

# Supravodljivi sinkroni generatori

---

Gavrančić, Tea

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:168:404426>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-20**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 140

# SUPRAVODLJIVI SINKRONI GENERATORI

Tea Gavrančić

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 140

# SUPRAVODLJIVI SINKRONI GENERATORI

Tea Gavrančić

Zagreb, lipanj 2024.

## DIPLOMSKI ZADATAK br. 140

Pristupnica: **Tea Gavrančić (0036518441)**  
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija  
Profil: Elektrostrojarstvo i automatizacija  
Mentor: izv. prof. dr. sc. Zlatko Hanić

Zadatak: **Supravodljivi sinkroni generatori**

### Opis zadatka:

U okviru diplomskog rada potrebno je dati pregled supravodljivih materijala i njihovih karakteristika s naglaskom na visokotemperaturne supravodiče. Proučiti dostupnu literaturu vezanu uz istraživanje i razvoj supravodljivih generatora te dati pregled koncepata supravodljivih generatora za vjetroturbine. Postaviti zahtjeve za dizajn supravodljivog sinkronog generatora. Dizajnirati supravodljivi sinkroni generator. Komentirati dobivene rezultate te dati kritički osvrt na usporedbu supravodljivih sinkronih generatora s generatorima izvedenim konvencionalnim tehnologijama.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

*Prvenstveno bih se htjela zahvaliti svojim roditeljima i sestri, za pružanje kontinuirane podrške i pomoći na životnom i akademskom putu.*

*Zahvaljujem se mentoru, prof.dr.sc. Zlatku Haniću na predanom vodstvu tijekom izrade ovog diplomskog rada.*

*Hvala Silvi i Tomislavu na tome što su u svakom trenutku bili tu za mene.*

*Na kraju, hvala svim mojim prijateljima koji su mi obilježili studentske dane i pomogli mi da dođem do kraja.*

# SADRŽAJ

<b>1. Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2. Svojstva supravodljivosti</b>	<b>2</b>
2.1. Povijesni razvoj . . . . .	2
2.2. Supravodiči tipa I . . . . .	4
2.3. Supravodiči tipa II . . . . .	5
2.4. Podjela supravodiča . . . . .	7
2.4.1. Niskotemperaturni supravodiči . . . . .	7
2.4.2. Visokotemperaturni supravodiči . . . . .	9
2.5. Iznenadni gubitak supravodljivosti . . . . .	10
<b>3. Izrada visokotemperaturnih supravodiča</b>	<b>11</b>
3.1. ReBCO materijali . . . . .	11
3.1.1. YBCO materijali . . . . .	12
3.2. Materijali na bazi bizmuta . . . . .	13
3.3. Supravodljive zavojnice . . . . .	14
<b>4. Uloga supravodiča u električnim strojevima</b>	<b>16</b>
4.1. Supravodljivi generatori za primjenu u vjetroagregatima . . . . .	17
<b>5. Dizajn generatora</b>	<b>19</b>
5.1. Generator sa supravodičima . . . . .	20
5.2. Generator s permanentnim magnetima . . . . .	27
5.3. Analiza rezultata simulacija . . . . .	36
<b>6. Zaključak</b>	<b>38</b>
<b>Literatura</b>	<b>39</b>

# 1. Uvod

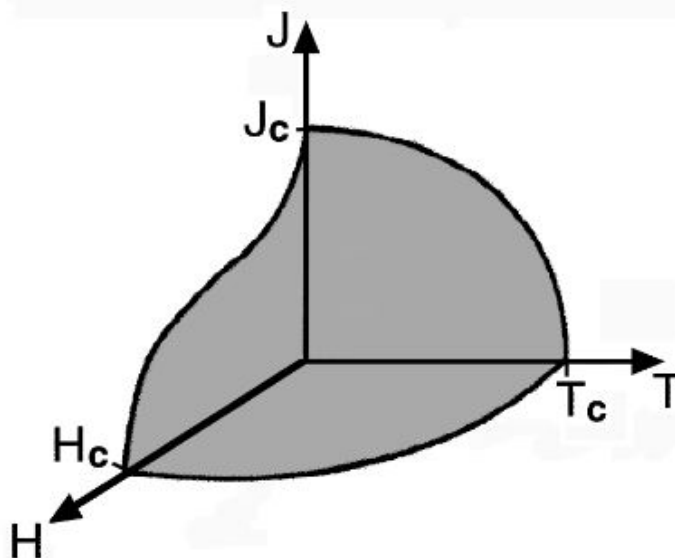
Tehnološki napretci modernog doba i rast ljudske populacije dovode do sve veće potrošnje zaliha prirodno dostupnih materijala, od kojih se mnogi ne obnavljaju dovoljno brzo za potrebe tržišta i modernog života. S obzirom da za sobom vuku katastrofalne posljedice kao što su velike klimatske promjene i atmosferski poremećaji, eksploatacija i iskorištavanje prirodnih resursa postaju sve veći problem za te naglašavaju važnost održivog razvoja te tranzicije na ekološko i zeleno gospodarjenje. Razvojem tehnologije primjetan je trend odmaka od industrija koje su među najvećim onečišćivačima atmosfere štetnim plinovima, a to su automobilska i energetska industrija. Sve se više ulaže u razvijanje tehnologija obnovljivih izvora energije, a jedno od najbrže rastućih industrija je energija vjetra. Upravo zahvaljujući svom razvoju, ova grana tržišta stvara sve veće potrebe za poboljšanjem iskoristivosti vjetra te povećanjem snage samih vjetroturbina. Primjena supravodljive tehnologije u tom kontekstu trenutno je jedina koja omogućuje napredak u dizajnu i izgradnji vjetroagregata sa snagama preko 10 MW, osobito za izgradnju vjetroelektrana na morskoj pučini.

U ovom radu je napisan pregled tehnologije supravodljivosti te se istražuje primjena visokotemperaturnih supravodljivih materijala u dizajnu generatora za vjetroturbine od 10 MW. Simulacija generatora je rađena u programu Ansys Motor-CAD, a uz supravodljivi prikazan je i dizajn sinkronog generatora s permanentnim magnetima, kao i analiza rezultata i usporedba rada ta dva stroja.

## 2. Svojstva supravodljivosti

Supravodljivost po definiciji je svojstvo određenih materijala da na vrlo niskim temperaturama gube električni otpor i izbacuju iz sebe magnetsko polje ograničene vrijednosti, ovisno o vrsti materijala.

Svojstvo supravodljivosti nekog materijala ovisi o temperaturi  $T$ , magnetskom polju  $H$  i gustoći struje  $J$ , gdje svi parametri moraju biti ispod svojih kritičnih vrijednosti kako bi materijal bio supravodljiv, u suprotnom postoji određeni električni otpor vodiča. Odnos ta tri parametra je prikazan na slici 2.1, gdje se supravodljivo područje nalazi unutar osjenčanog dijela krivulje, a kritične vrijednosti su označene s  $T_c$ ,  $H_c$  i  $J_c$ .



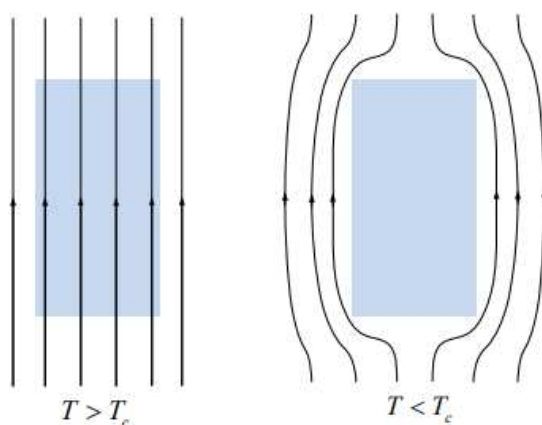
Slika 2.1: Odnos  $T_c$ ,  $H_c$  i  $J_c$  kod pojave supravodljivosti

### 2.1. Povijesni razvoj

Pojavu supravodljivosti je početkom 20. stoljeća otkrio fizičar Heike Kamerlingh Onnes, koji je radio istraživanja o ponašanju materijala na niskim temperaturama. U svojim eksperimentima uspio je spustiti temperaturu žive dovoljno nisko i tako otkrio kompletno nestajanje električnog otpora ispod kritične temperature od 4,16 K, odnosno  $-269^{\circ}\text{C}$ . Naknadno se ot-



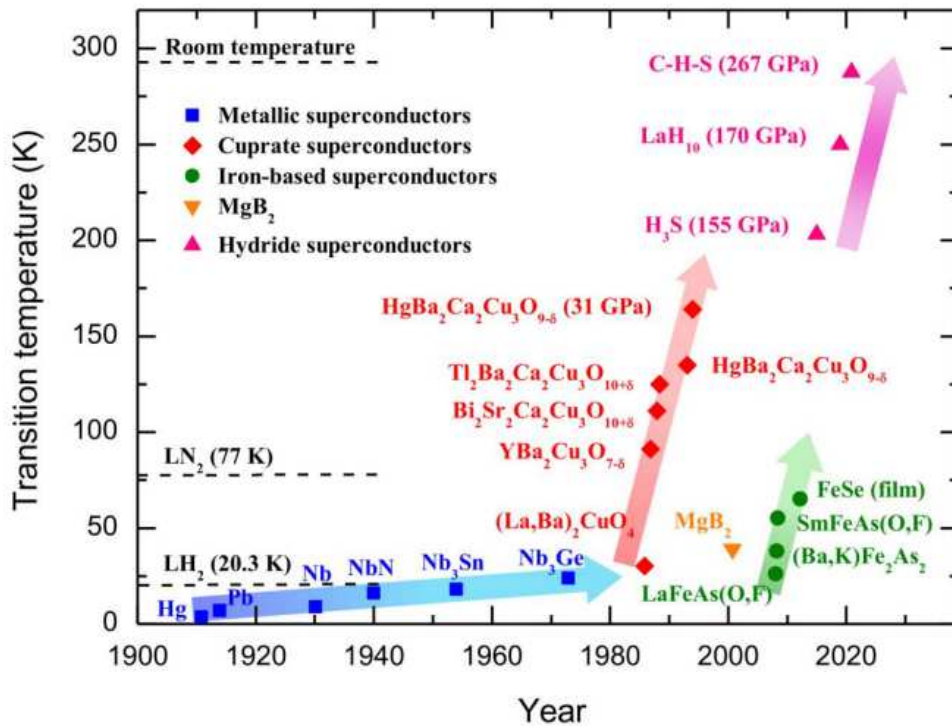
krilo i čudno ponašanje magnetskog polja kod različitih vrsta supravodiča. Kod jedne vrste supravodljivog materijala magnetsko polje kompletno nestaje iz vodiča nakon dostizanja kritične temperature, što je fenomen poznat kao Meissnerov efekt prikazan na slici 2.2. Takvi materijali tvore supravodiče tipa I. Kod druge vrste materijala, korištenih za izradu supravodiča tipa II, određena količina magnetskog polja prodire kroz sam supravodič i stvara vrtlog struje, tako tvoreći područje djelomične supravodljivosti.



**Slika 2.2:** Meissnerov efekt kod supravodiča [6]

Nastavkom istraživanja pronađeno je još supravodljivih materijala, od kojih određeni broj njih dostiže supravodljivo stanje na višim temperaturama. Te se temperature kreću od približno 80 do 120 K, što se pokazalo kao nevjerojatno otkriće s obzirom na različite načine hlađenja takvih materijala. Za postizanje temperatura koje su vrlo blizu apsolutnoj nuli (0 K) koristi se tekući helij, koji je skup, teško dostupan i reaktivan element te se brzo veže za druge elemente i zahtijeva posebno rukovanje, a u svijetu se većinom koristi u vojne svrhe pa je i teško nabavljiv. S druge strane, za temperature od oko 90 K može se koristiti tekući dušik, koji se može jeftino i lako napraviti u opremljenim laboratorijima fizike i kemije, što je još i u prošlom stoljeću otvorilo put prema bržem razvoju supravodljivih materijala koji su pristupačniji i šire dostupni za primjenu u svakodnevnoj tehnologiji.

Na slici 2.3 prikazan je razvoj supravodičkih materijala kroz povijest, gdje je x vremenska os, a na y-osi su predstavljene kritične vrijednosti temperatura na kojima ti vodiči postaju supravodljivi. Isctrkane vrijednosti temperature predstavljaju granice različitih hlađenja materijala, gdje je "LN" oznaka za tekući dušik (eng. *Liquid Nitrogen*), a "LH" za tekući helij (eng. *Liquid Helium*).



Slika 2.3: Razvoj supravodiča kroz povijest [8]

Niskotemperaturni metalni supravodiči označeni su plavom bojom, materijali na bazi željeza zelenom bojom, ružičastom bojom su označeni spojevi s vodikom, dok narančasta strelica predstavlja supravodiče na bazi bakra, tj. kuprate. Kuprati su najrašireniji visokotemperaturni vodiči; bakar se najčešće spaja s barijem i bizmutom, iako su česti i spojevi s itrijem i živom. Upravo je otkriće kupratnih materijala omogućilo širu upotrebu supravodiča za proizvodnju i distribuciju električne energije.

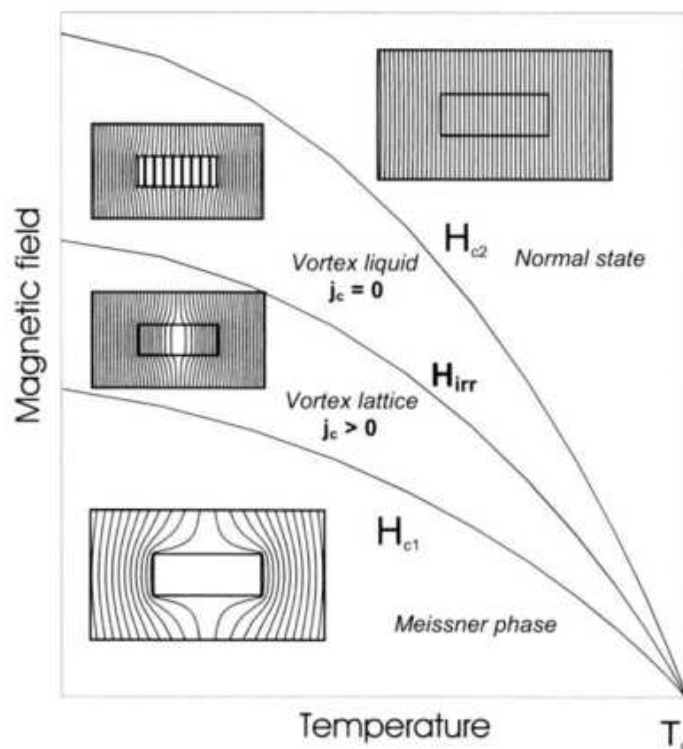
## 2.2. Supravodiči tipa I

Supravodiči tipa I su materijali koji u stanju supravodljivosti kompletno odbijaju magnetsko polje, što je svojstvo Meissnerovog efekta prikaznog na slici 2.2. Kad se ohlade ispod kritične temperature  $T_C$ , odmah prelaze u potpuno supravodljivo stanje. S druge strane, odmah nakon što se jakost magnetskog polja poveća iznad kritične vrijednosti  $H_C$  dolazi do kompletnog uništenja supravodljivosti. Zbog svoje osjetljivosti i niske vrijednosti  $H_C$ , nisu toliko pogodni za primjenu u modernim tehnologijama, iako se mogu koristiti za neke uređaje koji ne zahtijevaju jako magnetsko polje.

