

Trendi v razvoju močnostne elektronike za vodenje električnih strojev

Andraž Rihar, Mitja Nemec, Henrik Lavrič, Peter Zajec in Danjel Vončina

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: andraz.rihar@fe.uni-lj.si

Povzetek. V delu je podan pregled trendov v razvoju močnostne elektronike za vodenje električnih strojev. Na področju močnostne elektronike se uveljavljajo tako serijske kot tudi paralelne topologije. S serijskimi topologijami lahko dvignemo napajalno napetost zaradi manjše napetostne obremenitve polprevodniških elementov, kot tudi povečamo število izhodnih napetostnih nivojev. Paralelne topologije se uporabljajo za povečevanje moči v aplikacijah, kjer ne želimo zvišati napajalne napetosti, kot tudi v aplikacijah, ki zahtevajo dodaten nivo varnosti delovanja. Večina paralelnih topologij zahteva, da se tako stroj kot močnostna elektronika načrtujeta skupaj, saj so izvedbe strojev večinoma večfazne. Napredek je tudi na področju novih tehnologij, kjer se v praksi že uporabljajo GaN in SiC polprevodniki in je pričakovati, da se bo delež njihove uporabe povečeval. Zmogljivejša so postala tudi orodja za načrtovanje, ki nam omogočajo hkratno analizo sistema z različnih področij kot so: termika, mehanika, elektromagnetika in druga pripadajoča področja.

Ključne besede: večfazni stroji, večnivojski pretvorniki, polprevodniki, načrtovanje, (ko-)simulacija

Advances in power electronics for electric drives

The paper presents a general overview of the recent advances in power electronics for electric drives in the field of topologies, technologies, and design practices. New topologies are transitioning from the research to the practical application phase. They can be classified as serial, which increases the operating voltage, and parallel, which increases the operating current and adds redundancy. The newly emerging technologies are wide band-gap semiconductors, i.e. SiC and GaN. As for the design practices, the increased computing power with the support of advanced software enables simulation and analysis in multiple domains (thermal, mechanical, electromagnetical, etc.)

Keywords: Multiphase machine, multilevel converter, semiconductors, design, (co-)simulation

1 UVOD

Razvoj močnostnih pretvornikov je neposredno povezan z razvojem polprevodniških močnostnih stikal [1]. Obenem morajo pretvorniki seveda izpolniti zahteve, ki jih narekuje uporaba novih tehnologij na strani porabnikov [2]. Najpomembnejša naloga pretvornika je, da pretvori razpoložljivo električno energijo vira s čim večjim izkoristkom in zagotovi ustrezne napetostne in tokovne razmere za optimalno delovanje porabnika.

V literaturi najdemo nekaj člankov, ki opisujejo stanje in nedavni napredek bodisi močnostne elektronike bodisi električnih strojev. Tako je Bose v zaporednih člankih iz let 1993 [3] in 2008 [4] objavil

splošen pregled stanja tehnologije in prihodnjih trendov na področju močnostne elektronike. Podoben pregled ponudi tudi Jahns s poudarkom na razvoju močnostne elektronike za pogone v industriji in v električni vleki [5]. Williamson *et al.* se osredinjajo na trenutno stanje in prihodnje izzive v industrijski elektroniki za elektrifikacijo transporta, predvsem pogonskih sklopov vozil [6]. Pregledni članki v literaturi sicer podajo zanimiv pregled stanja na področju močnostne elektronike, žal pa ponudijo precej pomanjkljiv pregled predvsem večnivojskih in večfaznih topologij pogonov ter le površno opišejo napredek na področju simulacijsko podprtega načrtovanja pogonov.

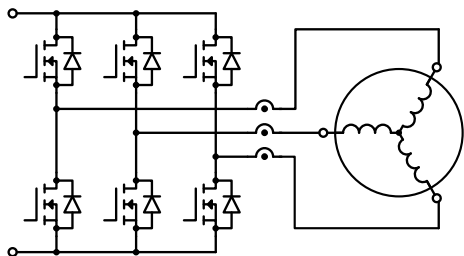
V nadaljevanju bomo tako podrobneje obravnavali smeri razvoja močnostnih pretvornikov na področju elektromotorskih pogonov s poudarkom na novih topologijah električnih pogonov, novih tehnologijah močnostnih stikal ter najnovejših postopkih načrtovanja pogonov.

