzeti za prikazivanje animacija promjeni varijabli motora što je prikazano na slikama P.7.2.19. – P.7.2.24.



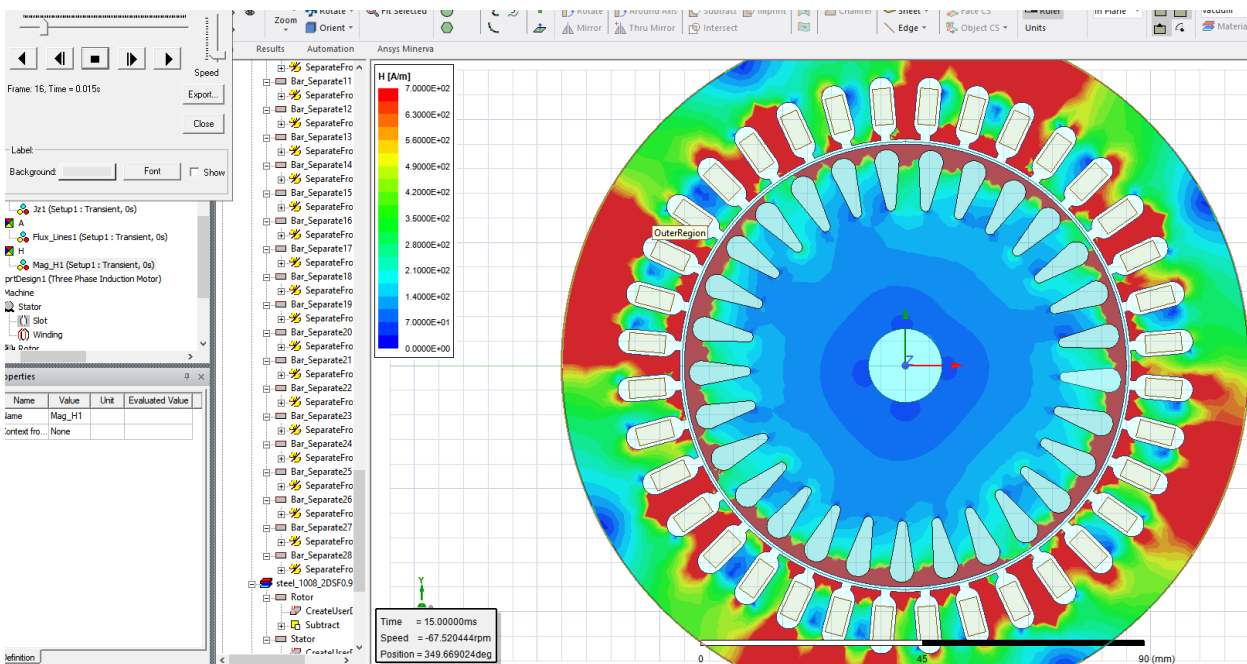
Slika P.7.2.19. Strujna karakteristika motora pri zaletu.