## 2.3. Supravodiči tipa II

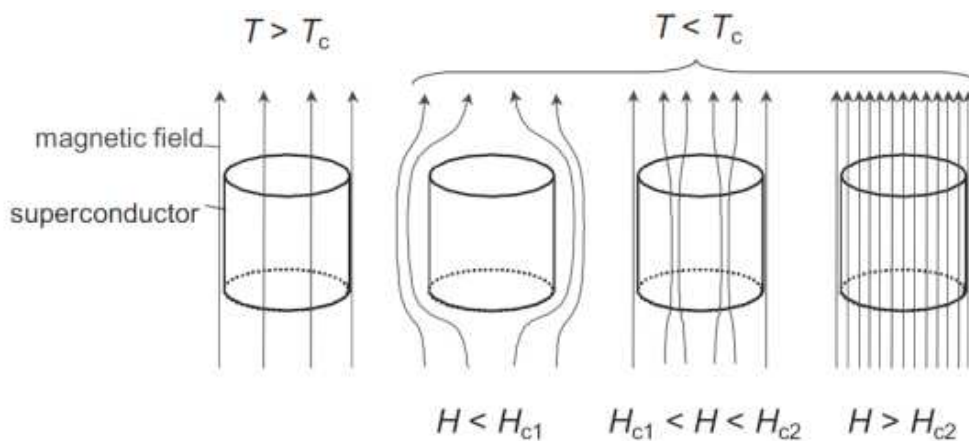
Za razliku od tipa I, supravodiči tipa II nemaju homogenu strukturu materijala. Kao posljedica nehomogenosti, unutar vodiča se nalaze mali kanali kroz koje može proći tok magnetskog polja i stoga postoji određeni interval vrijednosti temperature u kojem se magnetsko polje ne odbija od vodiča.

Na grafu na slici 2.4 prikazana su tri stanja supravodiča tipa II prema odnosu jakosti magnetskog polja  $H$  i kritične temperature  $T_C$ . Ispod donje kritične vrijednosti magnetskog polja  $H_{C1}$  nalazi se potpuno supravodljivo Meissnerovo područje, dok je iznad gornje kritične vrijednosti  $H_{C2}$  normalno područje vodljivosti vodiča. Treće područje vođenja supravodiča tipa II je vrtložno stanje (eng. *vortex*), koje se nalazi u intervalu između gornje i donje kritične vrijednosti  $H_{C1}$  i  $H_{C2}$ . U tom stanju ovakvi supravodiči zadržavaju svojstvo vođenja struje bez električnog otpora, ali za razliku od tipa I, dopuštaju prodiranje jednog dijela magnetskog polja kroz kanale koji se nalaze unutar vodiča.



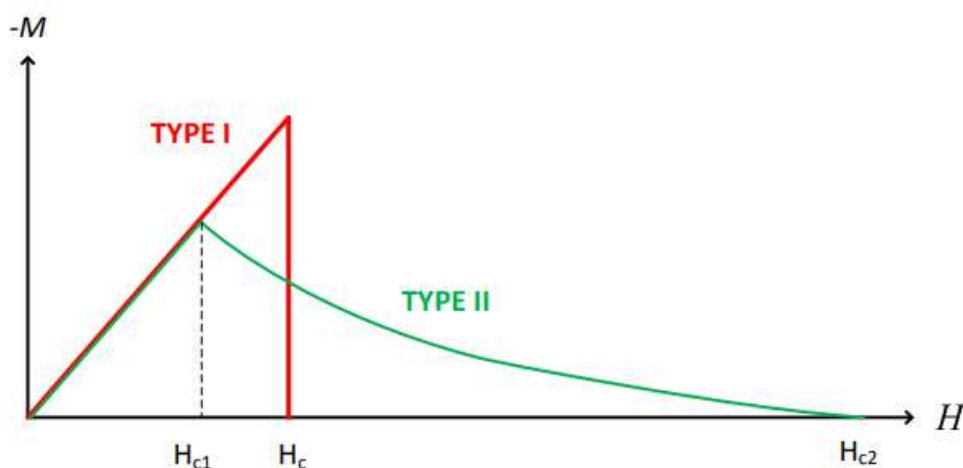
Slika 2.4: Supravodiči tipa II [6]

Na slici 2.5 grafički je prikazan odnos magnetskog polja i supravodiča tipa II. Ovaj tip ima prijelazno vrtložno stanje, dok se supravodič tipa I ponaša kao savršen dijamagnet koji po doseg kritične vrijednosti magnetskog polja  $H_C$  odmah gubi svoja supravodljiva svojstva i magnetizaciju, kao što je prikazano na slici 2.2. Za interval vrijednosti između  $H_{C1}$  i  $H_{C2}$  može se uočiti manji broj silnica magnetskog toka koje prodiru u vodič.



Slika 2.5: Magnetsko polje kod supravodiča tipa II [6]

To svojstvo dopušta pojavu djelomične supravodljivosti koja je dugotrajnije održiva nego potpuna, s obzirom da podnosi veću vrijednost magnetskog polja bez gubitka samog svojstva supravodljivosti. Iz toga proizlazi i mogućnost vođenja jače struje, što omogućuje korištenje ovakvih vodiča u raznim tehnologijama koje zahtijevaju jake magnete, poput magnetske rezonance i prijenosa električne energije. Slika 2.6 grafički prikazuje magnetizaciju supravodiča tipa I i II kad na njih djeluje vanjsko magnetsko polje. Tip I ima mogućnost jače magnetizacije, ali se kompletna supravodljivost gubi nakon dostizanja kritične vrijednosti  $H_c$ , dok se kod tipa II može uočiti postepeno smanjenje supravodljivosti između gornje i donje kritične vrijednosti  $H$ . Gubitak određenog postotka supravodljivosti je prihvatljiv kompromis s obzirom na dobitak većeg intervala vrijednosti struja i magnetskog polja unutar kojeg postoji djelomična supravodljivost. Trenutno je većina supravodiča korištenih u strojevima i komercijalnoj tehnologiji tipa II.



Slika 2.6: Magnetizacija supravodiča tipa I i II [6]

## 2.4. Podjela supravodiča

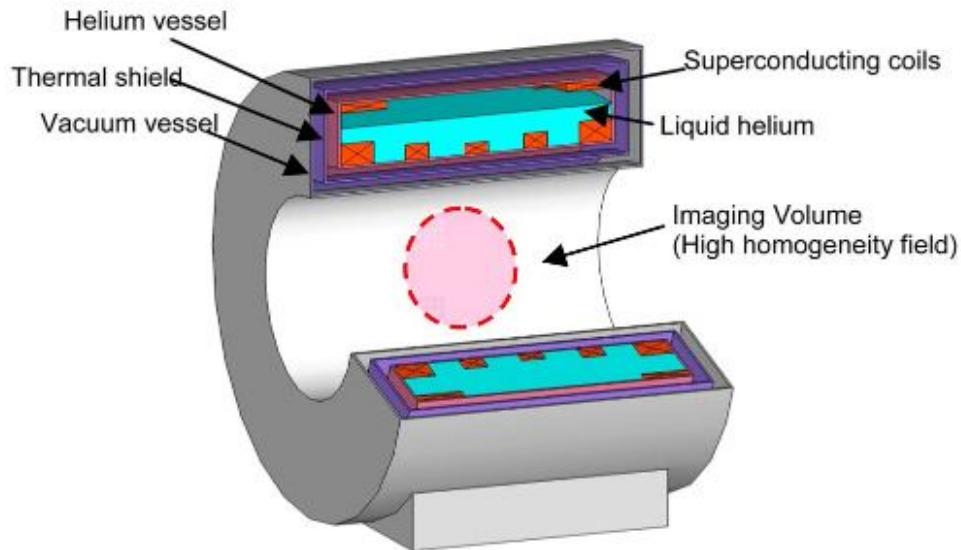
Uz dosad navedenu podjelu supravodiča na tip I i tip II, postoji još jedna klasifikacija na nisko- i visokotemperaturne vodiče. Prva podjela odnosi se na ponašanje supravodiča u magnetskom polju, dok se druga odnosi na kritičnu temperaturu  $T_C$ , tj. stupnju Kelvina na kojem materijal postaje supravodljiv. Češće se upotrebljava podjela u ovisnosti o temperaturi, s obzirom da supravodiči tipa I nisu toliko primjenjivani u praksi.

### 2.4.1. Niskotemperaturni supravodiči

Materijali čije se svojstvo supravodljivosti pojavljuje na temperaturama bliskim apsolutnoj nuli (0 K) nazivaju se niskotemperaturnim supravodičima (eng. *Low Temperature Superconductors* - LTS). To su bili prvi otkriveni materijali s tim svojstvom i dugo vremena se vjerovalo da supravodljivost neće biti primjenjiva u širokoj upotrebi. Takvi materijali imaju kritičnu temperaturu ispod 30 K i uglavnom su bazirani na legurama olova, žive i niobija.

Olovo i živa bili su prvi elementi kod kojih se otkrilo stanje supravodljivosti, ali obzirom da imaju nisku vrijednost kritičnog magnetskog polja, njihova je primjena relativno ograničena. To znači da ako supravodljivim materijalom poteče struja veća od određene vrijednosti, što je kod žive veoma niska razina struje, stvara se magnetsko polje veće od zadane kritične vrijednosti te izbacuje materijal iz supravodljivog stanja.

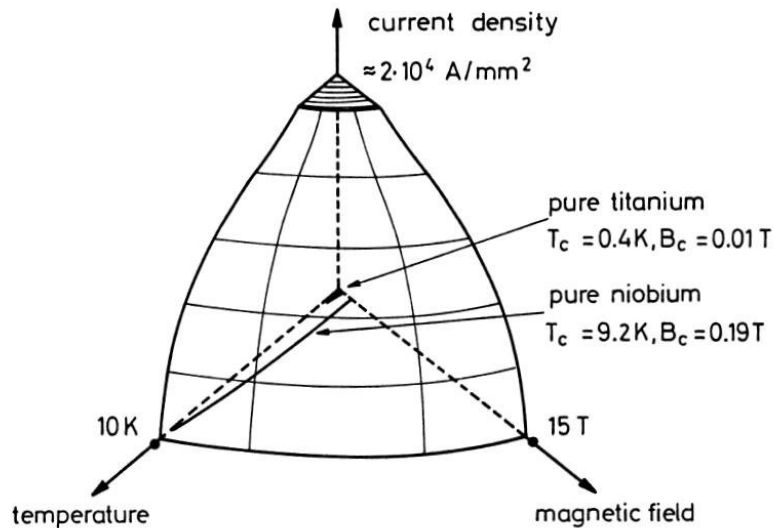
Element najčešće korišten za izradu niskotemperaturnih supravodiča je niobij, uglavnom u legurama s olovom ili titanijem. Prvi supravodljivi magnet napravljen s žicama od niobija proizveden je sredinom 20. stoljeća, a korišten je za različita istraživanja na atomskoj razini. Daljim napretkom tehnologije počinje se koristiti za istraživanja nuklearne fuzije i ubrzanje čestica, a komercijalizacijom proizvodnje supravodljivih žica razvijaju se prve magnetske rezonance, što je jedan od najpoznatijih primjera tehnološke inovacije temeljene na supravodičima.



**Slika 2.7:** Konstrukcija magnetne rezonance - MRI [7]

Napravljena od legure niobija i titanija (Nb-Ti), magnetna rezonanca u medicini (eng. *Magnetic Resonance Imaging - MRI*) koristi supravodljive magnete za stvaranje magnetskog polja jakosti od nekoliko tesla radi dobijanja detaljnih slika unutrašnjosti ljudskog tijela. Slika 2.7 prikazuje presjek MRI stroja napravljenog sa supravodljivim zavojnicama hlađenim tekućim helijem. Stroj sa slike je jedna od najstarijih supravodljivih rezonanci, ali je još uvijek u upotrebi ovakav dizajn i konstrukcija MRI.

Na slici 2.8 prikazan je graf odnosa kritičnih vrijednosti temperature, jakosti magnetskog polja i gustoće struje kod legura niobija i titanija, gdje se supravodljivo područje nalazi unutar plohe. Za usporedbu su dodane vrijednosti vodiča napravljenih od čistog niobija i titanija, a vidljive su njihove značajno manje vrijednosti magnetskog polja.



Slika 2.8: Odnos  $T_c$ ,  $H_c$  i  $J_c$  kod Nb-Ti [6]

## 2.4.2. Visokotemperaturni supravodiči

Materijali sa svojstvom supravodljivosti koja se pojavljuje na temperaturama većim od 77 K nazivaju se visokotemperaturnim supravodičima (eng. *High Temperature Superconductors – HTS*), što je temperatura vrelišta dušika te je zbog toga postavljena kao donja temperaturna granica. Nakon otkrića takvih materijala, počelo je daljnje istraživanje kako se mogu iskoristiti i implementirati u raznim industrijama, primarno kod proizvodnje električne energije. Takva primjena je napokon bila moguća, s obzirom da se materijali s kritičnim temperaturama višim od 80 K mogu hladiti korištenjem tekućeg dušika, koji je lako dostupan element. Uz to, sam proces ukapljivanja dušika moguće je izvesti i u najjednostavnijim laboratorijima pa je problem hlađenja vodiča postao značajno jednostavniji. Jedan od nedostataka takvih materijala je što većina njih nisu metali već nesavitljiva keramika, što za posljedicu ima težu implementaciju u tehnologiji. Pojava visokotemperaturnih supravodiča dovela je do ideje o budućnosti proizvodnje električne energije koja se temelji na korištenju supravodljivosti u konstrukciji raznih komponenti elektrana, primarno generatora, kao i drugih strojeva za koje je potrebno stvaranje jakog magnetskog polja.

U tablici 2.1 su prikazani neki od najčešće korištenih spojeva u supravodljivoj tehnologiji i njihove kritične temperature. U nastavku rada su dodatno objašnjeni neki od navedenih elemenata.

**Tablica 2.1:** Visokotemperaturni supravodljivi elementi i njihove kritične temperature [3]

Formula	Oznaka	$T_c$
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	Y-123	92 K
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$	Bi-2212	85 K
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$	Bi-2223	110 K
$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_6$	Tl-2201	80 K
$\text{HgBa}_2\text{Cu}_4$	Hg-1201	94 K

## 2.5. Iznenadni gubitak supravodljivosti

Pojam iznenadnog gubitka supravodljivosti (IGS), u engleskoj literaturi *quench*, predstavlja točku u kojoj materijal naglo gubi sva supravodljiva svojstva i prelazi u normalno stanje sa svojim standardnim karakteristikama. Pojavljuje se kad minimalno jedan od ključnih parametara - temperatura, magnetsko polje ili gustoća struje, dođe na vrijednost koja je veća od kritične. U primjeni supravodiča se to uglavnom događa zbog toga što se povećala temperatura ili što je potekla prevelika struja, koja je stvorila magnetsko polje veće od dopuštene vrijednosti za pojavu supravodljivosti.

