

Damir Žarko, Stjepan Stipetić, Damir Sumina, Tin Bariša
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
Zavod za elektrostrojstvo i automatizaciju
damir.zarko@fer.hr, stjepan.stipetic@fer.hr, damir.sumina@fer.hr, tin.bariša@fer.hr

GENERATORI SA STALNIM MAGNETIMA ZA VJETROELEKTRANE

SAŽETAK

U radu su prikazana najnovija dostignuća u projektiranju, konstrukciji i upravljanju sinkronim generatorima sa stalnim magnetima za vjetroeletktrane. Analizirane su standardne izvedbe generatora s obzirom na brzinu vrtnje te su navedeni primjeri najvećih generatora u komercijalnoj primjeni. Također su prikazane nove ideje i tehnologije koje uključuju supravodljive generatore, generatore s magnetskim prijenosnicima i generatore s aksijalnim tokom i zračnom jezgrom. Opisane su metode upravljanja generatorima sa stalnim magnetima pri čemu je naglašeno vektorsko upravljanje sa i bez mjernog člana položaja rotora te napredne metode kao što je modelsko prediktivno upravljanje.

Ključne riječi: generator sa stalnim magnetima, vjetroatregat, vjetroeletktrana, izravni pogon

PERMANENT MAGNET GENERATORS FOR WIND POWER PLANTS

SUMMARY

The paper presents the latest achievements in design, construction and control of synchronous generators with permanent magnets for wind power plants. Standard generator designs have been analysed with respect to the speed of rotation and examples of the largest generators in commercial applications have been listed. New ideas and technologies that include superconducting generators, generators with embedded magnetic gear and ironless axial flux generators are also presented. The methods for control of permanent magnet generators are described, with emphasis on vector control with or without rotor position sensor, and advanced methods such as model predictive control.

Key words: permanent magnet generator, wind turbine, wind farm, direct-drive

1. UVOD

U suvremenim vjetroatregatima primjenjuje se nekoliko tehnologija generatora: asinkroni kavezni generator, dvostrano napajani asinkroni generator, sinkroni generator s klasičnom uzбудom te sinkroni sa stalnim magnetima za velike, srednje i male brzine. Odabir određene vrste generatora ovisi o iskustvu i tradiciji proizvođača, instaliranoj snazi i brzini vrtnje (izravni pogon ili s multiplikatorom).

Budući razvoj i primjena generatora sa stalnim magnetima su neizvjesni zbog promjenjive cijene minerala na bazi rijetkih zemalja (prvenstveno neodimij i disprozij). Navedeni minerali se većinom vade iz zemlje i prerađuju u Kini koja je odlučila kontrolirati proces njihove eksploatacije uzimajući u obzir potrebe na svjetskom tržištu i procjenu svojih preostalih zaliha. Tako utječe na njihovu cijenu koja je značajno narasla u zadnjih 6-8 godina. Cijena stalnih magneta u budućnosti će ovisiti o razvoju rudnika u drugim dijelovima svijeta čime bi se mogao ublažiti kineski monopol.

Ovisno o tehnologiji generatora razlikuju se topologije pretvarača i strukture upravljanja za pojedine tipove generatora. Zbog povećanja pouzdanosti i raspoloživosti vjetroatregata razvijaju se strukture

upravljanja bez mjernog člana položaja rotora, odnosno brzine vrtnje. U odnosu na klasične strukture upravljanja najčešći je zahtjev leteći start generatora, odnosno uključenje pretvarača na generator u vrtnji, što bez mjernog člana brzine vrtnje predstavlja tehnički izazov.

U ovom radu prikazana su najnovija dostignuća u projektiranju, konstrukciji i upravljanju sinkronim generatorima sa stalnim magnetima. Razmatraju se novi koncepti kao što su generatori bazirani na supravodičima, generatori sa zračnom jezgrom i pseudoizravni pogon s magnetskim prijenosnikom.

2. POSTOJEĆE TEHNOLOGIJE I KONCEPTI

Sinkroni generatori sa stalnim magnetima (SGSM) i generatori s klasičnom uzbuđom (SG) su najčešći izbor u vjetroagregatima (VA) s izravnim pogonom bez multiplikatora (DD – eng. *direct drive*) pri brzinama vrtnje $10 - 20 \text{ min}^{-1}$. Prednost izravnog pogona je veća pouzdanost i manja cijena održavanja zbog izostanka multiplikatora, no nedostatak su povećana masa i dimenzije generatora. Generatori sa stalnim magnetima tu imaju prednost zbog svoje inherentno velike gustoće momenta po jediničnom volumenu. Klasični koncept SGSM-a baziran je na magnetima smještenima na površini rotora i statorskom namotu s distribuiranim ili koncentriranim svicima. Asinkroni generatori su neprikladni za izravni pogon jer se s povećanjem broja polova smanjuje glavni induktivitet asinkronog stroja i povećava udio rasipnih induktiviteta. Rezultat toga je smanjen faktor snage i smanjena izlazna snaga u ovisnosti o klizanju, te povećani troškovi za ugradnju kondenzatora i učinskog pretvarača za kompenzaciju jalove energije.

Osim izravnog pogona, generatori sa stalnim magnetima koriste se i u agregatima s multiplikatorima za srednju brzinu (MSG – eng. *medium speed geared*) pri brzinama vrtnje $100 - 500 \text{ min}^{-1}$. Multiplikatori za veliku brzinu vrtnje (HSG – eng. *high speed geared*) se najčešće koriste za oba tipa asinkronih generatora i za SGSM pri brzinama vrtnje $1000 - 2000 \text{ min}^{-1}$ [1]. Usporedba korisnosti tipičnih vrsta pogonskih sustava za vjetroagregate pri različitim brzinama vjetra prikazana je na slici 1. Može se primijetiti da pri većim brzinama vjetra prednjači MSG SGSM, a u širem rasponu brzina zavidno veću korisnost ima DD SGSM.