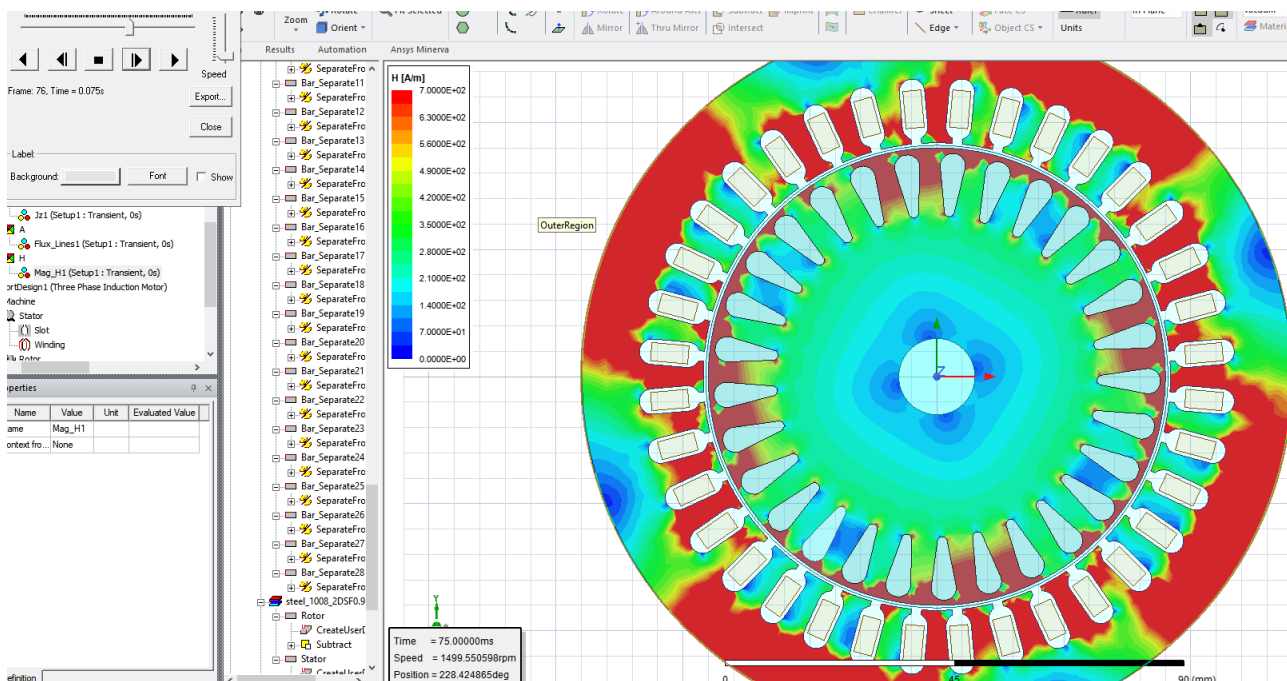
Slika P.7.2.20. Prikaz karakteristike ulazne električne snage motora pri zaletu s najvećim teretom.



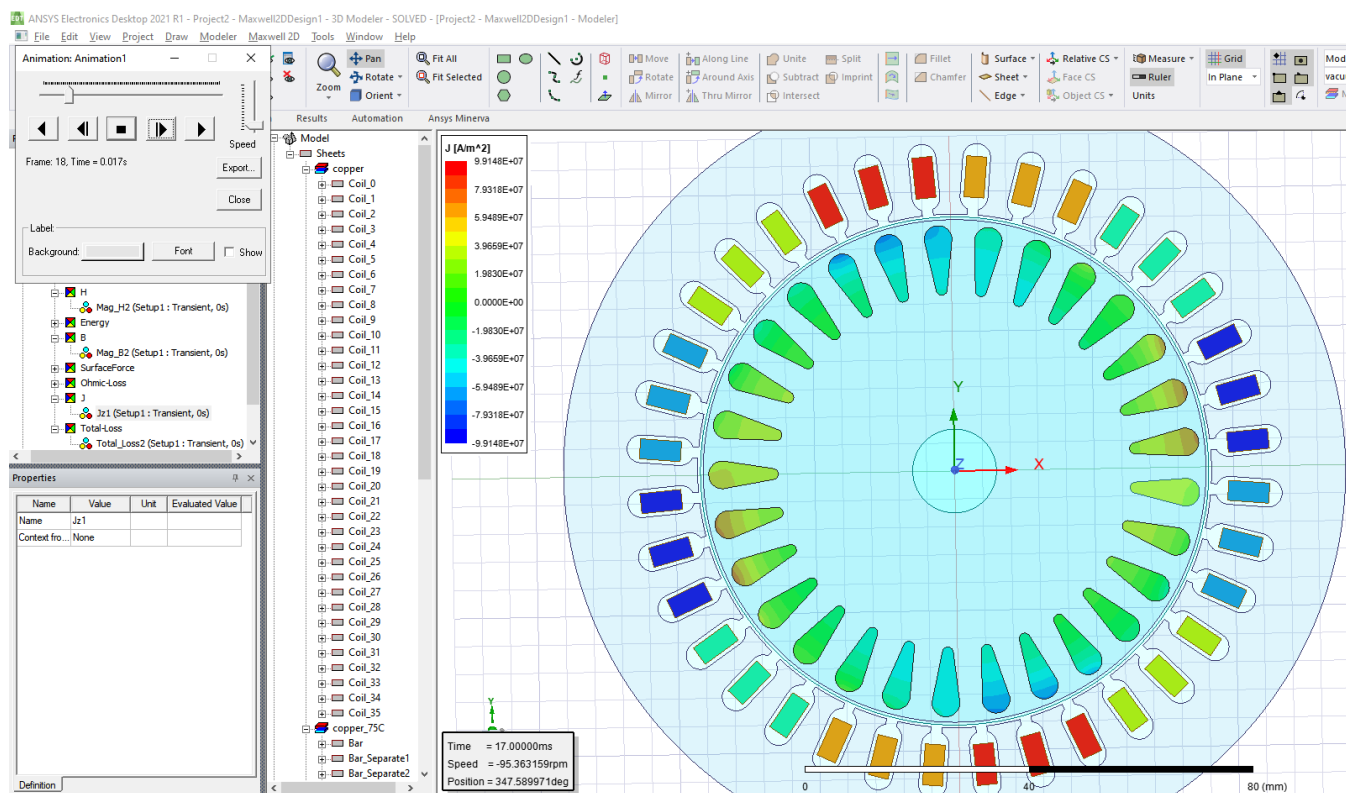
Slika P.7.2.21. Prikaz raspodjele gustoće magnetskog toka potpuno opterećenoga motora u zaletu.