Pojava IGS-a može biti veoma štetna jer može uzrokovati nagle gubitke energije i oštećenja supravodiča. Naglim gubitkom supravodljivosti sva pohranjena energija pretvara se u toplinu koja može dovesti do uništenja uređaja. Zaštita od IGS-a je važan dio dizajna supravodljivih uređaja, posebno kod sustava korištenih u medicini ili transportu, gdje je direktno ugroženo ljudsko zdravlje.

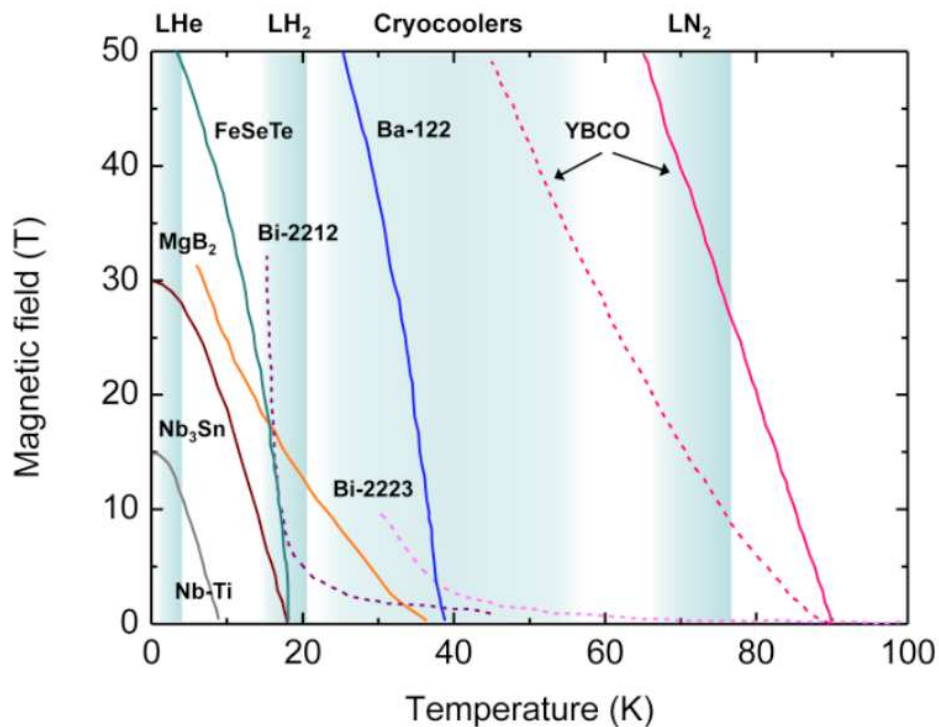


## 3. Izrada visokotemperaturnih supravodiča

Neki od najčešće korištenih supravodljivih materijala u trenutnoj tehnologiji su razne legure barijevog bakrenog oksida, od kojih su najraširenije YBCO i ReBCO. Njihov nedostatak je što se ponašaju kao klasična keramika, tj. nisu toliko tvrdi kao metali koji se inače koriste, što znači da je potrebno naći drukčije izvedbe elektroničkih komponenti koje zahtijevaju veću tvrdoću. Pored barija, bakar se koristi i u kombinaciji s bizmutom, tako tvoreći BS-CCO obitelj supravodljivih materijala korištenih kod strojeva gdje je potrebna velika jakost magneta ili struje.

### 3.1. ReBCO materijali

ReBCO je obitelj kemijskih spojeva baziranih na barijevim i bakrenim oksidima koji se rijetko nalaze u Zemljinoj kori (eng. *Rare-earth Barium Copper Oxide*), spojenih u strukturu kristalne rešetke. Postaju supravodljivi na kritičnoj temperaturi ( $T_C$ ) od oko 90 K. Ti supravodiči imaju potencijal izdržati jača magnetska polja od drugih sličnih materijala i najviše se koriste za izradu supravodljivih traka te za razvoj visokoučinkovitih, kompaktnih i energetski efikasnih magneta za primjenu kod strojeva poput magnetske rezonancije (MRI) i akceleratora čestica, gdje omogućuju precizniju i snažniju medicinsku dijagnostiku i znanstvena istraživanja. ReBCO supravodiči su trenutno jedni od vodećih materijala za razvoj novih tehnologija baziranih na supravodljivosti, s obzirom da imaju veću vrijednost kritične gustoće struje od ostalih HTS materijala.



**Slika 3.1:** Odnosi temperature i magnetskog polja kod različitih vrsta supravodiča [8]

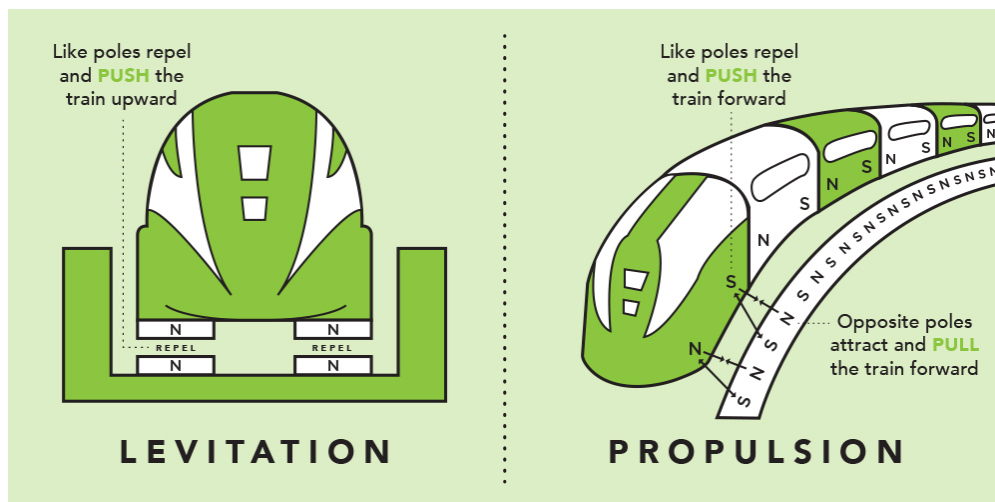
Grafom na slici 3.1 su prikazane karakteristike različitih supravodičkih materijala u ovisnosti o temperaturi i magnetskom polju. Na vrhu su označeni različiti načini hlađenja materijala, ovisno o vrijednosti na koju je potrebno sniziti temperaturu supravodiča. Oznaka "LHe" predstavlja tekući helij, "LH<sub>2</sub>" tekući vodik, "cryocoolers" u prijevodu s engleskog predstavljaju kriohladnjake, dok je "LN<sub>2</sub>" tekući dušik. Na grafu se može primijetiti da su YBCO i Bi-2223 vrste HTS materijala s najvišom kritičnom temperaturom i mogu se hladiti tekućim dušikom. Razlika je što YBCO na temperaturama višim od 77K može podnijeti nekoliko puta veće jakosti magnetskog polja prije gubitka supravodljivosti, dok su za Bi-2223 i ostale ReBCO vodiče potrebne temperature niže od točke vrelišta dušika. Iz tog razloga se YBCO najčešće koristi u tehnologijama za koje je potrebno veće magnetsko polje.

### 3.1.1. YBCO materijali

Prvi materijal koji je pokazao visokotemperaturnu supravodljivost je bio kemijski spoj itrijevog barij i bakar oksida YBCO (eng. *Yttrium barium copper oxide*), s kritičnom temperaturom od 93K. Itrij pripada grupi elemenata koji se rijetko nalaze u Zemljinoj kori te su zbog toga YBCO supravodiči dio ReBCO skupine supravodljivih materijala.

Najpoznatiji primjer korištenja YBCO supravodiča je Maglev, čije ime dolazi od kombinacije riječi magnetska levitacija (eng. *Magnetic Levitation*). Maglev je vrsta vlaka koji koristi tehnologiju supravodiča tipa II za kretanje po tračnicama, a da pritom ne postoji direktan kontakt između njih i kotača. Na slici 3.2 prikazan je princip rada koji ima dvije značajke

- levitacija i propulzija. Levitacija u mjestu je moguća zahvaljujući magnetima istih polova ugrađenih u vlak i tračnice, koji se međusobno odbijaju i tako drže vlak suspendiran nekoliko centimetara iznad tračnica. U proizvodnji tih magneta korišteni su supravodljivi materijali koji omogućuju generiranje dovoljno jakog magnetskog polja za upravljanje vlakom. Uz magnete, postavljeni su i metalni vodiči čije međudjelovanje s magnetskim poljem vlaka u pokretu inducira električnu struju koja dalje generira magnetsko polje unutar drugih magneta. Dodatno, po tračnicama su postavljeni magneti obrnutih polova, što znači da će se pri kretanju vršiti dva oblika magnetskog međudjelovanja koji omogućavaju propulziju. Prvo međudjelovanje je privlačenje različitih polova magneta, koji povlače vlak prema naprijed, dok je drugo odbijanje istih polova koje gura vlak od sebe. Maglev je jedan od najsigurnijih načina prijevoza, s obzirom na izrazito velike sile koje drže vlak na tračnicama. Uz Maglev, YBCO se većinom koristi za istraživanja u području kvantne i nuklearne fizike zbog kemijskih struktura ovog spoja.



Slika 3.2: Princip rada Maglev vlaka [1]

Jedan od problema koji ograničava upotrebu ovog materijala u tehnologiji vezan je za obradu samog YBCO materijala. Za razliku od materijala na bazi bizmuta, itrij u kombinaciji s ostalim elementima stvara kruti spoj koji se ne može lako oblikovati u korisne supravodljive žice. S druge strane, YBCO materijali imaju veću vrijednost kritičnog magnetskog polja na višim temperaturama, što ih čini pogodnijim za pravljenje jakih magneta.

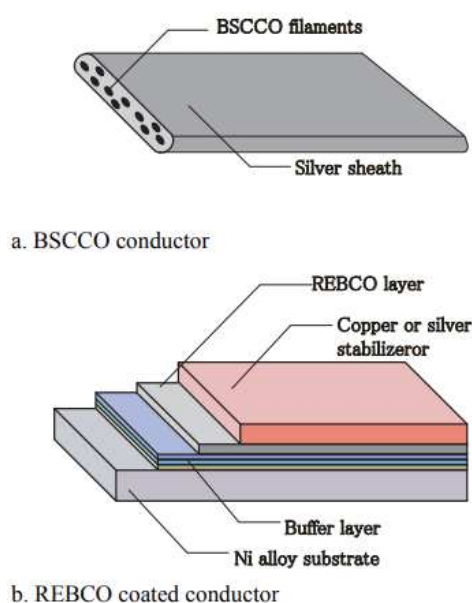
### 3.2. Materijali na bazi bizmuta

Bizmut je element koji se kombinira sa stroncijem te barijevim i bakrovim oksidima, tvoreći skupinu kemijskih spojeva BSCCO (eng. *Bismuth strontium calcium copper oxide*). Kritične temperature ovih spojeva su između 85 i 115K, što ih čini supravodičima s najvišom

vrijednosti temperature potrebne za supravodljivost.

Postoje tri vrste BSCCO supravodiča, Bi-2201, Bi-2212 i Bi-2223, gdje prva vrsta pripada niskotemperaturnim supravodičima, a druge dvije su visokotemperaturni, s različitim kritičnim temperaturama.

BSCCO supravodiči se uglavnom koriste za izradu dugih supravodljivih žica, jer je sam materijal savitljiviji od YBCO spojeva, što znači da ima puno veću primjenu u tehnologiji supravodljivih strojeva. Također se koriste kod izrade zaštitnih elemenata u strujnim krugovima visokog napona. YBCO se, s druge strane, više koristi za proizvodnju supravodljivih kondenzatora i spremnika energije zbog svoje veće gustoće struje u jačim magnetskim poljima.



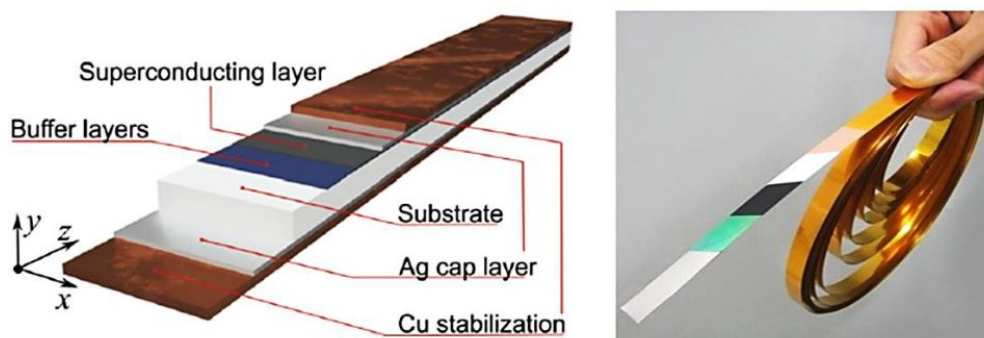
**Slika 3.3:** Struktura a) BSCCO i b) ReBCO supravodiča [4]

Na slici 3.3 su prikazane klasične strukture BSCCO i ReBCO supravodiča, tj. njihova konstrukcija u proizvodnji. Supravodiči na bazi bizmuta uglavnom se proizvode sa supravodljivim nitima unutar kalupa izrađenog od srebra ili nekog sličnog metala. S druge strane, ReBCO supravodiči često imaju više izolacijskih i zaštitnih slojeva oko supravodljivog materijala.

### 3.3. Supravodljive zavojnice

Konstrukcija supravodljivih zavojnica vrši se izvlačenjem supravodljivih materijala u trake koje mogu provoditi električnu energiju bez ikakvog električnog otpora i proizvode se u velikim duljinama, što je prikazano na desnoj strani slike 3.4. To omogućuje savijanje traka u magnetske zavojnice u svrhu generiranja iznimno velikih magnetskih polja. Takve zavojnice

su učinkovitije i imaju manji volumen za istu jakost polja u odnosu na tradicionalne bakrene namote, što je otvorilo mnoge mogućnosti za razvoj i stvaranje kompaktne i lagane opreme velikog kapaciteta za prijenos i proizvodnju energije.