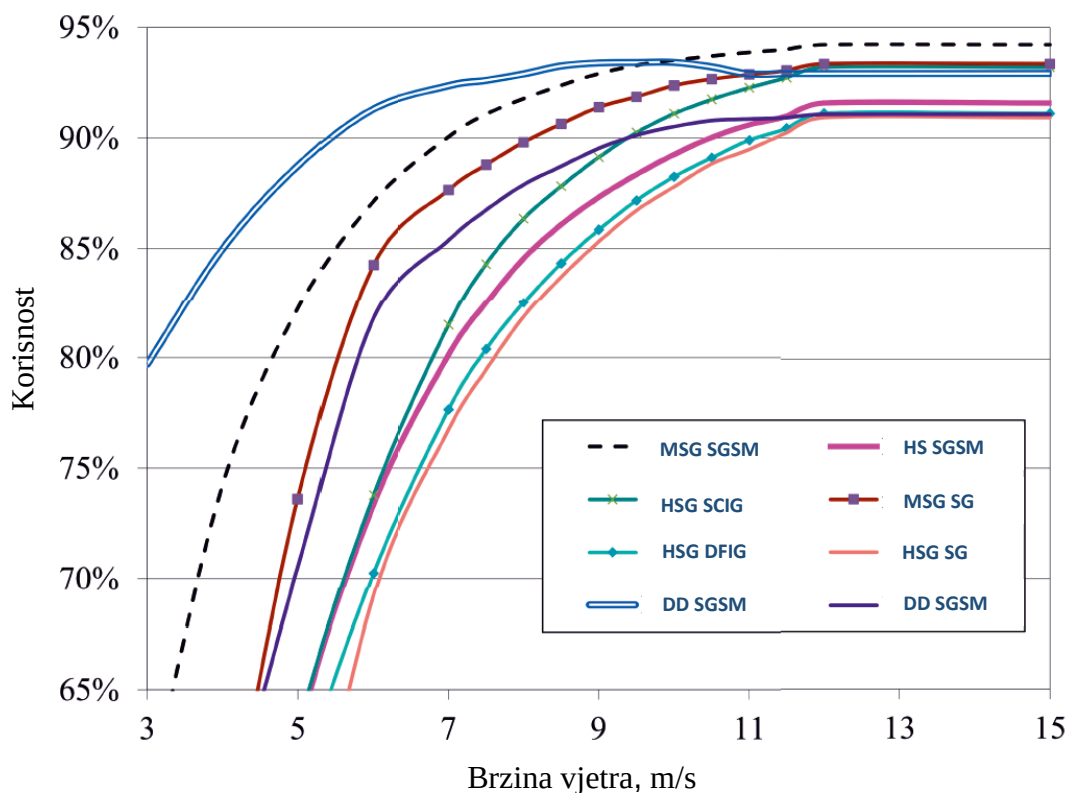
Tipične konfiguracije vjetroagregata i glavni tržišni predstavnici tih konfiguracija prikazani su na slici 2. Detaljnije su na slikama 3., 4. i 5. prikazane konfiguracije koje se odnose na sinkrone generatore sa stalnim magnetima: DD, MSG i HSG. U sve tri primjene potreban je mrežni učinski pretvarač koji odgovara punoj snazi generatora, što recimo nije slučaj kod HSG DFIG konfiguracije [2] - [4].

Dizajn SGSM-a velikih snaga za HSG pogon nije uznapredovao u jednakom smislu kao za klasične sinkrone generatore ili asinkrone generatore, stoga postoje mnogi izazovi koje uspješno rješavaju inovativne tvrtke kao što je primjerice The Switch [5]. Neki od projektnih izazova su učvršćenje magneta, koje se rješava ugradnjom u rotor neposredno blizu zračnog raspora (eng. *embedded magnets*) ili problem demagnetizacije uslijed kratkog spoja u toplom stanju koji se rješava pažljivim projektiranjem rasipne reaktancije statora i odabirom magneta [6].

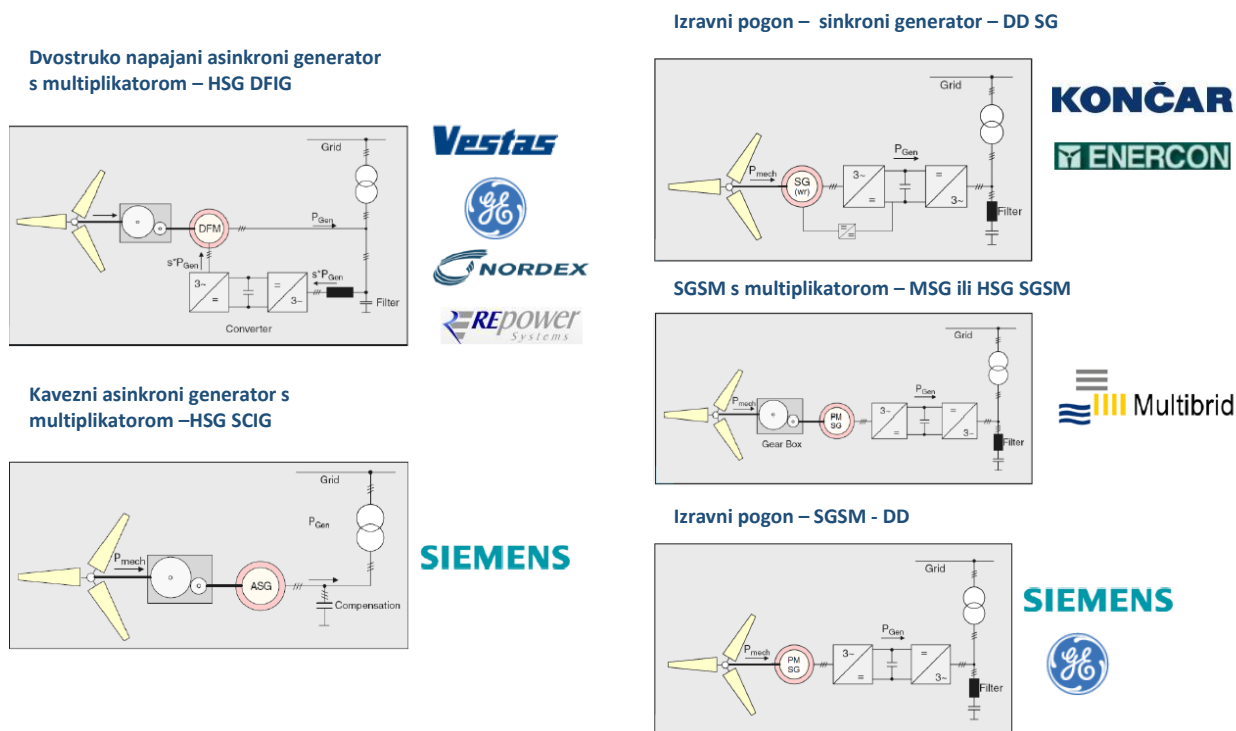
Dizajn SGSM-a za MSG pogon prirodno teži k većem broju polova i moguće je dobiti kompaktna i robusna rješenja. Rizik od demagnetizacije je u ovom slučaju manji, čak i ako se koriste površinski magneti (eng. *surface magnets*). Moguće je ostvariti povoljan omjer gubitaka u bakru i željezu što omogućava optimiranje korisnosti za različite radne točke. Za ove raspone brzina vrtnje, SGSM je prirodno nadmoćan po pitanju iznosa korisnosti koje je moguće ostvariti [6].

Pri DD pogonu, rotor stroja rotira brzinama oko $12-15 \text{ min}^{-1}$ i pri tome nije više moguće ostvariti potreban balans između gubitaka u bakru i željezu. Kod takvih strojeva s velikim brojem polova jaram statora i jaram rotora su tanki zbog čega je udio mase željeza reduciran, a frekvencija magnetskog polja je niska pa gubici u bakru postaju dominantni. Takav odnos gubitaka je nepovoljan za postizanje visoke korisnosti blizu nazivnog opterećenja. Budući da su generatori za izravni pogon vrlo veliki i teški, projektni pristup u ovom slučaju se svodi na maksimiziranje tangencijalnog naprezanja u zračnom rasporu, tj. gustoće momenta, čime se povećavaju zahtjevi na rashladni sustav. Najveći Siemensovi DD agregati imaju rotor smješten s vanjske strane statora (eng. *outer rotor*) čime se ostvaruje izravno hlađenje jarma rotora i posredno magneta [6].