Slika P.7.2.22. Prikaz raspodjele jakosti magnetskog polja potpuno opterećenoga motora u zaletu na početku simulacije.

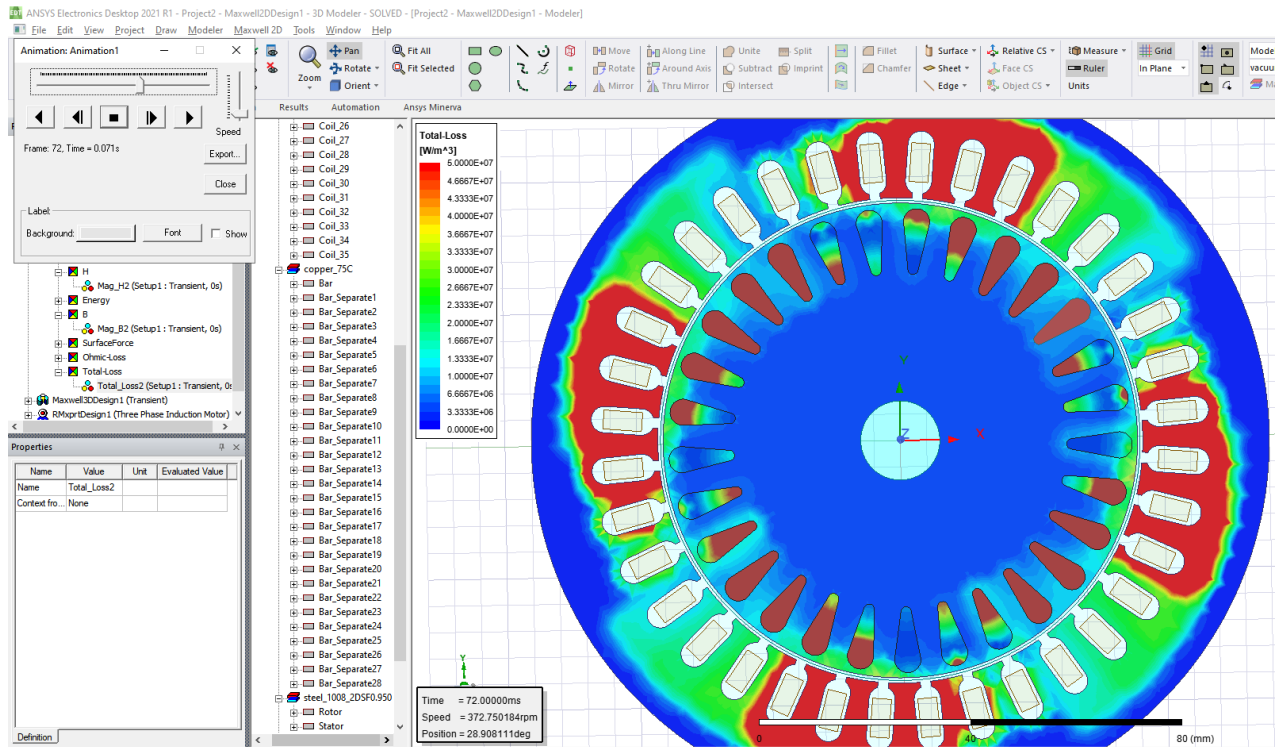


Slika P.7.2.23. Prikaz raspodjele jakosti magnetskog polja potpuno opterećenoga motora u zaletu pri kraju simulacije.