2 TOPOLOGIJE ELEKTRIČNIH POGONOV

Najbolj uporabljena topologija pretvornika v električnih pogonih je klasični trifazni trivejni dvonivojski mostič B6, ki je priklopljen na trifazni stroj (slika 1) [7], [8]. Topologija je preprosta, zelo dobro poznana in uporablja malo elementov.

S povečevanjem moči pogona pa trčimo ob omejitve topologije. Pri povečevanju moči z dvigom napetosti delovanja smo omejeni s prebojno napetostjo

uporabljenih polprevodnikov. Pri povečevanju toka sta omejitev tokovna zmogljivost polprevodnikov in stroja ter povečevanje izgub v povezovalnih vodnikih. Ti dve težavi rešujejo bolj kompleksne topologije, ki jih v grobem lahko delimo na serijske in paralelne.



Slika 1: Trivejni trifazni dvonivojski mostič in trifazni stroj

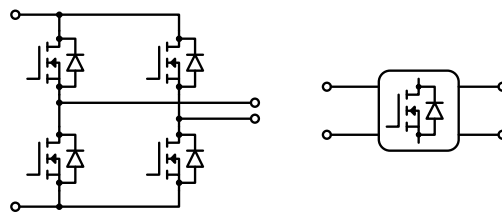
2.1 Serijske topologije pogonov

V okviru termina serijske topologije pogonov zajemamo predvsem večnivojske močnostne pretvornike, ki pa običajno vključno s strojem ostajajo trifazni [9]. Splošno gledano je dandanes raziskanih več različic večnivojskih pretvornikov [10], [11], kot so: simetrična in asimetrična kaskadna izvedba [12], izvedba z ločilnimi diodami [13], T-izvedba [13], [14], izvedba z ločilnimi kondenzatorji [15], generalizirane izvedbe [16], [17] in še nekaj drugih [18], [19], [20]. Posamične izvedbe imajo pripadajoče prednosti in slabosti, ki posredno omejujejo možnost uporabe v specifičnih aplikacijah. Trenutno so večnivojski pretvorniki sicer večinoma uporabljani v aplikacijah, povezanih z mikroomrežji in fotovoltaike [21], čedalje pogosteje pa se pojavljajo tudi na področju napajanja električnih strojev [9], [22], [23]. Osnovne prednosti večnivojskih topologij so: manjše harmonsko popačenje izhodne napetosti (THD – angl. Total harmonic distortion), manjše sofazne napetosti (angl. Common-mode voltages), manjše preklopne izgube zaradi nižjih strmin napetosti ob preklonih ter predvsem možnost uporabe stikal za nižje napetosti, saj posamično stikalo pri nekaterih topologijah prevzame zgolj polovično napetost enosmernega vmesnega tokokroga [10]. Zahvaljujoč temu je pričakovati izboljšanje obratovanja z vidika elektromagnetnih motenj (EMI – angl. Electromagnetic interference), ne le na višjih, temveč tudi na nižjih napetostnih nivojih. Namesto uporabe visokonapetostnih IGBT stikal je pričakovati pogostejšo uporabo tudi nižjenapetostnih MOSFET stikal, s katerimi bo mogoče dodatno zmanjšati izgubne moči. Poglavitne pomanjkljivosti večnivojskih pretvornikov so večje število potrebnih stikal in drugih komponent, prav tako pa večje število pripadajočih prožilnih vezij in kompleksnejši algoritmi proženja [16], [24].