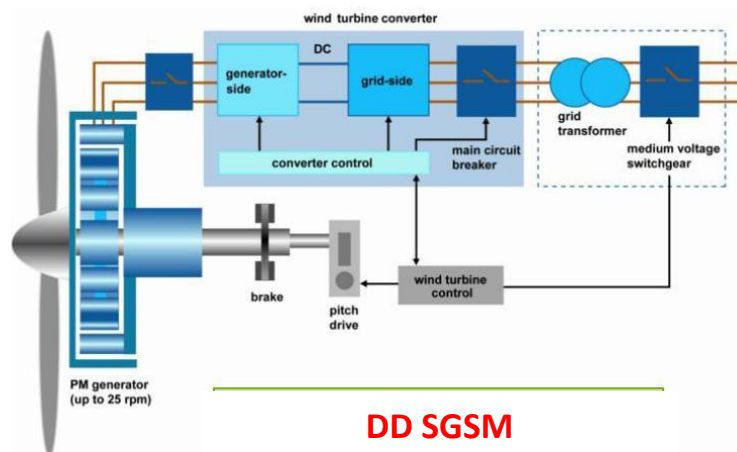
Pojedini proizvođači pristupaju proizvodnji strojeva sa segmentiranim statorom, gdje primjerice 12 različitih segmenata može biti pogonjeno zasebnim učinskim pretvaračima što daje određenu redundanciju i otpornost na kvarove (eng. *fault tolerance*).



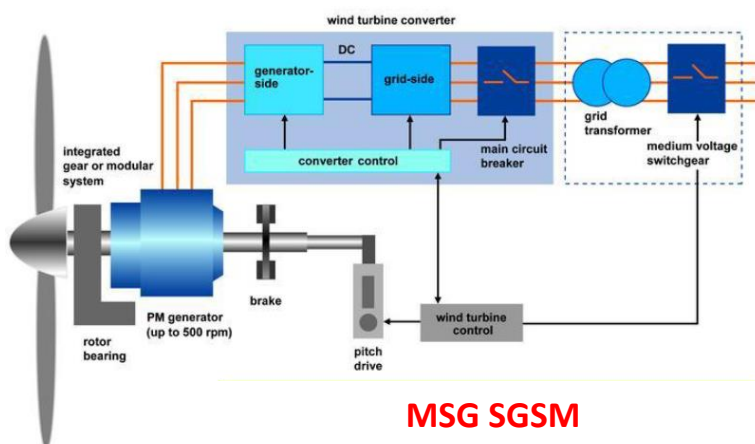
Slika 1. Usporedba korisnosti tipičnih vrsta pogonskih sustava za vjetroagregate pri različitim brzinama vjetra [7], [8]



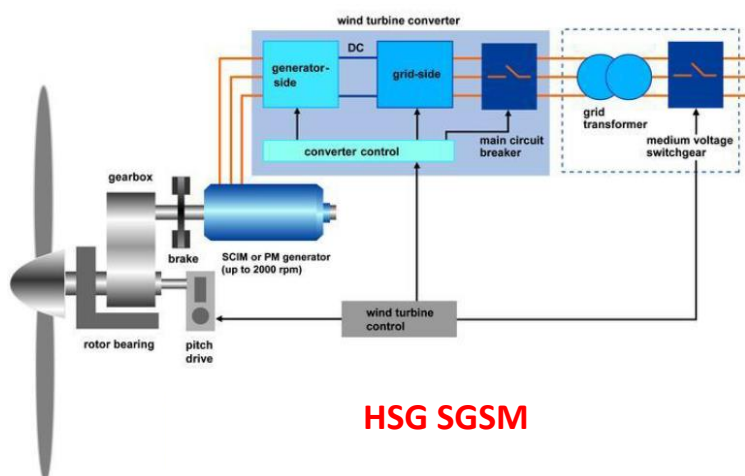
Slika 2. Usporedba tipičnih konfiguracija vjetroagregata i glavnih predstavnika tih tehnologija na tržištu [7]



Slika 3. Koncept vjetroagregata sa SGSM za male brzine – izravni pogon



Slika 4. Koncept vjetroagregata sa SGSM za srednje brzine



Slika 5. Koncept vjetroagregata sa SGSM za velike brzine

3. TRENUTNO STANJE NA TRŽIŠTU

U tablici 1. pobrojano je 12 najvećih vjetroagregata na svijetu prema trenutno raspoloživim podacima. Prva dva s liste nisu komercijalizirana, a oba imaju nazivne snage 10 MW, što je svojevrsna

granica koju mnogi proizvođači žele dostići i plasirati na tržište. Zbog svojih posebnosti i visoke cijene, komercijalna primjena obje navedene tehnologije je upitna. Vjetroagregat *AMSC SeaTitan* temeljen je na konceptu HTS sinkronog generatora, čiji je rotorski namot građen od visokotemperaturnih supravodiča. Nema podataka o tome da je taj vjetroagregat kompletno izgrađen već samo da je izgrađen i ispitan generator. Više o toj tehnologiji objašnjeno je u poglavlju 4.1. Vjetroagregat *Sway Turbine ST10* temeljen je na revolucionarnom konceptu sinkronog generatora s aksijalnim tokom bez statorske jezgre (eng. *ironless axial flux synchronous permanent generator*). Nema podataka o izgrađenom prototipu na punoj snazi od 10 MW već se radi o inženjerskom konceptu koji je rezultat višegodišnjeg razvoja i simulacija. Više o toj tehnologiji objašnjeno je u poglavlju 4.3.

Među 10 najvećih komercijalno dostupnih vjetroagregata, osam ih je namijenjeno za pučinsku (eng. *offshore*) upotrebu, što je samo po sebi razumljivo zbog toga što su na pučini dostupni vjetrovi veće snage, a jedan za priobalnu upotrebu. Jedini vjetroagregat namijenjen za upotrebu na kopnu (eng. *onshore*) je model E-126 snage 7.5 MW proizvođača Enercon. Među komercijaliziranim vjetroagregatima, to je jedini model koji je baziran na klasičnom sinkronom stroju s uzбудnim namotom. Od preostalih devet modela, dva se baziraju na dvostruko napajanom asinkronom generatoru, a sedam na sinkronom generatoru sa stalnim magnetima. U toj skupini su dva najveća vjetroagregata (Vestas V164 9 MW s promjerom lopatica 164 m i Adwen AD8-180s promjerom lopatica 180 m) opremljena generatorima srednjih brzina – MSG SGSM, dok je Siemensov SWT-8-154 opremljen izravnim pogonom – DD SGSM.