**Slika 3.4:** Supravodljive trake [3]

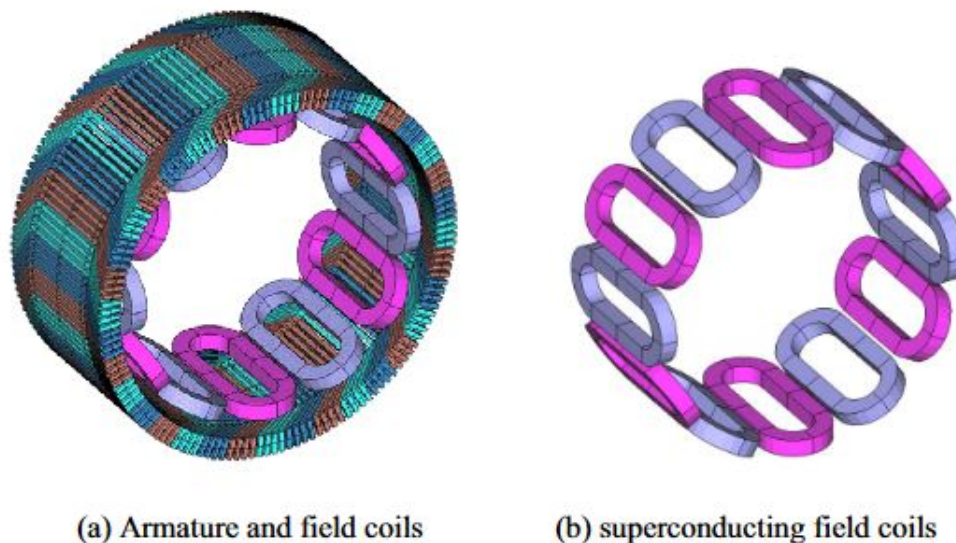
Pored generiranja jakog magnetskog polja, značajna prednost supravodljivih zavojnica je i niska potrošnja energije, jer jednom kad se ohlade ispod kritične temperature potrebne za supravodljivost, električni otpor nestaje i u teoriji mogu vječno provoditi struju bez potrebe za ulaganjem dodatne energije. U praksi je potrebno riješiti pitanje samog hlađenja i održavanja niske temperature, tj. uzeti u obzir utrošak energije potreban za taj proces. Na lijevoj strani slike 3.4 prikazan je jedan od načina izrade ovakvih traka, gdje je supravodljivi materijal okružen izolacijskim i stabilizacijskim slojevima, radi sigurnosti u slučaju gubitka supravodljivosti.

Uz navedene primjere, također se istražuju upotrebe supravodljivih zavojnica u aplikacijama obnovljivih izvora energije, kao što su kompaktni i učinkoviti generatori vjetroturbina i mrežni sustavi za pohranu energije. Generatori sa supravodljivim zavojnicama, s obzirom na gotovo nepostojeće gubitke i visok postotak korisnosti takvih materijala, nude kompaktnije i efikasnije rješenje za proizvodnju energije u odnosu na konvencionalne.

## 4. Uloga supravodiča u električnim strojevima

Električni strojevi svoju funkcionalnost temelje na postojanju promjenjivog magnetskog polja unutar strukture, gdje je snaga stroja proporcionalna magnetskoj indukciji u zračnom rasporu i gustoći struje u namotima. Takvo polje može se dobiti s raznim konstrukcijama električnog stroja, a koje variraju ovisno o primjeni i potrebi. Verzije dosadašnjeg klasičnog dizajna bili su strojevi s permanentnim magnetima i elektromagnetima, ali razvojem supravodljivih elemenata počinje se gledati na njihovu primjenu i u izvedbi električnih strojeva. Iskorištavanjem dva glavna svojstva supravodiča, nepostojanje električnog otpora i mogućnost postizanja velike jakosti magnetskog polja, može se povećati magnetska indukcija i gustoća struje, a samim time i snaga stroja, uz ultimativno manje dimenzije i veću korisnost.

Tehnički problemi koji se javljaju korištenjem ovakvih vodiča prvobitno su pitanja ispravne konstrukcije stroja i hlađenja do dovoljno niske temperature za nastanak efekta supravodljivosti. Jedan od ključnih nedostataka supravodiča u ovakvoj primjeni je povećanje gubitka energije kad je vodič kroz koji teče struja izložen promjenjivom magnetskom polju. To su gubici izmjenične struje usljed kojih nastaje dinamički otpor vodiča koji posljedično proizvodi toplinu i uzrokuje zagrijavanje supravodljivog materijala, što se mora uzeti u obzir kod konstrukcije s obzirom na potrebno hlađenje, a i na to da je čitav koncept stroja temeljen na postojanju promjenjivog polja.



**Slika 4.1:** Prikaz a) konstrukcije statora sa supravodljivim zavojnicama i b) rasporeda supravodljivih zavojnica [5]

Supravodiči su zbog svojih karakteristika prikladniji za stvaranje statičkog magnetskog polja, a ne dinamičkog, pa se konstrukcija istosmjernih strojeva vrši tako da su na stator namotani supravodiči, a rotor je izveden konvencionalno, kao što je prikazano na slici 4.1. Slika prikazuje supravodljive zavojnice poredane na armaturnom namotu statora. Potrebna je temperaturna izolacija između supravodljivih komponenti i onih koje rade na sobnoj temperaturi, što znači da će postojati određen zračni raspor između zavojnica i armaturnog namota. S obzirom da takav stroj nema željeznu jezgru, povećanjem magnetske indukcije će se povećati snaga bez potrebe za većom masom stroja, što je velika prednost kad su u pitanju zahtjevi za motorima s velikim snagama uz limitiran prostor. Što se tiče generatora, većinom se konstruiraju radi razvijanja elektrana s efikasnijim proizvodnim jedinicama, jer se sa supravodljivim materijalima postiže veća snaga i korisnost nego s konvencionalnim, uz proporcionalno manju masu stroja.

## 4.1. Supravodljivi generatori za primjenu u vjetroagregatima

Supravodljiva tehnologija posebno je primjenjiva kod izgradnje vjetroagregata, gdje su manja masa i veća snaga generatora jedni od najbitnijih faktora konstrukcije. Uzima se u obzir veličina cijele vjetroturbinе u odnosu na nazivnu snagu, gdje je krajnji cilj dobiti što veću ukupnu izlaznu snagu elektrane, uz što manji utjecaj na okoliš. Pored standardnih kopnenih, sve popularnije postaju vjetroelektrane koje se grade na morskoj pučini (eng. *offshore*), iako u Hrvatskoj primjena te tehnologije još uvijek nije zaživjela. Prednosti *offshore* vjetroelek-



trana očituju se u snazi vjetra i veličini vjetroagregata, prvenstveno jer je vjetar na pučini jači te ne postoje smetnje kao na kopnu. Dodatno, ne postoji ograničenje na veličinu vjetroagregata i stoga obje prednosti rezultiraju većom izlaznom snagom vjetroelektrane. *Offshore* elektrane imaju prednost u očuvanju biosustava, jer ne zahtijevaju krčenje šuma i uništavanje prirodnih puteva životinja te nemaju efekt vizualnog zagađenja okoliša. S druge strane, troškovi izgradnje i održavanja elektrana na pučini su i do tri puta veći nego na kopnu i stoga često nema financijske isplativosti za takve projekte.



Slika 4.2: Usporedba veličina različitih *offshore* vjetroturbina [2]

U slučajevima vjetroagregata supravodljivi generatori su u značajnoj prednosti u odnosu na standardne izvedbe, iz razloga što imaju dva do tri puta manju masu i volumen za istu izlaznu snagu te visok postotak korisnosti proizvodnje električne energije. To znači da bi se uvođenjem supravodljivog generatora za istu veličinu vjetroagregata snaga povećala minimalno dva puta, uz sve dodatne prednosti korištenja supravodiča kao što su jednostavno održavanje i stabilizacija elektroenergetskog sustava. Najviše se radi na razvoju supravodljivih generatora za primjenu kod *offshore* vjetroagregata, iz razloga što bi se mogla dobiti velika izlazna snaga uz minimalan broj samih vjetroagregata, tako smanjujući troškove izgradnje i održavanja elektrane.



## 5. Dizajn generatora

Prikaz realne primjene supravodiča u tehnologiji u ovom radu postignut je dizajniranjem i simuliranjem dva generatora, od kojih je jedan sa supravodljivim materijalima, a drugi klasični sinkroni generator s permanentnim magnetima. Dizajn je proveden u programu Ansys Motor-CAD i sve simulacije i podatci su izvedeni direktno iz programa.

Dizajn je rađen za generator za vjetroturbine velikih snaga, gdje se pokušala postići snaga od 10 MW na brzini od 12 okretaja po minuti (oznaka  $min^{-1}$  ili rpm, eng. *rotations per minute*) kod obje vrste generatora, s različitim parametrima. U analizu ulaze naponi i struja samog stroja, gustoća struje, magnetski tok unutar stroja, kao i moment na osovini. Generatori na vjetroturbinama mogu biti izvedeni tako da su direktno priključeni na mrežu, ali u ovom radu je pretpostavljeno da će biti spojeni na frekvencijske pretvarače koji će regulirati izlazne parametre i dalje prenositi struju na mrežu. Odabrani napon generatora je 3kV, što znači da će po izrazu

$$U_{DC} = 3000 \cdot \sqrt{2} = 4242V$$

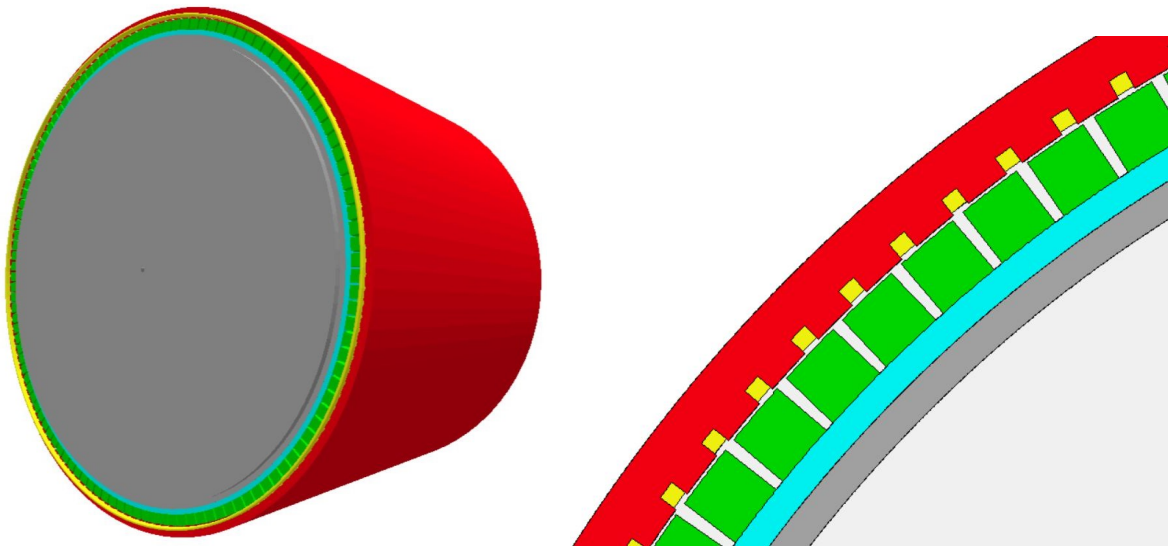
napon istosmjernog DC međukruga (eng. *DC bus voltage*) biti ograničen na 4242 V.

**Tablica 5.1:** Zahtjevi za dizajn generatora

Parametar	Oznaka	Vrijednost
Izlazna snaga	$P_{el}$	10 MW
Brzina	n	$12 min^{-1}$
Napon međukruga	$U_{DC}$	4242 V
Broj faza	m	3
Broj polova	p	120

## 5.1. Generator sa supravodičima

Generator sa supravodičima predstavljen u ovom radu napravljen je sa supravodljivim zavojnicama na statoru i s konvencionalno izvedenim rotorom s permanentnim magnetima. Program Ansys Motor-CAD ne nudi mogućnost simuliranja supravodljivog generatora, kao ni dodavanje materijala koji nema specifični otpor na temperaturi od 20°C. Iz tog razloga je u bazu podataka ubačen novi materijal i postavljena je najmanja dozvoljena vrijednost specifičnog otpora, što je u ovom slučaju bila  $10 \cdot 10^{-12} \Omega m$ . U izračunima korisnosti su se posebno oduzimali gubitci u bakru, s obzirom na to da su vodiči supravodljivi, a ne bakreni. Na slici 5.1 u nastavku prikazan je 3D model simuliranog generatora na lijevoj strani i dio poprečnog presjeka na desnoj strani.



**Slika 5.1:** Supravodljivi generator u programu Ansys Motor-CAD

Stator generatora označen je crvenom bojom, utori žutom, dok je ostatak stroja rotor sa sivo obojenom osovinom. Unutar utora se nalaze supravodiči, umjesto bakrenih vodiča. Na slici 5.2 u nastavku su ispisani parametri trofaznog supravodljivog generatora, za koji su zadane vrijednosti 144 utora i 120 polova, dok je dijametar statora 2,5 metra, a duljina motora je 2 metra. Sve vrijednosti u programu su prikazane u milimetrima.

Slot Type:	Parallel Slot	Rotor Type:	Surface Parallel
Stator Ducts:	None	Rotor Ducts:	None

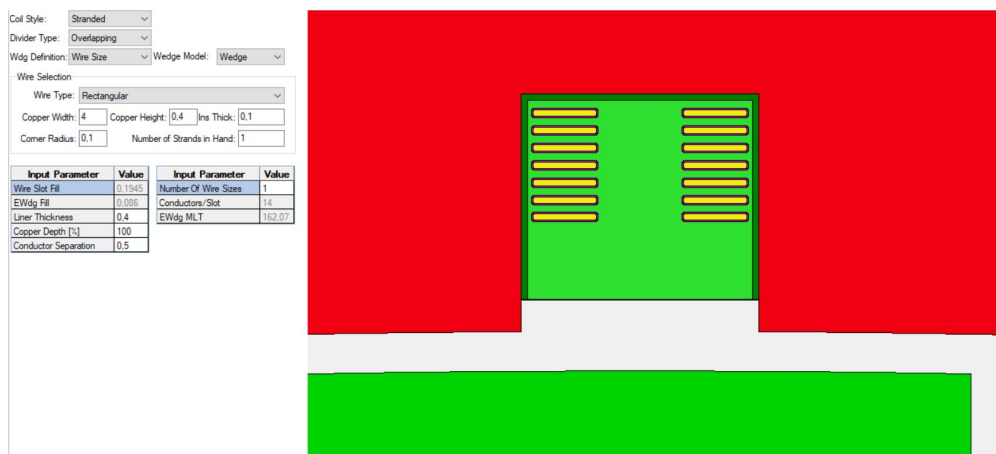
Stator Parameters	Value	Rotor Parameters	Value
Slot Number	144	Pole Number	120
Stator Lam Dia	2500	Magnet Thickness	50
Stator Bore	2400	Magnet Reduction	0
Slot Width	15	Magnet Arc [ED]	150
Slot Depth	15	Magnet Segments	1
Tooth Tip Depth	2	Airgap	2.5
Slot Opening	15	Banding Thickness	0
Tooth Tip Angle	15	Shaft Dia	2250
Sleeve Thickness	0	Shaft Hole Diameter	2200

Radial Dimensions	Value	Axial Dimensions	Value
Stator Lam Dia	2500	Motor Length	2000
Stator Bore	2400	Stator Lam Length	2000
Airgap	2.5	Magnet Length	2000
Banding Thickness	0	Magnet Segments	1
Sleeve Thickness	0	Rotor Lam Length	2000
Magnet Thickness	50	EWdg OH Mult [F]	1
Shaft Dia	2250	EWdg OH Mult [R]	1
Shaft Dia [F]	25	Wdg Extension [F]	5
Shaft Dia [R]	25	Wdg Extension [R]	5
Shaft Hole Diameter	2200	Shaft Extension [F]	30
		Shaft Extension [R]	0