2.1.1 Kaskadna izvedba s H-mostiči

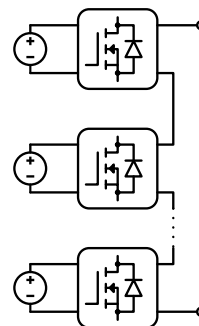
Kaskadna izvedba je nadgradnja osnovnega H-mostiča (glej sliko 2). Na izhodu posameznega H-mostiča je z vklopom diagonalnih tranzistorjev mogoče dobiti

napetostna nivoja $+U_{DC}$ in $-U_{DC}$. V kaskadni izvedbi je več H-mostičev povezanih v serijo (glej sliko 3), vsak mostič pa ima svoj ločen, izoliran enosmerni napetostni vir.



Slika 2: Osnovna izvedba H-mostiča z MOSFET stikali

Vsak mostič je mogoče krmiliti neodvisno, izhodni napetostni nivo pa pomeni vsoto posameznih izhodnih nivojev. Z uporabo napetostnih virov različnih nivojev (na primer 10 V, 30 V in 90 V) je z različnimi modulacijskimi pristopi (seštevanje in odštevanje) mogoče doseči še večje število nivojev izhodne napetosti, s tem pa dodatno zmanjšanje harmonskega popačenja napetosti.



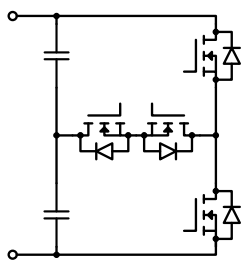
Slika 3: Shematski prikaz kaskadne izvedbe večnivojskega pretvornika s H-mostiči

Taka napetost omogoča manjšo valovitost navora v motorju in dodatno zmanjšanje harmonskih izgub v stroju [25], [26]. Prednosti kaskadne izvedbe v primerjavi z drugimi sta predvsem potreba po manjšem številu komponent za dodaten nivo napetosti in izrazito modularna struktura. Uravnavanje napetostnih nivojev enosmernih virov je mogoče z razmeroma preprostimi modulacijskimi metodami. Osnovna slabost je dejstvo, da je potrebnih več napetostnih virov, posledično lahko cena naraste, ker je potrebnih več kondenzatorjev.

2.1.2 T-izvedba večnivojskega pretvornika

T-izvedba je nadgradnja H-mostiča, pri kateri je uporabljena le ena tranzistorska veja, dve stikali pa sta namesto v ločeni tranzistorski veji uporabljeni kot aktivno dvosmerno stikalo v povezavi do srednjega odcepa enosmernega vmesnega tokokroga (glej sliko 4) [27]. Kljub možnosti večjega števila nivojev izhodne napetosti sta le horizontalna MOSFET-a lahko normirana na polovično napajalno napetost, medtem ko morata biti vertikalna MOSFET-a še vedno sposobna vzdržati celotno napajalno napetost. Prevodne in stikalne izgube je ob enakem številu potrebnih

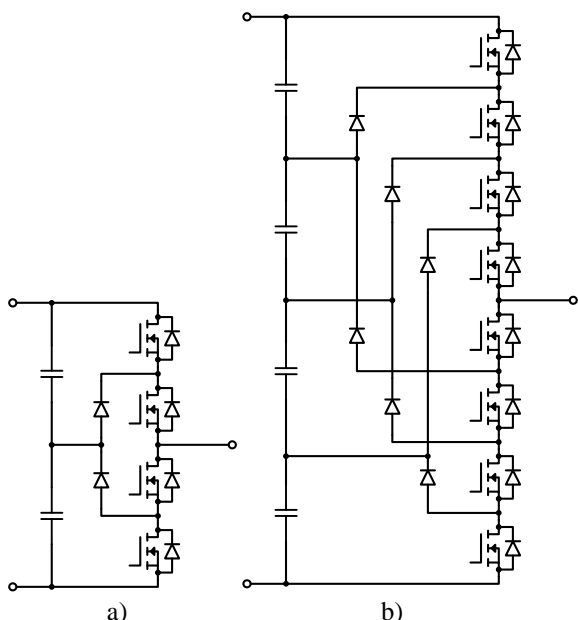
elementov mogoče delno zmanjšati, slabost pa je potreba po dodatnem galvansko ločenem prožilnem vezju.