Tablica I. Popis najvećih svjetskih vjetroagregata po snazi

	Proizvođač / model	Snaga, MW	Promjer lopatica, m	Primjena	Pogonski sustav	Vrsta stroja	Brzina, min ⁻¹
1	AMSC SeaTitan 10 MW	10	190	pučinska	DD	HTS synchronous	10
2	Sway Turbine ST10	10	164	pučinska	DD	synchronous PM axial flux ironless stator	12
3	MHI Vestas V164 9 MW (7 MW – 8 MW) *	9	164	pučinska	MSG	SGSM	500
4	Adwen (Areva) AD 8-180	8	180	pučinska	MSG	SGSM	306
5	Siemens SWT-8.0-154 (6 MW – 7 MW) **	8	154	pučinska	DD	SGSM	11
6	Enercon E-126 7.5 MW	7.58	127	kopnena	DD	SG	12
7	Samsung S7.0-171	7	171	pučinska	MSG	SGSM	400
8	Senvion / Repower 6.2M152	6.15	152	pučinska	HSG	DFIG	1170
9	Sinovel SL6000	6	155	pučinska	HSG	DFIG	1200
10	GE Haliade 6MW	6	151	pučinska	DD	SGSM	11.5
11	Ming Yang SCD 6.5 MW (6.0MW)	6	140	pučinska	MSG	SGSM	316
12	Dongfang / Hyundai Heavy Industries 5.5 MW	5.5	140	priobalna	HSG	SGSM	1265

4. NOVE TEHNOLOGIJE

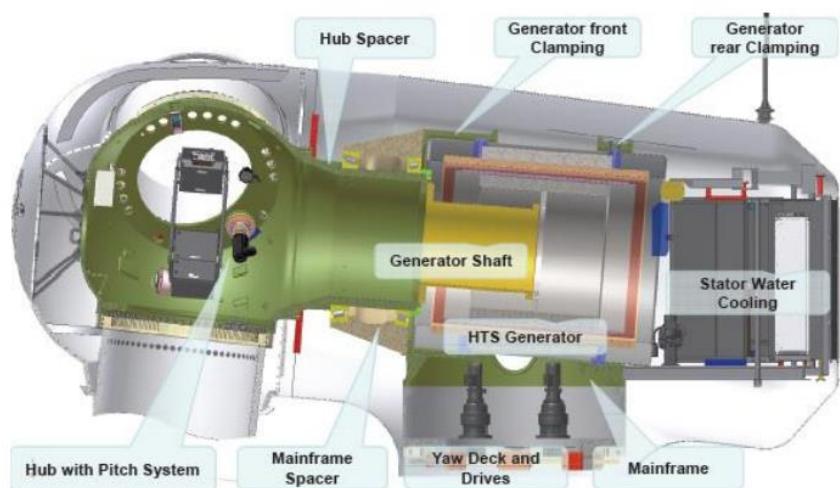
4.1. Supravodljivi generatori

Veliki, izravno pogonjeni vjetroagregati su najpovoljnija rješenja za pučinske vjetroelektrane s gledišta pouzdanosti sustava i cijene električne energije. Međutim, konvencionalne DD pogone vrlo je teško skalirati na razinu snage od 10 MW zbog iznimno velike mase. Topologija bazirana na supravodljivim generatorima omogućuje dostizanje te granične snage.

Supravodljivi generatori su ustvari klasični sinkroni generatori s uzбудnim namotom na rotoru koji je načinjen od supravodiča. Statorski namot smješten je u zračni raspored i građen je tipično od bakra. Danas postoje dvije glavne vrste supravodljivih generatora prema tipu supravodljive tehnologije koju koriste: LTS – eng. *low-temperature superconductors* i HTS – eng. *high-temperature superconductors*. Među njima

postoje velike razlike u svojstvima materijala, performansama, cijeni te u kriogeničkim uvjetima i rashladnim sustavima. U [9] su uspoređeni obujmi, mase i cijene supravodljivih generatora temeljenih na LTS i HTS supravodičima. S gledišta početnih ulaganja, zrelosti tehnologije i kompleksnosti izvedbe preporučuje se LTS tehnologija za širu primjenu.

Najveći vjetroagregat na svijetu je AMSC *SeaTitan* snage 10 MW s promjerom lopatica od 190 m, kojeg je projektirala američka tvrtka AmSC (American superconductor), a temeljen je na HTS tehnologiji. Promjer generatora je 4,5 m uz duljinu paketa 4 m. Statorski namot smješten je u zračnom rasporu, tj. stator nema feromagnetsku jezgru. Mehanički zračni raspor iznosi 20 mm. Generator nazivne snage 12 MVA pri 10 min^{-1} je izradila i uspješno testirala mornarica Sjedinjenih Američkih Država u vrlo teškim pučinskim pogonskim uvjetima.



Slika 6. Gondola *Sea Titan* vjetroagregata – koncept [10], [11]

Tipični HTS supravodljivi generator snage 10 MW zahtijevao bi gondolu veličine 10×6 metara, s ukupnom masom rotora i gondole od 420 tona. Za usporedbu, ekstrapolirana masa rotora i gondole za DD SGSM vjetroagregat iste snage bila bi oko 700 tona, a generatora s prijenosnikom oko 750 tona [12].

4.2. Generatori s magnetskim prijenosnicima (pseudo-izravni pogon)

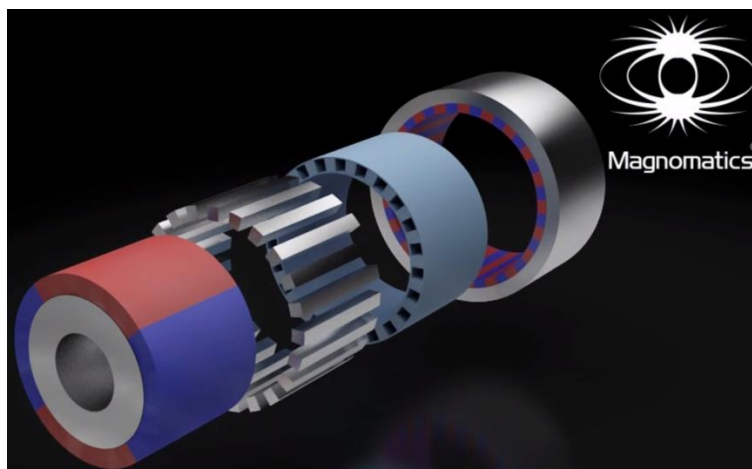
Tvrtka Magnomatics patentirala je magnetski prijenosnik (eng. *magnetic gear*) koji se sastoji od dva prstena sa stalnim magnetima i jednim prstenom načinjenim od feromagnetskih polova (eng. *steel pole pieces*) koji se nalazi između njih (slika 7.). Ovi polovi (šipke) služe kao provodnici magnetskog toka s jednog na drugi magnetski prsten povezujući magnetsko polje koje proizvodi svaki od prstenova. Pomnim odabirom broja polova, harmonički se ta magnetska polja mogu uskladiti tako da se uspostavi određeni prijenosni omjer. Fizikalno, ovaj prijenosnik djeluje kao epiciklički mehanički prijenosnik: jedan od prstenova je učvršćen dok se ostala dva mogu okretati. Uobičajeno je držati nepomičnim vanjski prsten magneta. Magnetski prijenosnici imaju izrazito visoku korisnost, nisku razinu buke i vibracija, a prednost im je i što nema trošenja i podmazivanja zupčanika.