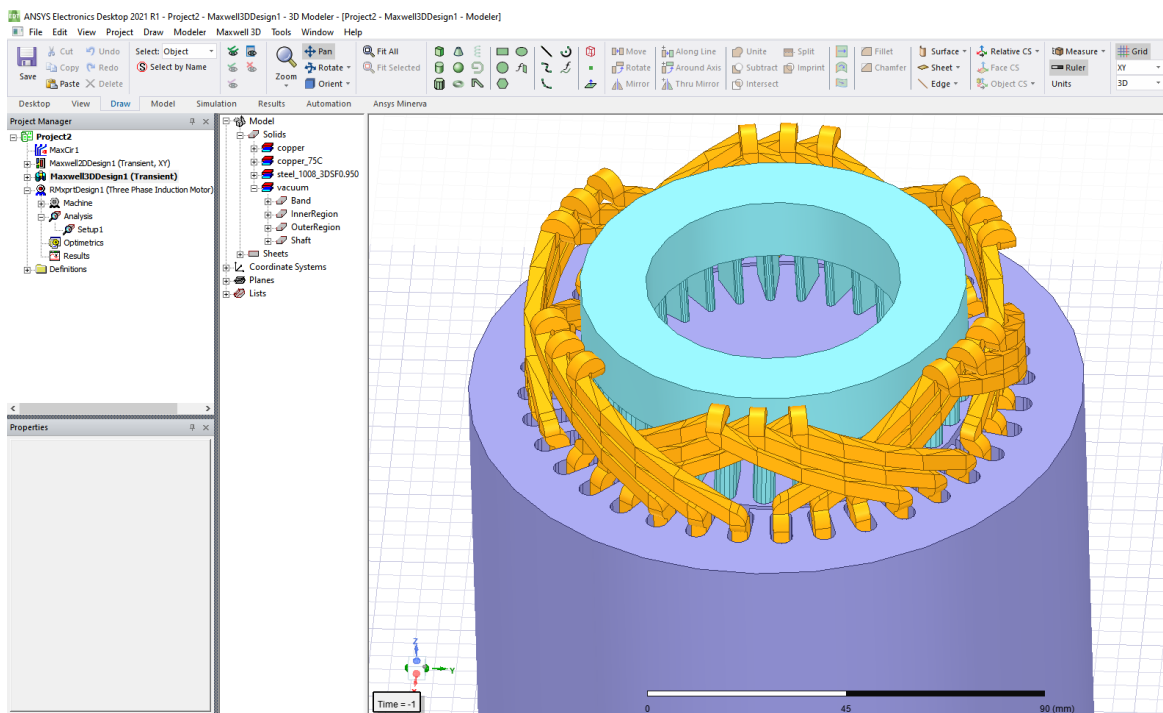


Slika P.7.2.24. Prikaz raspodjele gustoće struje u namotima statora i kavezu rotora maksimalno opterećenog motora u zaletu.

Kada smo odradili sve simulacije i dobili željene grafove i animacije promjene varijabli motora napraviti će mo prebacivanje u Maxwell 3d gdje na slici P.7.2.26. možemo vidjeti prikaz motora u 3d te na slici P.7.2.25. prikaz animacije gustoće ukupnih gubitaka motora iz Maxwell-a 2d gdje možemo vidjeti kako su raspodjeljeni gubici u motoru te s obzirom na to možemo mijenjati konstrukciju motora da bi ostvarili optimalno hlađenje i izbjegli pregrijavanja dijelova motora.



Slika P.7.2.25. Prikaz raspodjele gustoće ukupnih gubitaka maksimalno opterećenog motora u zaletu.



Slika P.7.2.26. Prikaz 3d modela trofaznog asinkronog motora iz Maxwell-a 3d.