Slika 4: Ena fazna veja trinivojske T-izvedbe

2.1.3 Izvedba z ločilnimi diodami

Izvedba z ločilnimi diodami (NPC – angl. Neutral-Point Clamped) prav tako omogoča doseganje večjega števila nivojev izhodne napetosti zahvaljujoč deljenemu enosmernemu vmesnemu tokokrogu, s katerim napajalno napetost U_{DC} razdelimo na enakomerne dele.



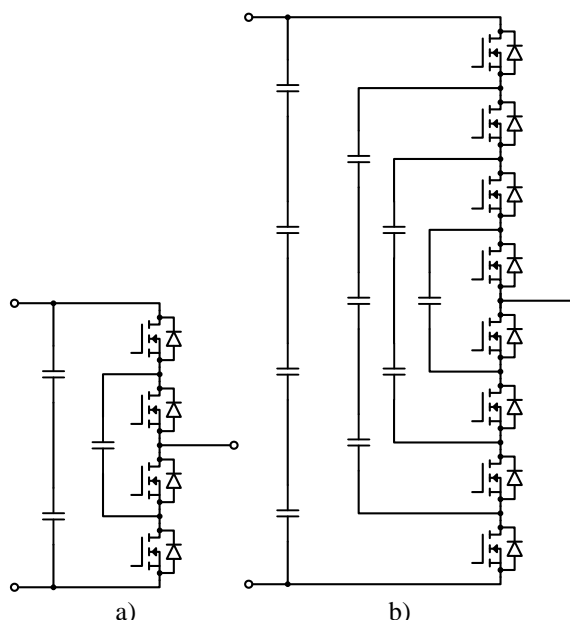
Slika 5: Ena fazna veja a) trinivojskega in b) petnivojskega NPC pretvornika

Pri trinivojskem pretvorniku na sliki 5a tako na primer potrebujemo dve polovici napetosti enosmernega vmesnega tokokroga in na izhodu dosegamo tri napetostne nivoje: $+U_{DC}/2$ (zgornja tranzistorja), 0 (srednja tranzistorja) in $-U_{DC}/2$ (spodnja tranzistorja). Dvosmerno stikalo T-izvedbe je tu nadomeščeno z dvema ločilnima diodama, ob tem pa je podvojeno število vertikalnih tranzistorjev. Taka vezava omogoča uporabo tranzistorjev z nižjimi nazivnimi napetostmi, saj so posamezni tranzistorji med delovanjem obremenjeni zgolj s polovično napetostjo. Ta stikala pa imajo običajno ugodnejše karakteristike z vidika prevodnih in stikalnih izgub. Osnovni pomanjkljivosti izvedbe sta precej zahtevnejše uravnavanje tako

imenovane srednje točke enosmernega vmesnega tokokroga, ki ga je mogoče izvesti s kompleksno modulacijo [28], [29], in dodatna potreba po ločilnih diodah, katerih število narašča s številom dodatnih napetostnih nivojev. Ločilne diode se v nekaterih primerih lahko zamenjajo z aktivnimi stikali (tranzistorji) in nastane A-NPC izvedba (aktivna različica), s čimer se lahko dodatno zmanjšajo (prevodne) izgubne moči pretvornika [30]. NPC pretvorniki imajo sicer običajno precej visoke izkoristke tudi pri višjih stikalnih frekvencah, ena pglavitnih težav zaradi plavajočih potencialov pa je potreba po večjem številu galvansko ločenih prožilnih vezij, kar dodatno oteži integracijo sistema.

2.1.4 Izvedba z ločilnimi kondenzatorji

Izvedba z ločilnimi kondenzatorji (FC – angl. Flying-Capacitor) je po strukturi precej podobna NPC izvedbi, le ločilne diode so zamenjane z namenskimi ločilnimi kondenzatorji (glej sliko 6).