Na temelju magnetskog prijenosnika, tvrtka Magnomatics patentirala je sinkroni generator sa stalnim magnetima koji u sebi ima ugrađeni magnetski prijenosnik [13], [14]. Takav koncept naziva se pseudo-izravni pogon (eng. *Pseudo Direct Drive* - PDD®) i on povezuje stator namotan koncentričnim svicima s magnetskim prijenosnikom (slika 8.). Vanjski prsten magneta učvršćen je u provrtu mirujućeg statora, a magnetsko polje koje stvara namot statora pokreće unutarnji rotor. Moment koji je pritom stvoren prenosi se putem magnetskog prijenosnika, tj. s unutarnjeg rotora na rotor načinjen od feromagnetskih polova. Ovakav stroj je vrlo kompaktan i ima veliku gustoću momenta, a mehanička elastičnost sustava doprinosi vrlo niskoj valovitosti momenta.

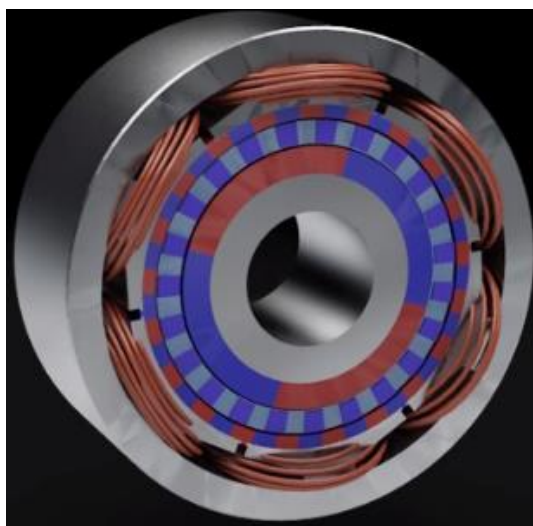
PDD nudi značajni napredak u usporedbi s konvencionalnim strojevima sa stalnim magnetima, što se očituje ponajviše u značajnom porastu gustoće momenta i to do osam puta u usporedbi s ekvivalentnim strojevima s istom vrstom hlađenja. Pritom je zadržan vrlo visok stupanj korisnosti. Idealna primjena ovakvog stroja je u svemirskoj i aeronautičkoj industriji, brodskoj propulziji, pogonu tračničkih vozila te posebice kod izravno pogonjenih vjetroturbina većih snaga. Poželjni režimi rada PDD stroja u ovisnosti o snazi i brzini vrtnje prikazani su crvenom bojom na slici 9. Pravci konstantnog momenta prikazani su

crtkanim linijama i zelenim oznakama na rubu grafa. Može se primijetiti kako vjetroagregat snage 10 MW s izravnim pogonom (brzina približno 10 min^{-1}) pripada povoljnom području rada.

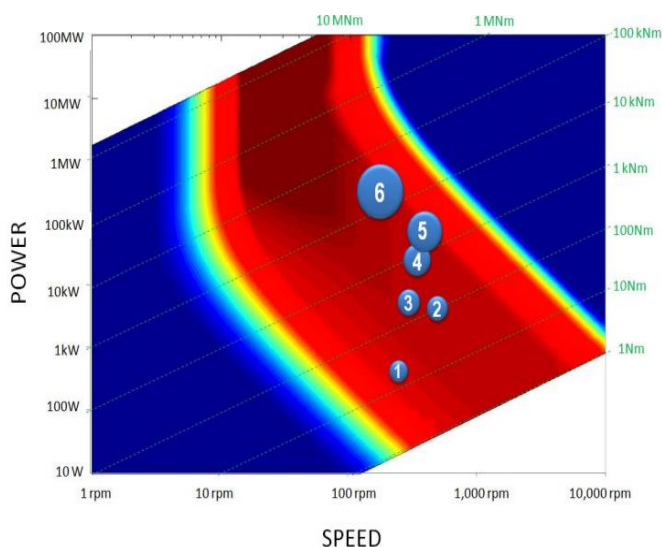
Metodama skaliranja [17] - [18] teoretski je pokazano da se kod izravnog pogona vjetroagregata s PDD pogonskim sustavom mogu postići nazivne korisnosti iznad 98,5 % s ukupnom aktivnom masom od oko 50 tona za 10 MW generator i 140 tona za 20 MW generator.



Slika 7. Magnetski prijenosnik tvrtke Magnomatics – eksplodirani prikaz [15]



Slika 8. Stroj za pseudo-izravni pogon tvrtke Magnomatics [15]



Slika 9. Povoljni režimi rada PDD stroja (označeni crveno) [16]

4.3. Generator sa stalnim magnetima, aksijalnim tokom i zračnom jezgrom

Norveška tehnološka tvrtka Sway Turbine predstavila je 2012. godine revolucionarni 10 megavatni pučinski vjetroagregat temeljen na 25 metarskom sinkronom generatoru sa stalnim magnetima s aksijalnim tokom koji je građen sa zračnom jezgrom (tj. bez feromagnetske statorske jezgre, eng. *axial flux ironless stator*). Idejno rješenje prikazano je na slici 10.

Iako su SGSM sa zračnom jezgrom poznati već dulje vrijeme [19] - [22], ovo neobično rješenje odmak je od konvencionalnih koncepata za pučinske vjetroagregate. Razvoj vjetroagregata Sway ST10 započeo je 2005. godine s ciljem pronalaska cjenovno povoljnijeg rješenja smanjene mase za plutajuće vjetroagregate (sada se to odnosi na vjetroagregate s čvrstim temeljima u morskome dnu) koje će prebroditi ključne izazove povezane sa skaliranjem postojećih vjetroagregata prema graničnoj snazi od 10 MW.