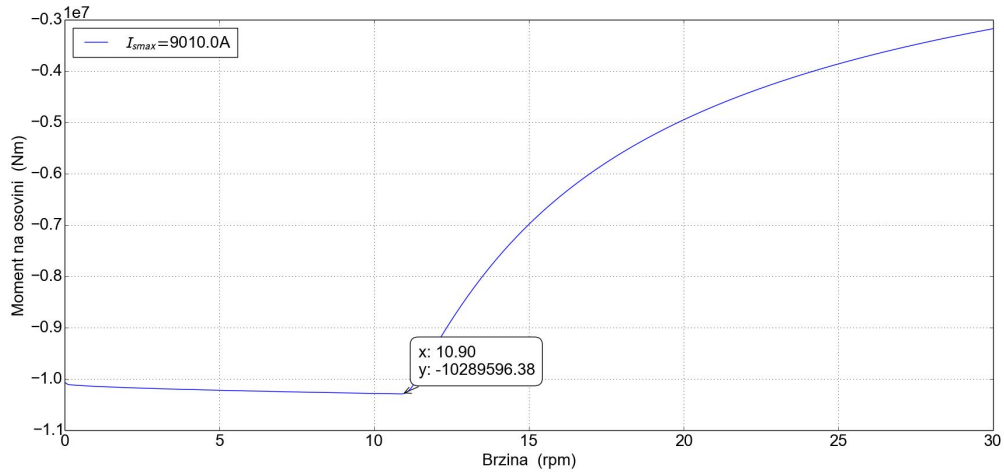
Slika 5.2: Zadani parametri supravodljivog generatora

Raspored vodiča u utorima prikazan je na slici 5.3. Odabran je tip vodiča s poprečnim presjekom u obliku pravokutnika sa zaobljenim rubovima, kako bi se što bolje simulirala sličnost s realnim supravodičima koji se koriste kod konstrukcije strojeva. Parametar Wire Slot Fill označava ispunjenost samog utora i ima vrijednost 19,45%, što je postavljeno kako bi se ostavio prostor u utoru za kriogeno hlađenje vodiča. Broj zavoja  $w_s$  je 7, korak svitka  $y$  je 1, broj paralelnih grana  $a$  je 2.

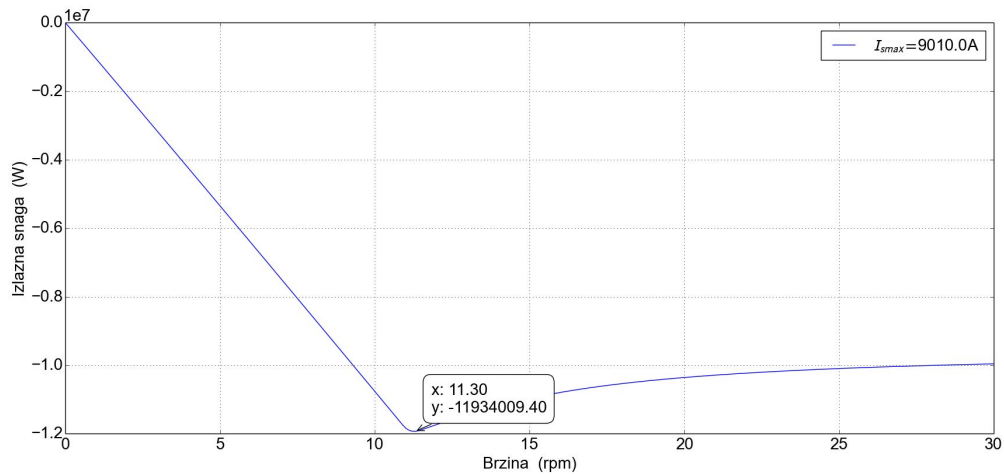


Slika 5.3: Prikaz vodiča u utorima

Pokretanjem simulacije sa svim navedenim parametrima generatora dobijaju se odzivi prikazani na slikama u nastavku. Grafovi su na negativnoj strani y-osi iz razloga što se radi o generatoru, koji je stroj suprotan motoru pa se u izračunima uzimaju negativne vrijednosti snage i momenta.



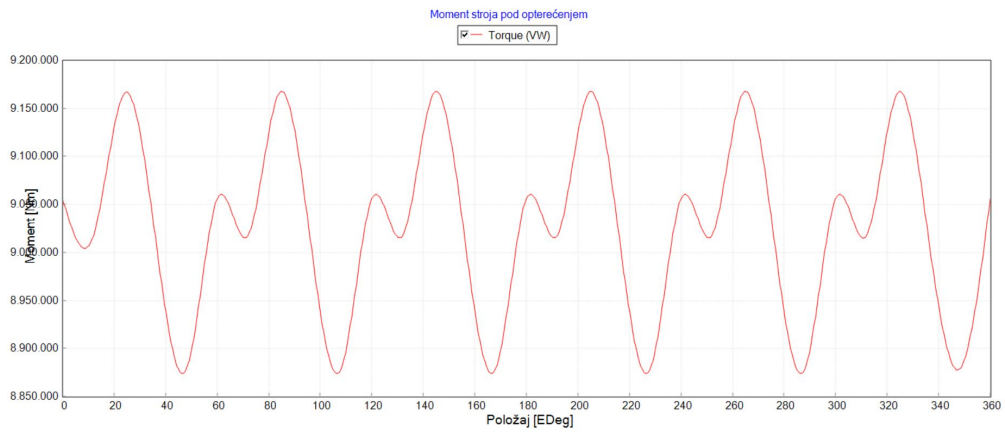
**Slika 5.4:** Momentna karakteristika generatora



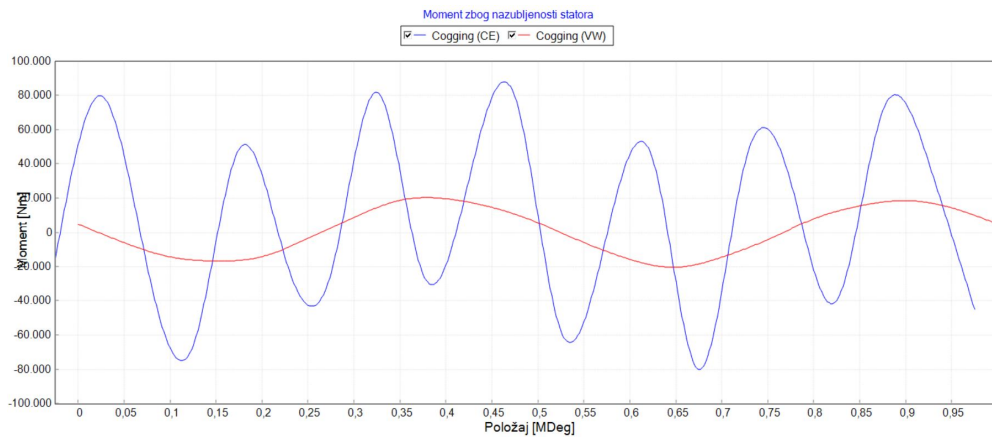
**Slika 5.5:** Izlazna snaga u ovisnosti o brzini

Karakteristike momenta i snage generatora su prikazane grafovima na slikama 5.4 i 5.5, s točkama maksimuma na brzini od otprilike  $11 \text{ min}^{-1}$ . Izlazna snaga stroja djelomično prelazi planiranih 10 MW na zadanoj brzini od  $12 \text{ min}^{-1}$ , što je prihvatljiv kompromis s obzirom na vrstu generatora.

U nastavku je prikazan valni oblik momenta generatora pod opterećenjem. Na sljedećim slikama grafovi su na pozitivnoj strani y-osi iz razloga što dio programa Ansys Motor-CAD koji simulira karakteristike momenta, izlaznog napona i magnetskog toka izvodi proračune pod pretpostavkom da se simulira motor. Svi grafovi su simulirani u ovisnosti o položaju u odnosu na nulti električni stupanj.

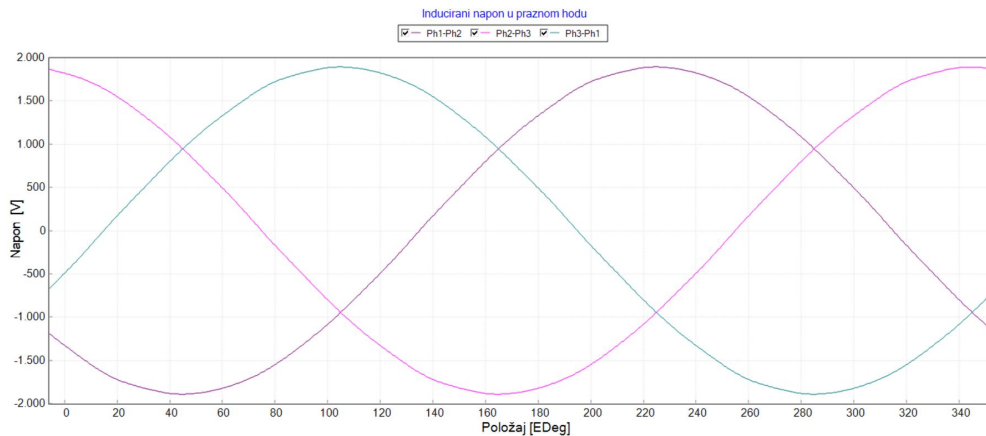


**Slika 5.6:** Valni oblik momenta stroja pod opterećenjem

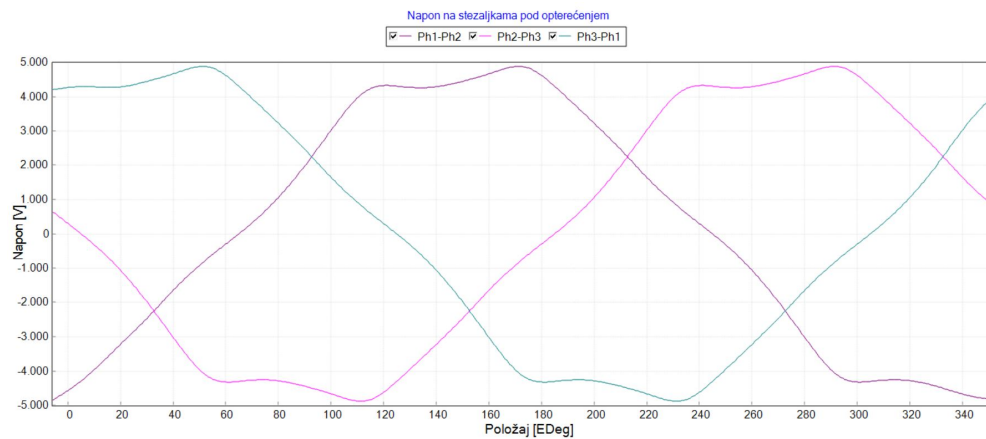


**Slika 5.7:** Moment zbog nazubljenosti statora

Mogu se primijetiti oscilacije na valnom obliku momenta stroja pod opterećenjem na slici 5.6, za razliku od obične momentne karakteristike sa slike 5.4, ali srednja vrijednost je uvijek ista. Vrijednosti momenta na osovini su izražene u MNm, što znači da oscilacije nisu značajne za ukupnu učinkovitost stroja. Moment stroja koji se javlja zbog nazubljenosti statora (eng. *cogging torque*) prikazan je na slici 5.7. Javlja se kao posljedica magnetskog međudjelovanja rotora sa zubima statora u praznom hodu i srednja vrijednosti je uvijek nula.

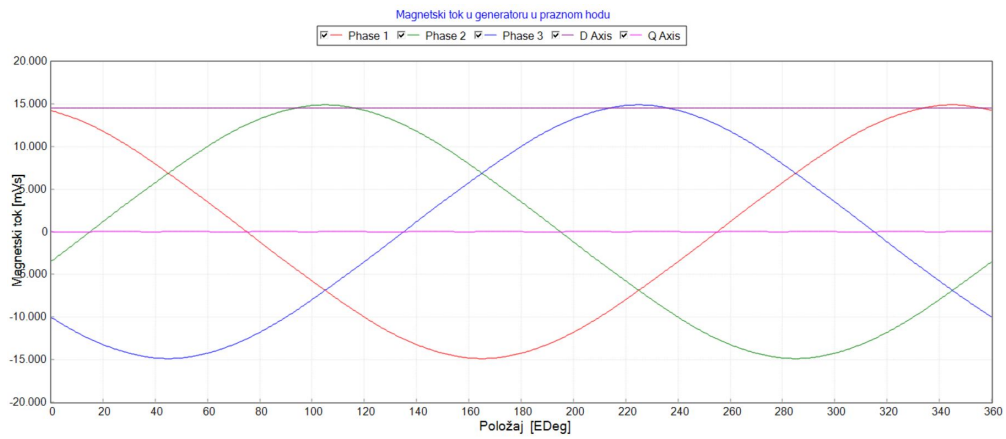


**Slika 5.8:** Inducirani napon u praznom hodu

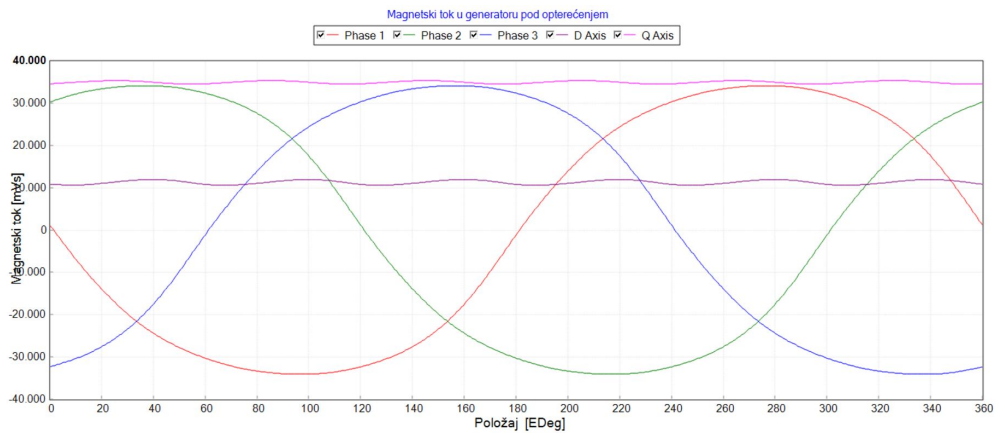


**Slika 5.9:** Napon na stezaljkama stroja pod opterećenjem

Slika 5.8 prikazuje inducirani napon stroja u praznom hodu i ima čisti sinusni oblik po svim fazama. Napon na stezaljkama stroja pod opterećenjem prikazan na grafu 5.9 nema toliko čiste sinusne funkcije po fazama, iako fazni naponi jesu periodični. U nastavku je prikazan magnetski tok unutar stroja koji se nalazi u praznom hodu na slici 5.10 i pod opterećenjem na slici 5.11. Maksimalne vrijednosti funkcija po fazama imaju značajno drukčije vrijednosti u dva slučaja. U dq-sustavu se u oba slučaja može uočiti razlika u vrijednostima magnetskog toka u obje osi. U praznom hodu q-os ima vrijednost nula, dok pod opterećenjem d-os ima vrijednost blisku nuli, a q-os vrijednost maksimuma pojedinačne faze magnetskog toka.