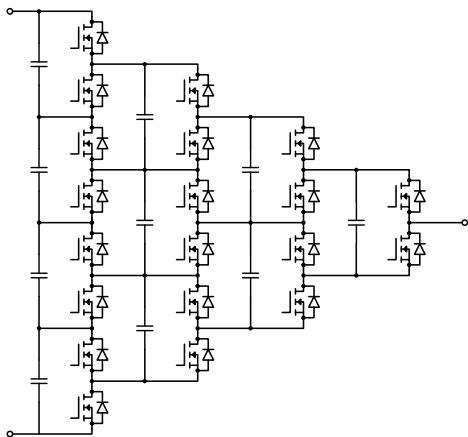
Slika 6: Ena fazna veja a) trinivojskega in b) petnivojskega pretvornika z ločilnimi kondenzatorji

Izvedba je sicer zanimiva za področje višjih napetosti, pglavitna težava je potreba po večjem številu ločilnih kondenzatorjev, ki dodatno podražijo in povečajo celoten pretvornik. V določenih primerih je to seveda lahko ugodnejše od uporabe ločilnih diod.

2.1.5 Generalizirana P2-izvedba

Generalizirana P2-izvedba je kombinacija izvedb z ločilnimi diodami in ločilnimi kondenzatorji. Večje število nivojev izhodne napetosti je mogoče doseči s piramidno vezavo (polmostičnih) tranzistorskih vej na sliki 7 in s pripadajočimi kondenzatorskimi paketi. V primerjavi s prejšnjima izvedbama potrebujemo precej večje število komponent, ki z dodatnimi nivoji narašča nelinearno in lahko precej podraži pretvornik.

Zahtevnejše je tudi proženje posameznih stikal. Glavne prednosti izvedbe so večje število mogočih vklopnih stanj, posledično pa večja prostost pri uravnavanju napetosti posameznih delov enosmernega vmesnega tokokroga. Mogoče aplikacije segajo tudi na področje DC/DC pretvorbe električne energije.



Slika 7: Petnivojska generalizirana P2-izvedba

2.2 Paralelne topologije pogonov

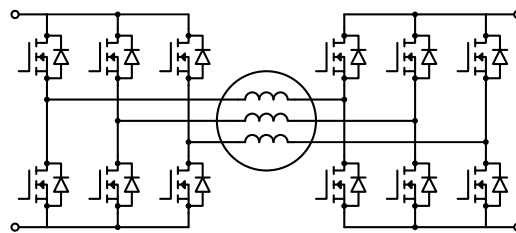
Pri paralelnih razširitvah pogonov je v literaturi mogoče srečati rešitve z več paralelnimi močnostnimi stopnjami, medtem ko stroj ostaja trifazen [31]. V večini primerov žal ni dovolj samo razširitev močnostne stopnje. Z današnjo tehnologijo namreč hitro dosežemo tokove v območju 500 A–1000 A, ki so problem tudi s stališča samega stroja, predvsem glede ustreznosti razporeditve izgubnih moči. Poleg tega je paralelna vezava posameznih močnostnih stikal težava s stališča zanesljivega obratovanja. To težavo obidemo s paralelno razširitvijo celotnega pogona.

Tako trifazni stroj postane večfazni stroj (več kot tri faze), pri katerem je posamezna faza napajana z eno tranzistorsko vejo [32]. Področje večfaznih strojev je dodobra raziskano z akademskega stališča [33], [34]. Poleg povečanja moči imajo paralelne topologije tudi druge prednosti, pri čemer je področje redundance in z njo povezane varnosti najbolj raziskano [35], [36]. Dodatne prednosti večfaznih strojev so: nižja valovitost navora oziroma bolj tekoče delovanje, sploh pri pulznem napajanju, in tudi manjše izgube [37].

Ker se področje še aktivno razvija, terminologija ni poenotena, v grobem pa se večfazni pogoni delijo na:

2.2.1 Stroji z odprtim navitjem (open end winding)

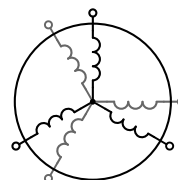
V principu gre za klasičen trifazni stroj, pri katerem so izvedeni tako začetki kot tudi konci navitij (slika 8) [38]. Stroj se napaja z dvema trifaznima mostičema (ali tremi enofaznimi). Prednosti so: nekoliko zmanjšana moč po posamezni pretvorniški veji, možnost obratovanja ob izpadu ene faze, možnost zmanjšanja ali celo odprave sofaznih napetosti [39], [40].