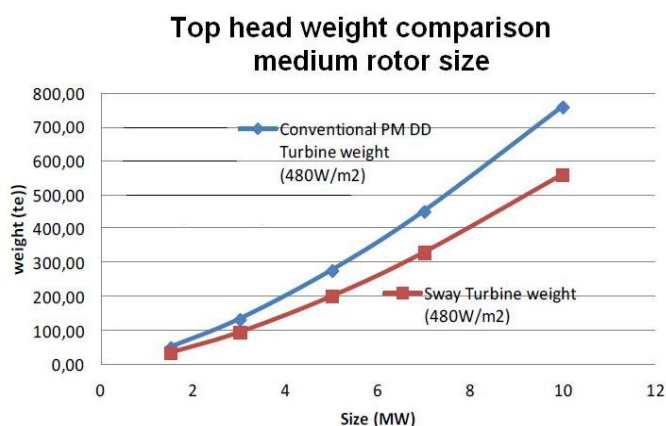
U ovom slučaju, generator je otvorenog tipa i integriran je u strukturu turbinskih lopatica. Donekle slični na veliki kotač bicikla koji se sastoji od vanjskog okvira, žbica i unutarnjeg okvira s ležajima. Vanjski okvir je ustvari aksijalni generator koji se sastoji od dvostrukog rotora i statora (namot u zračnom rasporu

bez feromagnetske jezgre). Unutarnje „žbice“ podupiru stator, a vanjske obuhvaćaju oba vanjska rotorska diska. Takav dizajn generatora u velikoj mjeri eliminira privlačne sile između statora i rotora te značajno smanjuje potrebne strukturne komponente za učvršćenje elektromagnetski aktivnih dijelova generatora. Veliki zračni raspor i upotreba jeftinijih feritnih magneta rezultira relativno niskim iznosima indukcije u zračnom rasporu što rezultira velikim promjerom kako bi se ostvario dovoljan moment.

Masa generatora ST10 iznosi 162 tone, a masa konvencionalnog 10 megavatnog DD SGSM iznosila bi oko 375 tona pri jednakih 164 metra promjera turbinskih lopatica. Iako imaju jednak vanjski promjer, lopatice vjetroagregata ST10 znatno su kraće pa se može postići ušteda na masi lopatica od 40 - 50 %. Ukupno gledano, strukturni dijelovi vjetroagregata su 55 - 60 % lakši nego kod konvencionalnog DD generatora jednake snage, ukupna masa je 20 - 30 % manja, a cijena turbine 15 -20 % manja.



Slika 10. Sway ST10 turbina – koncept



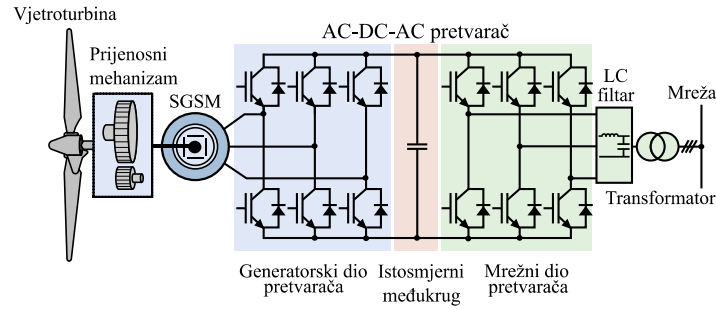
Slika 11. Usporedba parametra *top head weight* za vjetroagregate temeljene na konvencionalnom DD SGSM i SWAY konceptu [23]

Na slici 11. prikazana je usporedba tzv. *top head weight* (ukupne mase svih komponenta ugrađenih u gondolu uključujući i turbinske lopatice) za konvencionalni DD SGSM generator i predloženi koncept Sway turbine u klasi vjetroagregata sa srednjom veličinom lopatica (omjer snage generatora i površine koju zatvaraju rotorske lopatice od 480 W/m²) [23]. Vidljiva je ušteda u masi sustava, kao i porast uštede na većim snagama.

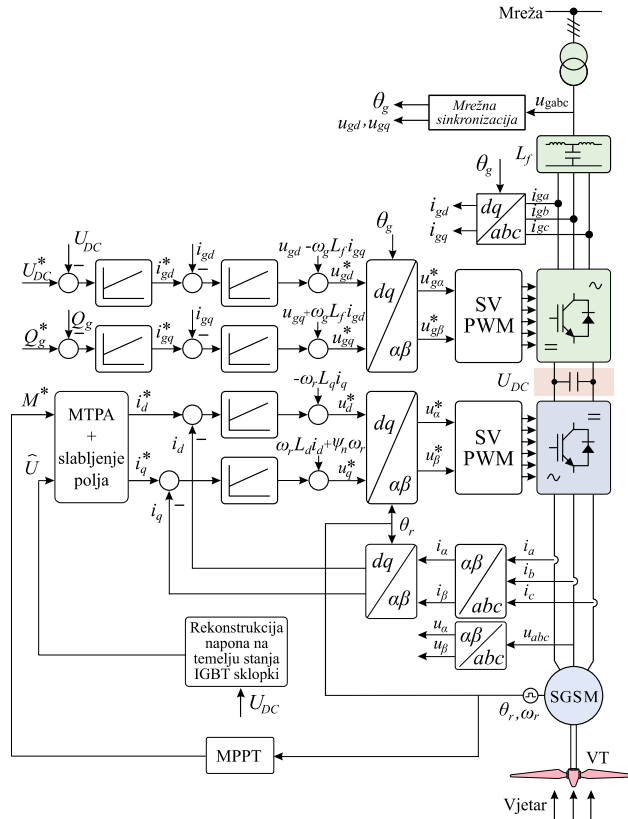
5. METODE UPRAVLJANJA VJETROGENERATORIMA SA STALNIM MAGNETIMA

Standardna struktura vjetroelektrane temeljene na SGSM-u prikazana je na slici 12. Sustav se sastoji od vjetroturbine, prijenosnog mehanizma (ako se radi o brzohodnom SGSM-u), dvorazinskog AC-DC-AC pretvarača (eng. *back-to-back converter*), SGSM-a, LC filtra i transformatora [25]. AC-DC-AC pretvarač se sastoji od generatorskog pretvarača (ispravljača), istosmjernog međukruga i mrežnog pretvarača (izmjenjivača). Standardna struktura upravljanja generatorskim i mrežnim pretvaračem prikazana je na slici 13.

Upravljanje mrežnim pretvaračem temelji se na raspregnutom upravljanju radnom i jalovom snagom koja se predaje u mrežu. Nadređene regulacijske petlje osiguravaju praćenje referentnih vrijednosti napona istosmjernog međukruga te jalove snage koja se predaje u mrežu. Izlazi navedenih regulacijskih petlji su referentne vrijednosti mrežnih struja u sinkronom *dq* koordinatnom sustavu koje se prosljeđuju u podređene strujne regulacijske petlje [26]. Sinkronizacija mrežnog pretvarača na mrežu ostvaruje se putem fazno zatvorene petlje (eng. *phase locked loop*) [27]. Osim upravljanja radnom i jalovom snagom, mrežni pretvarač mora imati implementirane sigurnosne algoritme u slučaju propada napona mreže (eng. *low voltage ride through*). Kako bi se ostvarile vrijednosti THD-a napona i struje mreže prema mrežnim pravilima, između mrežnog pretvarača i mreže dodaje se LC filter koji uklanja harmonike uzrokovane pulsno-širinskom modulacijom (eng. *pulse width modulation*, PWM) mrežnog pretvarača.