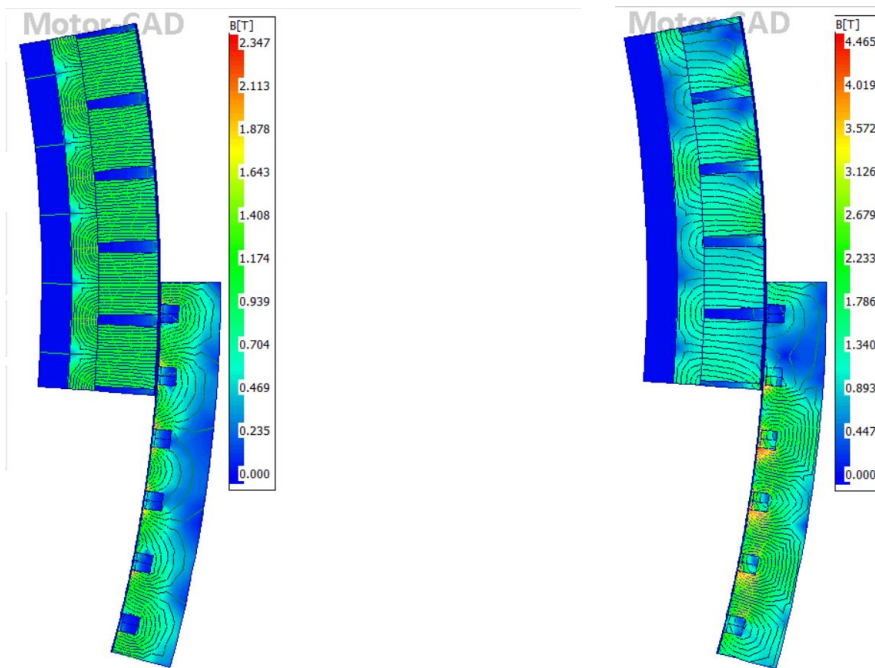


**Slika 5.10:** Magnetski tok u generatoru u praznom hodu



**Slika 5.11:** Magnetski tok u generatoru pod opterećenjem

U nastavku su prikazani rezultati simulacije magnetskog polja unutar samog stroja. Slika 5.12 prikazuje elektromagnetski model generatora u praznom hodu s lijeve strane, a na desnoj strani je stroj pod opterećenjem.

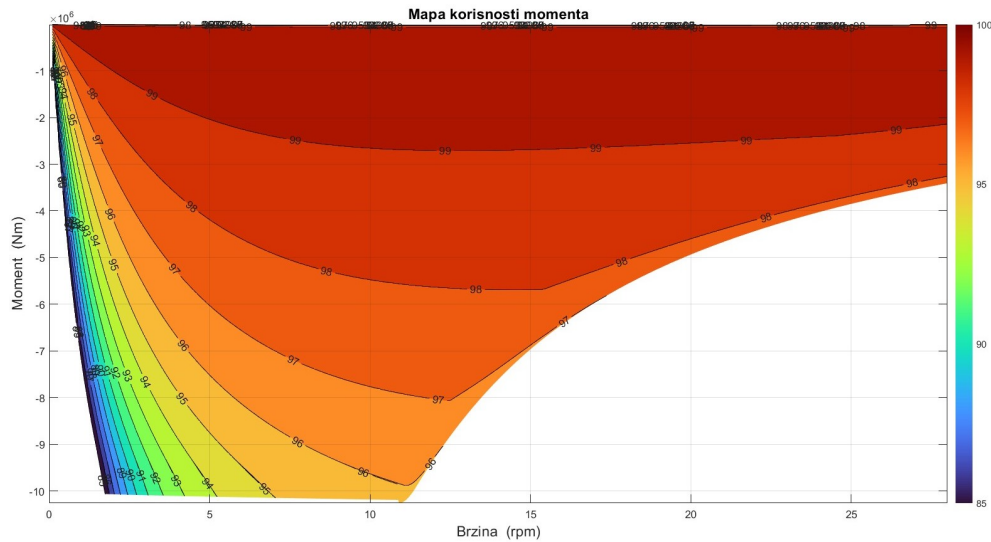


**Slika 5.12:** Magnetsko polje u praznom hodu i pod opterećenjem

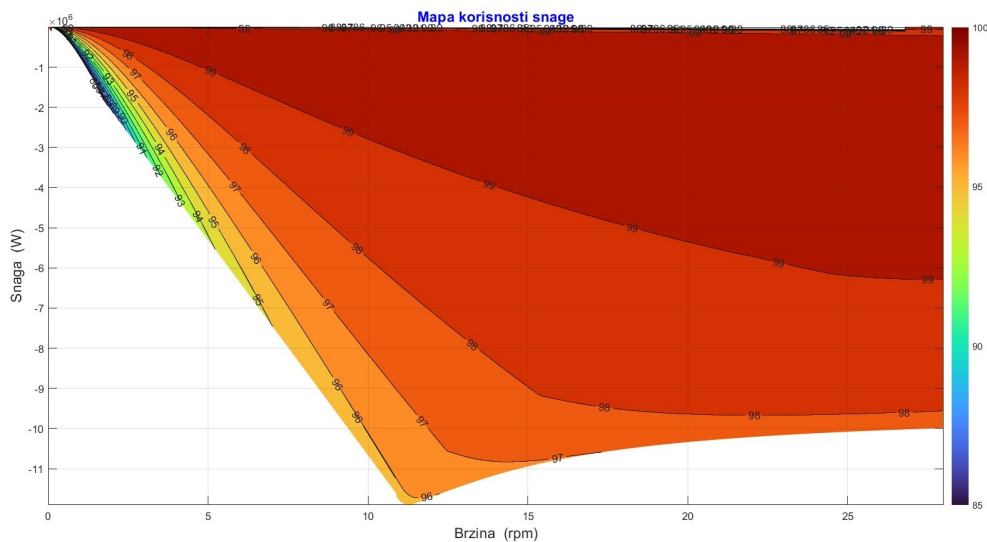
Na slikama u nastavku su mape korisnosti (eng. *Efficiency map*) koje predstavljaju dvodimenzionalni prikaz 3D grafa, gdje su moment i snaga generatora prikazani u ovisnosti o brzini na x-osi i korisnosti na z-osi, što daje slike toga kako bi se moglo očekivati da izgleda realni rad samog stroja. Program Motor-CAD generira mape korisnosti na osnovu dizajniranog modela, ali u slučaju supravodljivog generatora bilo je potrebno preračunati parametre, jer se izračunu korisnosti uzimaju u obzir svi gubitci unutar stroja. S obzirom da supravodiči ne stvaraju gubitke, u programu MATLAB su se posebno oduzeli gubitci u željezu statora i napravio novi izračun i mapa korisnosti.

Slika 5.13 prikazuje mapu korisnosti momenta na osovini. Najveće vrijednosti ima u području do 3 MNm s korisnosti od preko 99%. Na najvećem momentu na brzini od  $11 \text{ min}^{-1}$  korisnost je preko 95%.





Slika 5.13: Mapa korisnosti momenta na osovini



Slika 5.14: Mapa korisnosti izlazne snage

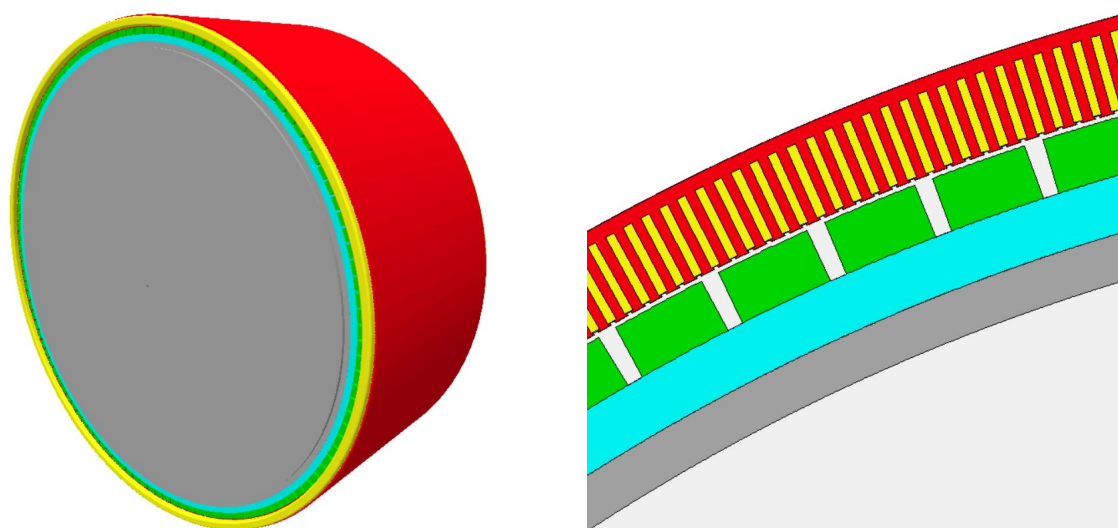
Mapa korisnosti izlazne snage je prikazana na slici 5.14 i na 10 MW korisnost je preko 95%, što znači da će generator bez velikih gubitaka raditi na brzini od  $11 \text{ min}^{-1}$ , što je bio cilj ove simulacije. Ukupni faktor izobličenja THD (eng. *Total Harmonic Distorsion*) za inducirani napon u praznom hodu stroja je 0,346%, što je izrazito mala vrijednost daleko ispod gornje granične vrijednosti od 5%.

## 5.2. Generator s permanentnim magnetima

Sinkroni generator s permanentnim magnetima (SGPM) je tip generatora koji na rotoru ima permanentne magnete umjesto uzbuđnog namota. Rad SGPM-a ne ovisi o konstantnoj uzbuđi,

za razliku od konvencionalnog sinkronog generatora, te se iz tog razloga često koristi u izgradnji vjetroturbina. Neovisnost se temelji na permanentnim magnetima koje je potrebno magnetizirati samo jednom. Dodatno imaju veću korisnost te su lakši za održavanje od drukčijih generatora, a za priključivanje na mrežu potreban je frekvencijski pretvarač.

Na sljedećim slikama je prikazan simulirani generator s permanentnim magnetima i njegovi parametri u programu Ansys Motor-CAD.



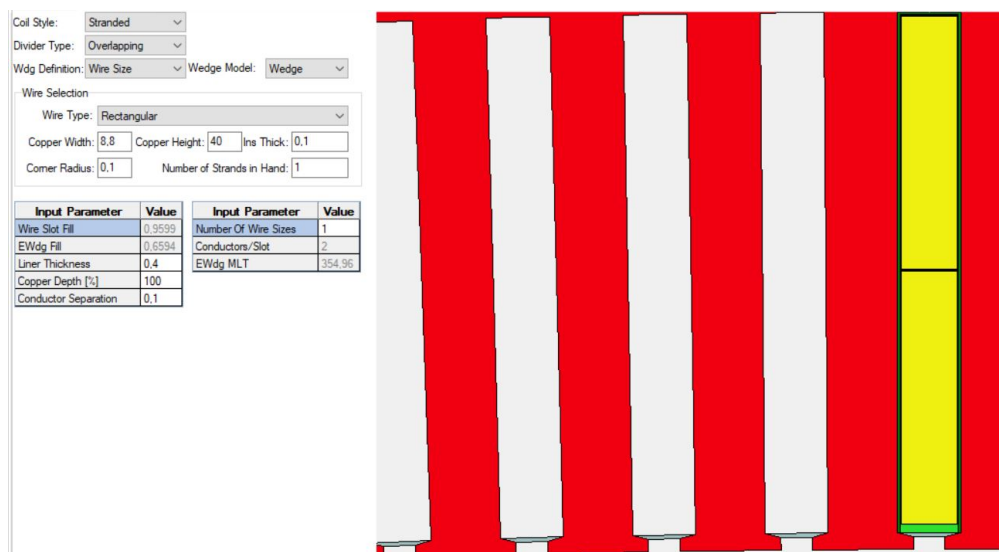
**Slika 5.15:** SGPM u programu Ansys Motor-CAD

Na lijevoj strani slike 5.15 je prikazan 3D model sinkronog generatora s permanentnim magnetima, a na desnoj strani je uvećana shema poprečnog presjeka, gdje su magneti označeni zelenom bojom. Stator je prikazan crvenom bojom, a utori žutom, dok je ostatak rotor sa sivo obojenom osovinom. U nastavku na slici 5.16 su ispisani zadani parametri trofaznog generatora, koji ima 720 utora i 120 polova s obzirom na veliku potrebnu snagu, kao i dijametar statora od 5 metara, a duljinu motora od 2 metra. Magneti su postavljeni na površinu rotora cijelom dužinom samog generatora.

Slot Type: Parallel Slot	Rotor Type: Surface Parallel	Radial Dimensions	Value	Axial Dimensions	Value
Stator Ducts: None	Rotor Ducts: None	Stator Lam Dia	5000	Motor Length	2000
Stator Parameters	Value	Stator Bore	4800	Stator Lam Length	2000
Slot Number	720	Airgap	5	Magnet Length	2000
Stator Lam Dia	5000	Banding Thickness	0	Magnet Segments	1
Stator Bore	4800	Sleeve Thickness	0	Rotor Lam Length	2000
Slot Width	10	Magnet Thickness	60	EWdg OH Mult [F]	1
Slot Depth	85	Shaft Dia	4550	EWdg OH Mult [R]	1
Tooth Tip Depth	2	Shaft Dia [F]	25	Wdg Extension [F]	5
Slot Opening	5	Shaft Dia [R]	25	Wdg Extension [R]	5
Tooth Tip Angle	15	Shaft Hole Diameter	4450	Shaft Extension [F]	30
Sleeve Thickness	0			Shaft Extension [R]	0

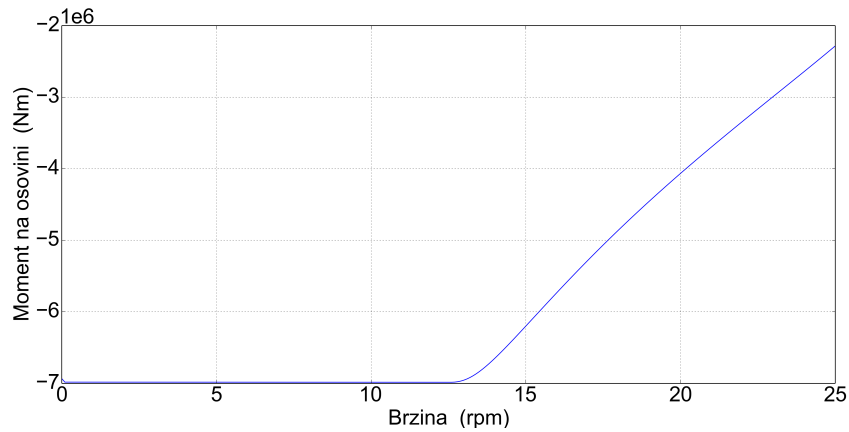
Slika 5.16: Zadani parametri SGPM

Raspodjela vodiča u utorima generatora je prikazana na slici 5.17. Odabran je tip vodiča s poprečnim presjekom u obliku pravokutnika, kako bi se što više ispunili utori, što se vidi na parametru Wire Slot Fill koji ima vrijednost 95,99%. Broj zavoja  $w_s$  je 1, korak svitka  $y$  je 5, broj paralelnih grana  $a$  je 1.