Slika 8: Pogon z odprtim navitjem

2.2.2 Stroji z ločenimi navitji (split wound)

Pri strojih z ločenimi navitji je stator sestavljen iz dveh ali več trifaznih navitij [41], [42], [43]. Navitja so med seboj lahko tudi sklopljena, kar povzroči izenačevalne tokove, če stroj in/ali napajanje nista simetrična. Sklopitev je lahko simetrična ($360^\circ/n$ premik med posameznima sistemoma) ali asimetrična ($180^\circ/n$ premik – slika 9), pri čemer ima izbira vpliv na delovanje le pri nizki preklopni frekvenci napajanja ali pulznega obratovanja [34], [44]. Stroje s simetrično sklopitvijo lahko obravnavamo tudi kot več trifaznih strojev [45].

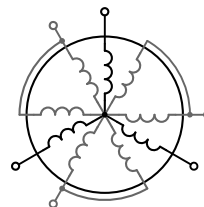


Slika 9: Stroj z ločenimi navitji in s 30° asimetrijo

2.2.3 Stroji z dvojnimi statorjem (dual stator)

Stroji z dvojnimi statorjem so posebna izvedba, kjer sta statorja načrtovana za specifičen namen. Izvedbe teh strojev so eksotične [46], [47], kot na primer:

- Generator z enim statorjem ustvarja polje, drugi stator pa napaja breme. Tako pretvornika, ki napaja stroj, ni treba dimenzionirati za nazivno izhodno moč.
- Stroj, pri katerem imata statorja različno število polov. S tem se pokrije širše območje delovanja.

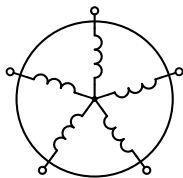


Slika 10: Stroj z dvema statorjema z različnim številom polovih parov

2.2.4 Večfazni stroji

Pod tem imenom se v literaturi prekrivajo stroji z ločenimi navitji in pravi večfazni stroji. Najbolj prepoznavni predstavniki večfaznih strojev so: petfazni asinhronski stroj (slika 11) [48], pet- [49], [50], [51] in šestfazni sinhronski [52] ter šestfazni asinhronski stroj

[34]. Zadnja dva lahko spadata tudi med stroje z ločenimi navitji. Petfazni asinhronski stroj je zelo zanimiv s stališča zanesljivosti delovanja. Pri njem namreč lahko dosežemo zanesljivo delovanje tudi ob izpadu dveh faz.



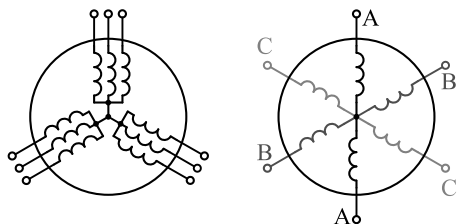
Slika 11: Petfazni stroj

Večina razvoja na tem področju je bila posvečena asinhronskemu stroju, s katerim lahko izkoristimo fleksibilnost, ki jo ponujajo dodatna navitja, in za pogone velikih moči (> 500 kW).

V praksi se večfazni stroji uporabljajo v glavnem na področju pogonov velikih moči, na področju manjših moči pa jih v uporabi za zdaj ni zaslediti. Razlogov za to je več: večfazni pogon zahteva bistveno več sodelovanja med inženirji različnih področij (konstrukcija, močnostna elektronika, vodenje), kar podaljša razvojni cikel; s povečanim številom močnostnih komponent se poveča tudi število drugih komponent (prožilna vezja, napajalna vezja), kar podraži pogon, ki je tako na trgu lahko nekonkurenčen.