Slika 12. Standardna struktura vjetroelektrane sa SGSM-om

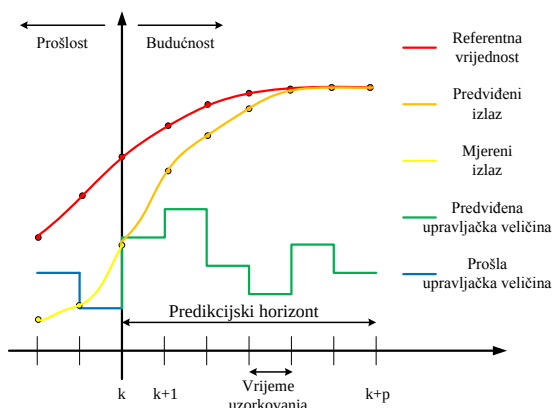


Slika 13. Standardna struktura upravljanja AC-DC-AC pretvaračem

Upravljanje generatorskim pretvaračem temelji se na raspregnutom upravljanju strujama statora u sinkronom dq koordinatnom sustavu. Navedeni tip upravljanja često se naziva i vektorsko upravljanje u koordinatnom sustavu magnetskog toka rotora (eng. *field oriented control*). Referentna vrijednost momenta SGSM-a proračunava se u nadređenom sustavu upravljanja prema MPPT (eng. *maximum power point tracking*) algoritmu [28] te se proslijeđuje upravljačkoj strukturi generatorskog pretvarača. MPPT algoritam nadređenog sustava proračunava referentni moment kako bi se osigurala optimalna brzina rotora s obzirom na brzinu vjetra. Time se najveća moguća snaga preuzme iz ulazne snage vjetra te sustav radi u optimalnom području. Iz referentne vrijednosti momenta proračunavaju se referentne struje u sinkronom dq koordinatnom sustavu prema MTPA (eng. *maximum torque per ampere*) algoritmu te se proslijeđuju PI regulatorima strujnih regulacijskih petlji.

Vektorsko upravljanje temelji se na transformaciji iz mirujućeg koordinatnog sustava statora u koordinatni sustav koji rotira sinkronom brzinom (Parkova transformacija) koristeći podatak o kutnom položaju rotora. Budući da je točna vrijednost kuta rotora ključna za upravljačke performanse, kut rotora se najčešće mjeri pomoću mjernog člana (npr. enkoder ili rezolver). No kako bi se povećala robusnost te pouzdanost sustava upravljanja razvijaju se algoritmi bezsenzorskog (eng. *sensorless*) upravljanja čime se eliminira mjerni član brzine/kuta rotora. U literaturi postoji veći broj algoritama za estimaciju brzine vrtnje koji se najčešće klasificiraju na algoritme temeljene na matematičkom modelu SGSM-a i algoritme temeljene na injektiranju signala visoke frekvencije (eng. *high frequency injection*) [29]. Algoritmi temeljeni na matematičkom modelu mogu se podijeliti na adaptivne (adaptivni estimatori temeljeni na referentnom

Trend u upravljanju električnim strojevima i pretvaračima, a i u vjetroelektranama, je razvoj naprednih struktura upravljanja kojima se postižu bolje performanse upravljanja u usporedbi sa standardnim strukturama upravljanja. Od naprednih algoritama upravljanja posebice se ističe modelsko prediktivno upravljanje (eng. *model predictive control*, MPC). MPC je tip upravljanja koji u svakom trenutku uzorkovanja određuje optimalnu vrijednost upravljačke veličine rješavanjem optimizacijskog problema koristeći sadašnja mjerenja i predikciju budućih varijabli stanja sustava, uz zadan skup ograničenja [32]. Predikcija budućih stanja sustava izvršava se na predikcijskom horizontu (eng. *prediction horizon*) koji predstavlja određen broj trenutaka diskretizacije. Jedna od glavnih prednosti MPC-a pred standardnim strukturama upravljanja (npr. PI regulator) je uključivanje ograničenja sustava (npr. ograničenja aktuatora, maksimalno dozvoljeno nadvišenje, sigurnosna ograničenja i sl.) prilikom sinteze samog regulatora [32]. Princip rada MPC-a prikazan je na slici 14.



Slika 15. FCS-MPC struktura upravljanja

S druge strane, kod FCS-MPC algoritama ne postoji PWM već se sklopkama pretvarača izravno upravlja. Stoga se ovaj tip upravljanja često uspoređuje s izravnim upravljanjem momentom (eng. *direct torque control*, DTC). U usporedbi s CCS-MPC algoritmima, dinamički odziv je bolji u slučaju FCS-MPC

algoritama [35] - [37] budući da kašnjenje koje unosi PWM ne postoji. Također, sklopna frekvencija je promjenjiva te su oscilacije struje i momenta u pravilu veće. No, budući da se sklopkama izravno upravlja, moguće je smanjiti sklopne gubitke ispravnim odabirom funkcije cilja. Optimizacijski problem je znatno jednostavniji u slučaju FCS-MPC algoritama budući da postoji konačan broj mogućih vrijednosti upravljačkih veličina (npr. za dvorazinski pretvarač postoji šest aktivnih i dva nul-vektora napona). FCS-MPC algoritmi najčešće koriste jedan korak predikcije zbog jednostavnosti proračuna optimizacijskog problema. Produljenjem predikcijskog horizonta na više koraka predikcije značajno raste i računska složenost optimizacijskog problema.

Na slici 15. prikazan je primjer FCS-MPC algoritma koji zamjenjuje standardnu strukturu upravljanja strujama SGSM-a koja se temelji na raspregnutom radu dva PI regulatora.

Opisani standardni algoritmi upravljanja za SGSM (strukture vektorskog upravljanja generatorskim i mrežnim pretvaračem), funkcija letećeg starta te algoritam modelskog prediktivnog izravnog upravljanja strujama SGSM-a su već implementirani i eksperimentalno verificirani u Končarevom AC-DC-AC pretvaraču KONvert W1500.

6. ZAKLJUČAK

Tehnologija sinkronih generatora sa stalnim magnetima prisutna je u komercijalnim rješenjima vjetroagregata najvećih snaga s trenutnim ograničenjem na 9 MW. Primjenjuju se u izravnim pogonima te pogonima s multiplikatorom za srednje i visoke brzine vrtnje generatora. Glavne prednosti SGSM-a su visoka gustoća momenta i visoka korisnost zbog malih gubitaka u rotoru. Za pučinske vjetroelektrane snage od 10 MW i više prednost imaju generatori s izravnim pogonom s gledišta pouzdanosti sustava i cijene električne energije, no glavni problem je prevelika masa generatora stoga se razvijaju alternativna rješenja od kojih najviše obećavaju supravodljivi generatori, generatori s magnetskim prijenosnicima (pseudo-izravni pogon) te generatori s aksijalnim tokom i zračnom jezgrom.