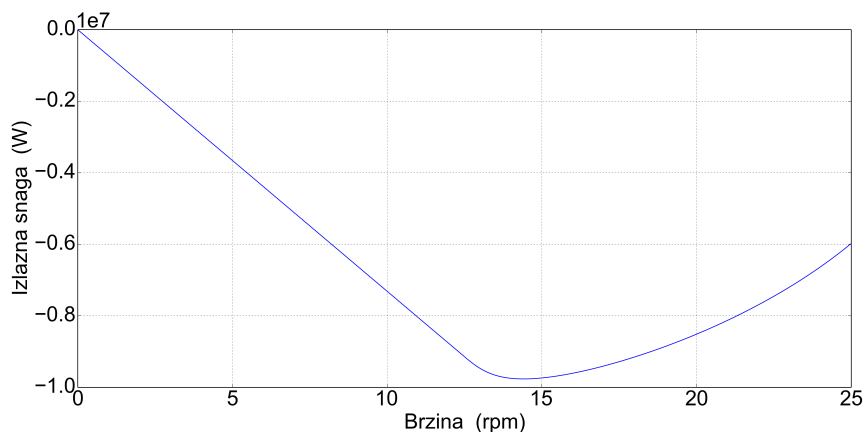


Slika 5.17: Prikaz vodiča u utorima

Simuliranjem generatora sa svim navedenim parametrima dobijaju se odzivi prikazani na slikama u nastavku.



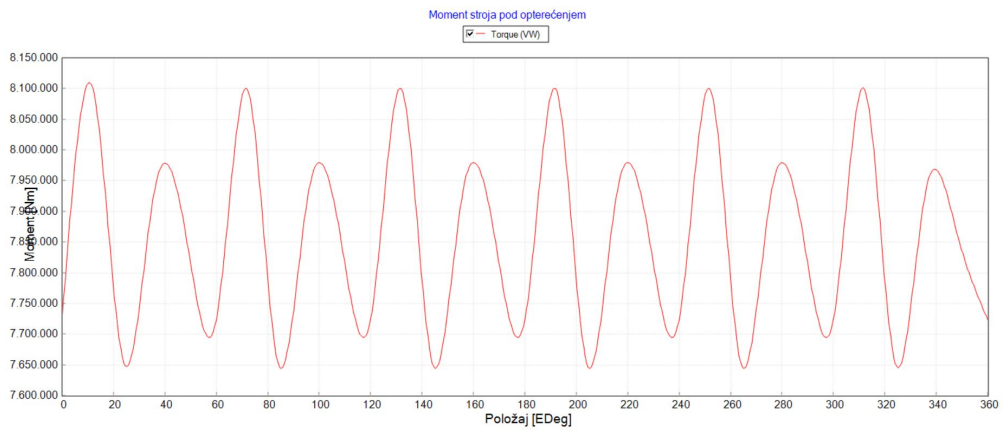
**Slika 5.18:** Momentna karakteristika SGPM



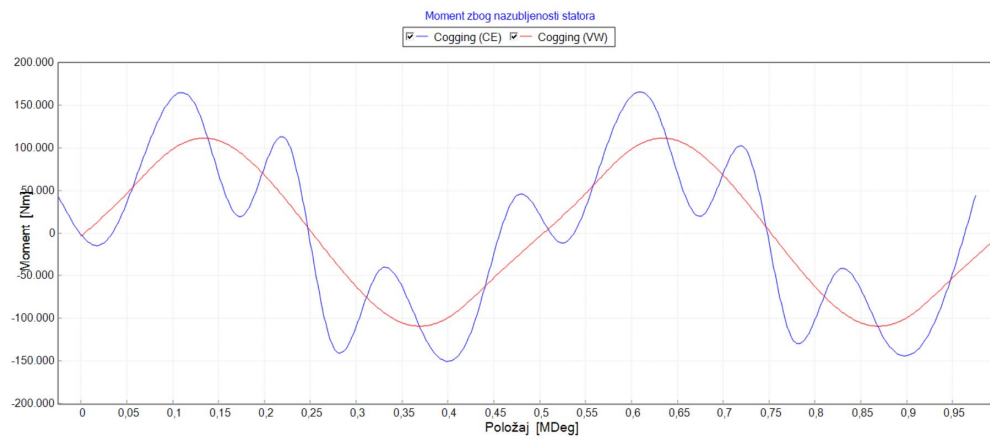
**Slika 5.19:** Izlazna snaga SGPM u ovisnosti o brzini

Grafovi na slikama 5.18 i 5.19 su dvodimenzionalni prikazi karakteristika momenta i snage generatora, gdje su točke maksimuma otprilike na brzini od  $12 \text{ min}^{-1}$ , što je bio jedan od zahtjeva samog dizajna. Drugi bitan parametar je snaga, koja dolazi do planiranih 10 MW na zadanoj brzini.

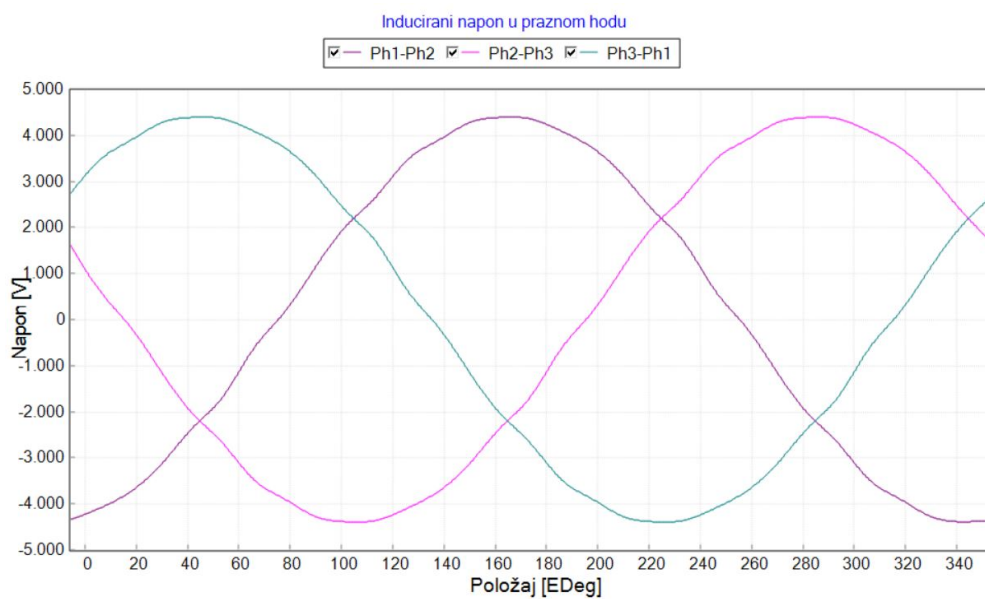
U nastavku je prikazan valni oblik momenta stroja pod opterećenjem gdje se mogu primijetiti oscilacije, za razliku od obične momentne karakteristike sa slike 5.18, s tim da je srednja vrijednost uvijek ista. Moment stroja zbog nazubljenosti statora je prikazan na slici 5.21.



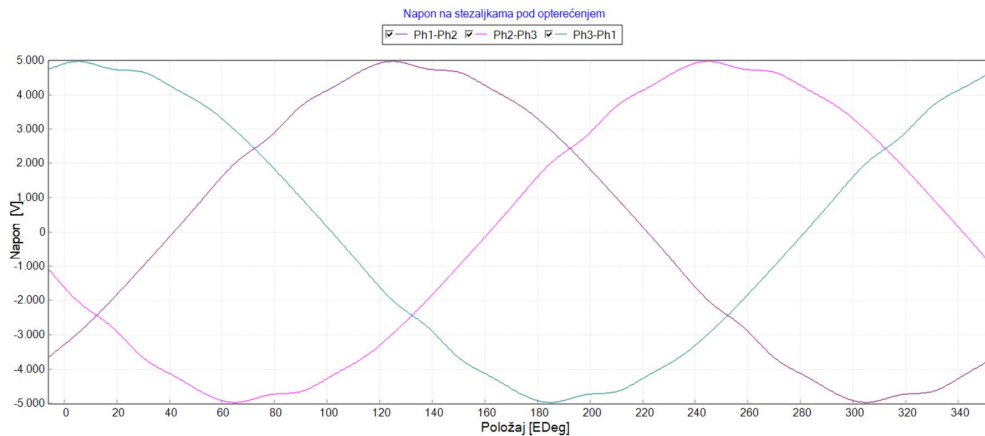
Slika 5.20: Valni oblik momenta stroja pod opterećenjem



Slika 5.21: Moment zbog nazubljenosti statora

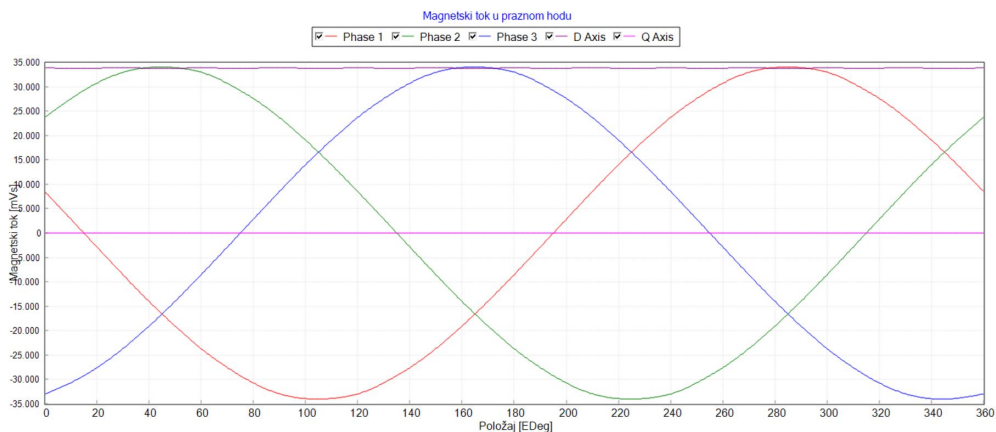


Slika 5.22: Inducirani napon u praznom hodu



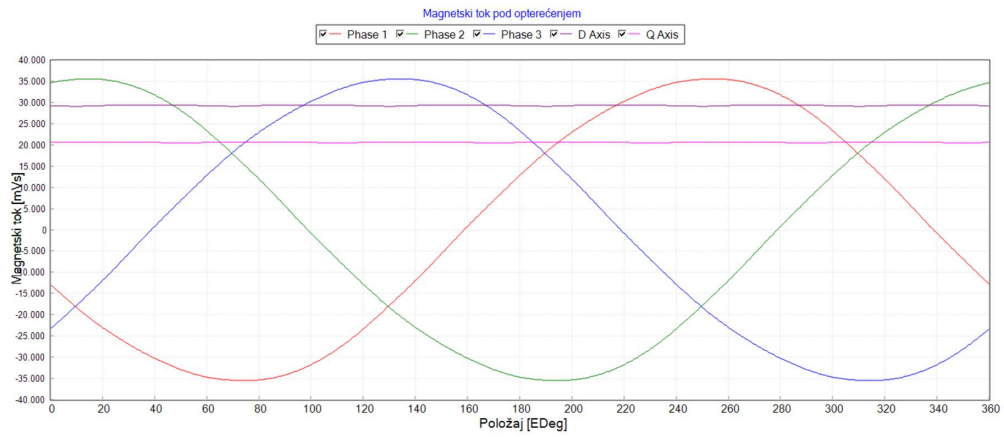
**Slika 5.23:** Napon na stezaljkama stroja pod opterećenjem

Inducirani napon generatora u praznom hodu je prikazan na slici 5.22 i ima sinusni oblik u svim fazama, uz manje oscilacije. Napon na stezaljkama stroja pod opterećenjem na grafu 5.23 ima čiste sinusne funkcije kod sve tri faze. Grafovi u nastavku prikazuju magnetski tok u stroju kad se nalazi u praznom hodu na slici 5.24 i pod opterećenjem na slici 5.25. Maksimalne vrijednosti funkcija po fazama nemaju značajne razlike između dva navedena slučaja, osim što su faze pomaknute. U dq-sustavu se može uočiti razlika u vrijednosti magnetskog toka u q-osi, koji je nula kad je stroj u praznom hodu, a 20 Vs pod opterećenjem. Magnetski tok u d-osi djelomično se smanji kad je stroj pod opterećenjem, pod utjecajem povećanja toka u q-osi.



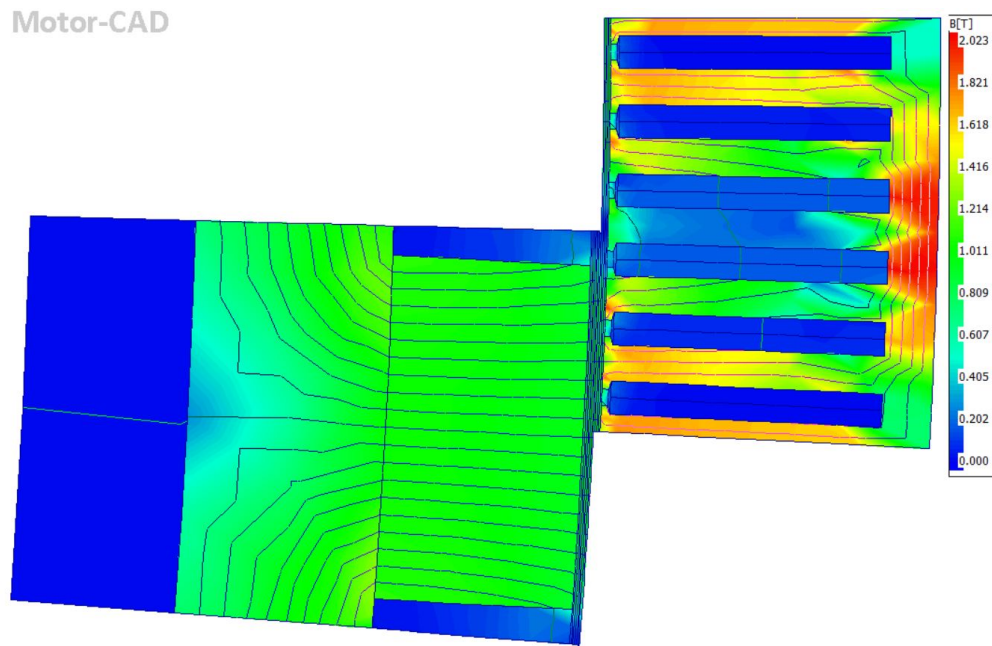
**Slika 5.24:** Magnetski tok u generatoru u praznom hodu



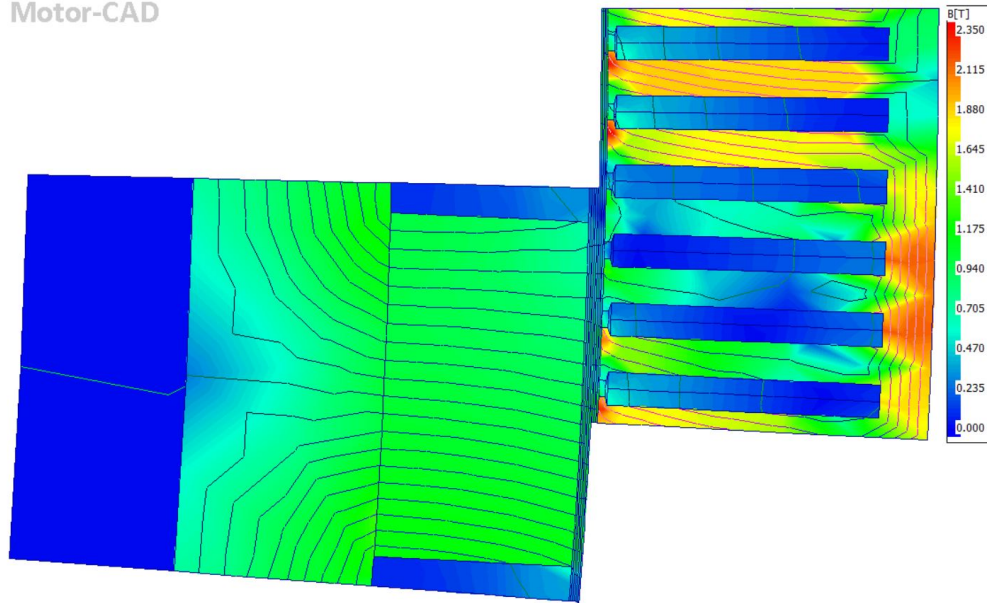


**Slika 5.25:** Magnetski tok u generatoru pod opterećenjem

Slike u nastavku prikazuju simulaciju magnetskog polja unutar stroja. Slika 5.26 prikazuje elektromagnetski model generatora u praznom hodu, a na slici 5.27 je pod opterećenjem.

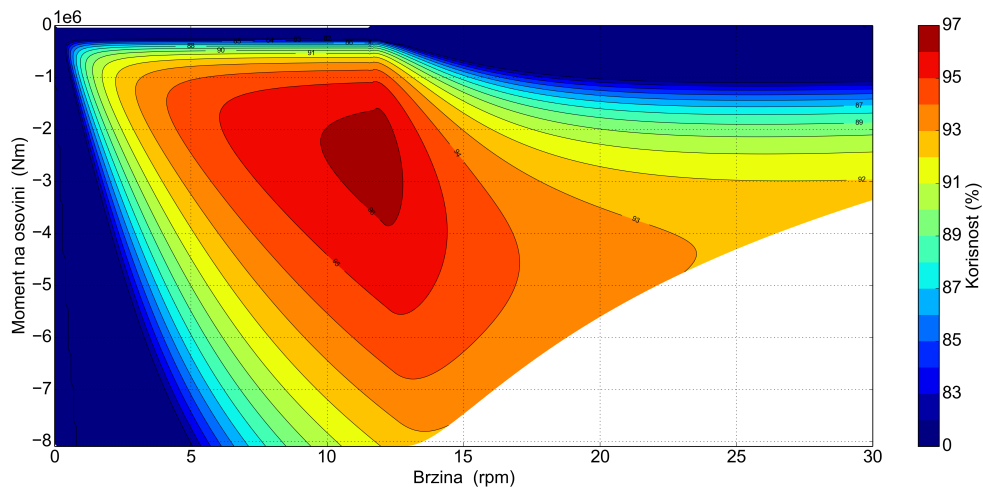


**Slika 5.26:** Magnetsko polje u generatoru u praznom hodu



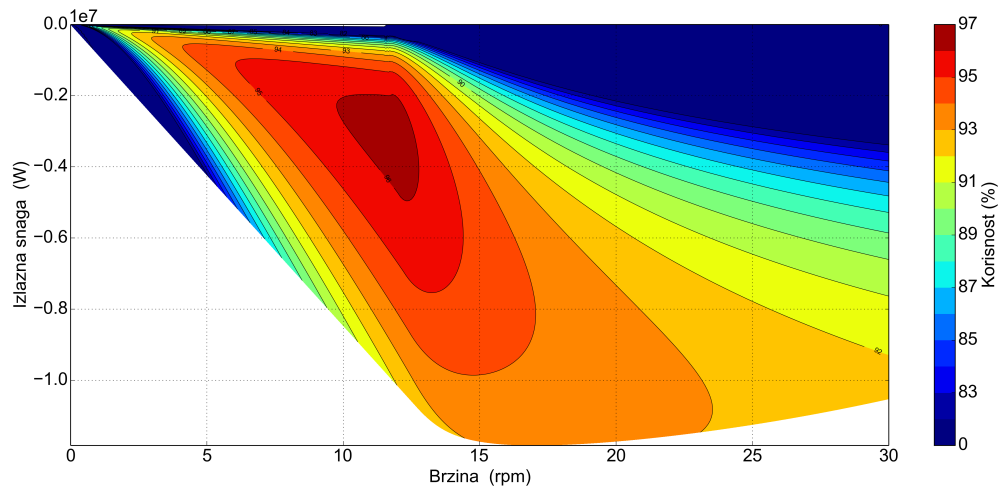
**Slika 5.27:** Magnetsko polje u generatoru pod opterećenjem

Mapa korisnosti momenta na osovini na slici 5.28 ima najveće vrijednosti u području od 2 do 3 MNm s korisnosti oko 96%. Na najvećem momentu na brzini od  $12 \text{ min}^{-1}$  korisnost je oko 94%, što znači da će na zadanoj brzini i s maksimalnim momentom generator moći raditi bez značajnih gubitaka.



**Slika 5.28:** Mapa korisnosti momenta na osovini





**Slika 5.29:** Mapa korisnosti izlazne snage

Korisnosti izlazne snage na slici 5.29 su najveće na području od 2 do 5 MW s 96%. Na traženih 10 MW korisnost je 94% pa vrijedi isti zaključak kao i za moment na osovini, generator će bez velikih gubitaka raditi na unaprijed određenoj brzini od  $12 \text{ min}^{-1}$ , što je bio cilj ove simulacije. Ukupni faktor izobličenja THD za inducirani napon u praznom hodu stroja je 1,442%, što je ispod gornje granične vrijednosti od 5%.

### 5.3. Analiza rezultata simulacija

Nakon izrade dizajna supravodljivog generatora i sinkronog generatora s permanentnim magnetima te njihovih simulacija, najznačajnija razlika u njihovom radu se može uočiti na mapama korisnosti. Uz mape korisnosti, usporedbom ostalih grafova primijete se generalno bolja svojstva supravodljivog generatora na gotovo svim područjima. Jedini značajan nedostatak supravodljivog generatora u ovom dizajnu je iznos RMS struje, koja dolazi do 9002 A. To je izrazito visoka vrijednost struje za koju bi bilo potrebno posebno projektiranje frekvencijskih pretvarača koji spajaju generator na elektroenergetsku mrežu.

Usporedbom mapa korisnosti momenta na osovini dva generatora na slikama 5.13 i 5.28, lako se može uočiti razlika u maksimalnoj korisnosti, koja kod supravodljivog generatora ide do preko 99%, a kod SGPM do 97%. Maksimalne vrijednosti korisnosti su na značajno većem intervalu kod generatora sa supravodičima, gdje stroj može raditi na 50% maksimalne snage na različitim brzinama s 99% korisnosti, što je uočljivo na slici 5.14.

Druga značajna razlika je u veličini i težini dva generatora. U odnosu na supravodljivi generator na slici 5.1 3D model SGPM se čini manji, ali ako se usporede parametri na slikama 5.2 i 5.16 može se uočiti da supravodljivi generator s 2,5m ima duplo manji promjer statora, za razliku od SGPM s promjerom od 5m. Težina supravodljivog generatora je 15,08 tona, što je skoro četvrtina težine SGPM-a koji teži 58,98 tona.

Na osnovu izlaznih vrijednosti simulacija dodatno je izračunato tangencijalno elektromagnetsko naprezanje  $\sigma_{\text{elm,t}}$ , dobijeno na osnovu izračuna strujnog obloga stroja. Drugi parametar je Essonova konstanta  $C$ , koja predstavlja iskorištenje materijala u stroju. Izrazi za izračun su:

$$\sigma_{\text{elm,t}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot A_{\text{s,ef}} \cdot B_{\delta} \cdot \cos\varphi$$

$$C = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} \cdot B_{\delta} \cdot A_{\text{s,ef}} \cdot f_n$$

U nastavku je prikazana tablica parametara supravodljivog generatora i SGPM-a radi lakše usporedbe. Tangencijalno elektromagnetsko naprezanje za SGPM je na donjoj granici intervala vrijednosti za taj tip stroja, dok je kod supravodljivog generatora više nego pet puta veće. Essonova konstanta je više od deset puta veća kod supravodljivog generatora, dok je za SGPM u intervalu standardnih vrijednosti.

**Tablica 5.2:** Popis parametara generatora

Parametar	Supravodljivi	SGPM
Promjer statora D [mm]	2500	5000
Duljina rotora [mm]	2000	2000
Broj utora	144	720
Broj polova p	120	120
$I_{RMS,n}$ [A]	9002	2987
$J_{RMS}$	2000	6
$M_{osovini,max}$ [MNm]	10,29	8,09
Max korisnost [%]	99	97
Težina [kg]	15083	58978
$\sigma_{elm,t}$ [kPa]	1156,2	209,205
C [ $V \text{ Amin}/m^2$ ]	366038	32107,3
THD induc.napona [%]	0,346	1,442

## 6. Zaključak

Ovaj diplomski rad bavi se pregledom tehnologije supravodljivosti i njenom primjenom u konstrukciji generatora za vjetroagregate. Proveden je dizajn supravodljivog generatora i sinkronog generatora s permanentnim magnetima u programu Ansys Motor-CAD, kao i analiza rezultata te usporedba svojstava strojeva.

Provedena analiza rezultata simulacija pokazuje kako upotreba supravodljivih materijala u dizajnu generatora za vjetroturbine može značajno smanjiti masu stroja i poboljšati njegovu učinkovitost. Maksimalna korisnost supravodljivog generatora je prelazila 99% u usporedbi s 97% kod SGPM-a, gdje pritom SGPM ima duplo veći promjer statora. Masa supravodljivog generatora gotovo je četiri puta manja od mase SGPM, što je jedna od najznačajnijih prednosti kod instalacije u vjetroagregatima. Pored ovih, u radu su navedeni i drugi parametri iz kojih je očigledno da tehničke odlike supravodljivih generatora daleko premašuju sinkrone generatore s permanentnim magnetima.

Rezultati i analiza simulacija provedenih u ovom radu ukazuju na potencijal supravodljive tehnologije da u budućnosti bude ključni faktor u dizajnu vjetroturbina te općenito drugih električnih strojeva gdje postoje zahtjevi za visokom gustoćom snage i momenta ili visokom učinkovitosti. Implementacijom supravodiča omogućila bi se izgradnja učinkovitijih jedinica vjetroelektrana koje će doprinijeti većem globalnom udjelu energije vjetra.

# LITERATURA

- [1] How maglev works. <https://www.energy.gov/articles/how-maglev-works>. Accessed: 26.6.2024.
- [2] Offshore wind: Clean power harvested at sea. <https://www.en-former.com/en/offshore-wind-clean-power-harvested-at-sea/>. Accessed: 26.6.2024.
- [3] Md. Abdullah Al Zaman. Study of smes device and smes-pcc computer program development for the analysis of superconducting coil design. 2019. doi: 10.13140/RG.2.2.32352.53760.
- [4] Katsutoshi Mizuno, Masafumi Ogata, i Ken Nagashima. 5 tesla class rebco (rare earth-ba-cu-o) superconducting magnet with a simplified cooling system. stranice 112–117, 2014. doi: [\url{https://doi.org/10.2219/rtrigr.55.112}](https://doi.org/10.2219/rtrigr.55.112).
- [5] Hiroyuki Ohsaki, Yutaka Terao, Rashidul M. Quddes, i Masaki Sekino. Electromagnetic characteristics of 10 mw class superconducting wind turbine generators. U *2010 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2010.
- [6] Anup Patel. Pulsed field magnetization of composite superconducting bulks for magnetic bearing applications. 2013. doi: 10.13140/RG.2.1.2433.6883.
- [7] Shunji Yamamoto, Katsumi Konii, Hajime Tanabe, Shoichi Yokoyama, Tetsuya Matsuda, i Tadatoshi Yamada. Super-stable superconducting mri magnet operating for 25 years. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2014. URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:39069326>.
- [8] Chao Yao i Yanwei Ma. Superconducting materials: Challenges and opportunities for large-scale applications. *iScience*, 24(6), 2021. ISSN 2589-0042.

## Supravodljivi sinkroni generatori

### Sažetak

Tehnološki napredak i sve veća potražnja za električnom energijom doveli su do razvoja učinkovitijih načina iskorištavanja obnovljivih izvora; jedan od takvih je energija vjetra. U ovom radu prikazan je pregled supravodljive tehnologije te istraživanje primjena supravodiča u konstrukciji generatora od 10 MW za vjetroturbinu. U programu Ansys Motor-CAD napravljen je dizajn supravodljivog generatora, kao i sinkronog generatora s permanentnim magnetima (SGPM) te su analizirana i uspoređena svojstva strojeva. Rezultati simulacija pokazuju da supravodljivi generator ima gotovo četiri puta manju masu i duplo manji promjer stroja u odnosu na SGPM, a pritom zadržava korisnost od preko 99%. Ovi rezultati upućuju na to da bi supravodljiva tehnologija mogla postati standardom za konstrukciju električnih strojeva koji zahtijevaju veliku snagu uz visoku korisnost i male dimenzije.

**Ključne riječi:** supravodljivost, supravodiči, vjetroelektrane, dizajn generatora, supravodljivi generator, sinkroni generator s permanentnim magnetima

## Superconducting synchronous generators

### Abstract

Technological advancements and the increasing demand for electricity have led to the development of more efficient methods of use of renewable sources like wind energy, thus driving the need for advancements in construction of wind power plants. This paper presents an overview of the superconducting technology and investigates the application of superconductors in the design of a 10 MW wind turbine generator. A design of a superconducting as well as a synchronous generator with permanent magnets (SGPM) was created using Ansys Motor-CAD software and the properties of the machines were analyzed and compared. Simulation results show that the superconducting generator has one fourth of the mass and half the machine diameter compared to the SGPM, while maintaining an efficiency of over 99%. These results suggest that superconducting technology could become the standard for the construction of electric machines that require high power, high efficiency, and small dimensions.

**Keywords:** superconductivity, superconductors, wind turbines, generator design, superconducting generator, synchronous generator with permanent magnets