Pri upravljanju vjetrogeneratorima važno je osigurati leteći start pretvarača, njegovu sinkronizaciju na mrežu te regulaciju radne i jalove snage. Upravljanje generatorom je standardno bazirano na vektorskoj regulaciji sa i bez mjernog člana brzine vrtnje uz primjenu odgovarajućih metoda estimacije položaja i brzine vrtnje rotora (adaptivni estimatori, observeri, Kalmanov filtar i dr.). Bolje performanse upravljanja moguće je postići primjerice modelskim prediktivnim upravljanjem kojim je moguće uključiti ograničenja sustava prilikom sinteze samog regulatora, no glavni nedostatak je računalna zahtjevnost algoritma zbog rješavanja optimizacijskog problema u svrhu određivanja optimalne vrijednost upravljačke veličine u stvarnom vremenu.

7. LITERATURA

- [1] J. Pyrhönen, J. Nerg, P. Kurrnen, J. Puranen and M. Haavisto, "Permanent magnet technology in wind power generators", The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome, 2010, pp. 1-6.
- [2] V. Yaramasu: "Predictive Control Of Multilevel Converters For Megawatt Wind Energy Conversion Systems", disertacija
- [3] V. Yaramasu, B. Wu: "Model Predictive Control of Wind Energy Conversion Systems", January 2017, Wiley-IEEE Press
- [4] Z. Zhu, J. Hu, "Electrical machines and power-electronic systems for high-power wind energy generation applications: Part I – market penetration, current technology and advanced machine systems", COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, vol. 32, no. 1, pp. 7–33, 2013.
- [5] Dostupno na poveznici: <http://theswitch.com/>
- [6] P. Kurrnen, M. Haavisto, J. Pyrhönen: "Challenges in applying permanent magnet (PM) technology to wind power generators", European Wind Energy Conference and Exhibition 2010
- [7] A. Matveev, "Novel PM generators for wind turbines", Wind Power R&D seminar – Deep sea offshore wind power, Trondheim, Norway, 2011.
- [8] Z. Zhang, „Ironless Permanent Magnet Generators for Direct-Driven Offshore Wind Turbines“. 2015, disertacija
- [9] J. Wang, R. Qu, Y. Liu, J. He, Z. Zhu and H. Fang, "Comparison Study of Superconducting Wind Generators With HTS and LTS Field Windings", in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25, no. 3, pp. 1-6, June 2015.
- [10] American superconductor, "Concepts For High Power Wind Turbines Introducing HTS Technology", World Green Energy Forum 2010, Gyeongju city, Korea, November, 2010, dostupno na poveznici: http://www.keei.re.kr/keei/download/seminar/101117/II101118_a01.pdf

- [11] D. Kostopoulos, „Rough design of a 10 MW HTS wind generator“, MSc Thesis in Sustainable Energy Technology, TU Delft
- [12] dostupno na poveznici: <http://www.amsc.com/documents/hts-generator-solutions-brochure/>
- [13] K. Atallah, J. Rens, S. Mezani and D. Howe, "A Novel "Pseudo" Direct-Drive Brushless Permanent Magnet Machine", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 11, pp. 4349-4352, Nov. 2008.
- [14] A. Penzkofer, K. Atallah, "Analytical Modeling and Optimization of Pseudo-Direct Drive Permanent Magnet Machines for Large Wind Turbines", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 12, pp. 1-14, Dec. 2015.
- [15] Dostupno na poveznici: <http://www.magnomatics.com/pages/media/pdd-gear-video.htm>
- [16] Dostupno na poveznici: <http://www.magnomatics.com/pages/technology/pseudo-direct-drive.htm>
- [17] A. Penzkofer, K. Atallah, "Scaling of Pseudo Direct-Drives for Wind Turbine Applications", Submitted to 13th Joint MMM-Intermag Conference, 11-15 January 2016
- [18] A. Penzkofer, K. Atallah, "Deliverable D3.2.1 Design and Performance Indicators of PDD generator", INNWIND.EU, WP3 Final report, August 2015.
- [19] Z. Zhang, A. Matveev, R. Nilssen, and A. Nysveen, "Ironless permanent magnet generator for offshore wind turbines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, No. 3, pp. 1835-1846, 2014.
- [20] Societe Nationale Industrielle Aerospatiale, "Flywheel for artificial satellites", French Patent FR6924210, Jul. 16, 1969.
- [21] C. Gabrys, "Wind turbine", U.S. Patent 7042109 B2, May 8, 2006.
- [22] Z. Zhang, A. Matveev, R. Nilssen, and A. Nysveen, "Large-diameter ironless permanent magnet generator for offshore wind power application", in *Proc. IEEE ICEM*, Marseille, France, 2012, pp. 684–690.
- [23] "Sway turbine reveals details about its 10MW offshore design", dostupno na poveznici: <http://www.windpowerengineering.com/design/sway-turbine-reveals-details-10mw-offshore-design/>
- [24] E. Borgen, "Introduction of the Sway Turbine ST10", IQPC 3rd International Conference Drivetrain Concepts for Wind Turbines, Bremen, Germany, 2012
- [25] M. Chinchilla, S. Arnaltes, J.C. Burgos, "Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 21, no. 1, pp. 130-135, Mar. 2006
- [26] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, S. Kouro, "Control of grid connected inverter", *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*, USA
- [27] V. Kaura, V. Blaško, "Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 33, no. 1, pp. 58-63, Jan./Feb. 1997
- [28] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi, "Wind energy handbook", John Wiley & Sons, 2001.
- [29] G. Wang, L. Yang, G. Zhang, X. Zhang, D. Xu, "Comparative Investigation of Pseudorandom High-Frequency Signal Injection Schemes for Sensorless IPMSM Drives", *IEEE Trans. Power Electron.* 32 (3) (2017) 2123-2132.
- [30] T. Hanamoto, H. Yamada, and Y. Okuyama, "Position sensorless start-up method of surface permanent magnet synchronous motor using nonlinear rotor position observer," in 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014), pp. 1811–1815, 2014.
- [31] K. Lee, S. Ahmed, and S. M. Lukic, "Universal restart strategy for high inertia scalar-controlled PMSM drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 5, pp. 4001–4009, 2016.
- [32] M. Morari, F. Borelli, C. Jones, "Model predictive control Part 1 - Introduction," ETH Zürich lectures
- [33] M. Preindl and S. Bolognani, "Comparison of direct and PWM model predictive control for power electronic and drive systems," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE. IEEE, 2013, pp. 2526–2533.
- [34] S. Bolognani, L. Peretti, and M. Zigliotto, "Design and implementation of model predictive control for electrical motor drives," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 6, pp. 1925–1936, 2009.
- [35] M. Preindl and S. Bolognani, "Model predictive direct speed control with finite control set of PMSM drive systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 28, no. 2, pp. 1007–1015, 2013.
- [36] M. Preindl and S. Bolognani, "Model predictive direct torque control with finite control set for PMSM drive systems, part 1: Maximum torque per ampere operation," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 9, no. 4, pp. 1912–1921, 2013.
- [37] M. Preindl and S. Bolognani, "Model predictive direct torque control with finite control set for PMSM drive systems, part 2: Field weakening operation," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 9, no. 2, pp. 648–657, 2013.