2.2.5 Večvejne

Posebna izvedba večfaznega stroja je večvejni stroj. Stroj se lahko načrtuje kot klasični trifazni stroj, le da so navitja lahko ali »multifilarna«, ali pa gre za navitja iste faze, ki so prostorsko zamaknjena pri strojih z več polovimi pari (slika 12). V tem primeru lahko govorimo tudi o stroju z ločenimi navitji. Poleg tega so mogoče tudi kombinirane izvedbe. Ti stroji se obnašajo enako kot trifazni stroji in tudi konstrukcija stroja je tako rekoč enaka konstrukciji klasičnih trifaznih strojev. Le-to olajša načrtovanje celotnega pogona, kjer je glavni kriterij paralelizacija zaradi doseganja večje moči.



Slika 12: Večvejni stroj (multifilarna izvedba in izvedba z več polovimi pari)

3 TEHNOLOGIJE POLPREVODNIŠKIH STIKAL

3.1 Uveljavljeni Si IGBT in MOSFET tranzistorji

Začetki danes uveljavljenih močnostnih stikalnih elementov, kot so MOSFET in IGBT tranzistorji, za aplikacije z višjimi stikalnimi frekvencami od nekaj kHz pa do nekaj 10 kHz, segajo v začetna 80. leta

prejšnjega stoletja. Njihov prihod je omogočil velik napredek v energijskih izkoristkih statičnih pretvornikov in tudi razvoj najrazličnejših naprav močnostne elektronike za uporabo tako v profesionalne industrijske kot tudi v komercialne potrošniške namene [5]. V zadnjem času je tehnologija "Super Junction" MOSFET-ov (npr. CoolMOS) v smeri zniževanja $R_{DS,on}$ že tako napredovala, da na področju nazivnih napetosti med 600 V in 900 V že v dobri meri nadomešča IGBT-je. Po drugi strani pa se tudi razvoj slednjih ni ustavil. Dokazali so, da se s spreminjanjem in preoblikovanjem geometrije najnovejše t. i. "mesa" strukture napetost zasičenja ($U_{CE,sat}$) zniža na 80 % vrednosti navadnega IGBT-ja [53]. Medtem ko na spodnjem napetostnem območju IGBT-je vse bolj izpodrivajo MOSFET-i [54], pa so IGBT-ji uspešno nadomestili GTO tiristorje v pogonski tehniki električne vleke z napetostnim območjem do 6,5 kV [55]. ABB ima tako v ponudbi najzmogljivejše elemente za 6,5 kV/750 A, 4,5 kV/1200 A itn.

Še nedolgo nazaj so veljali energijski izkoristki polprevodniških pretvornikov v območju od 96 do 98 % ali celo malo čez za zgornjo mejo dosegljivega in so bila prizadevanja za preseganje teh meja nesorazmerna koristim. Da pa ne bo ostalo pri tem, so na evolucijsko pot po letu 2000 vstopili WBG (angl. Wide Band Gap) elementi [1]. In sicer najprej 2001 SiC dioda, v letu 2006 pa ji je sledil še prvi SiC JFET. Prvi elementi v GaN tehnologiji so bili lansirani v letu 2010 [56], [57].

3.2 SiC

Prve SiC Schottky diode so izdelovali za relativno nizke nazivne napetosti, da so lahko zagotavljali majhne padce v prevodnem stanju in nizke reverzne toke. Njihova bistvena prednost se je kazala v izjemno majhnih Q_{rr} in t_{RR} (reverzni sprostitveni naboj in sprostitveni čas), ki sta povzročala zelo majhne reverzne tokovne konice ob zaporni prepolarizaciji. Posledično so bile preklopne izgube na diodi tako rekoč zanemarljive, odpadel pa je tudi s tem povezan del vklopnih izgub na stikalnih tranzistorjih.

Trenutno so dobavljivi posamezni SiC elementi, tako MOSFETI kot diode napetostnega nivoja 1200 V, preizkušajo pa tudi že 1700 V elemente. S tem SiC vstopa na del področja, ki ga zasedajo IGBT-ji [58]. V primerjavi z IGBT-ji SiC-i poleg visoke vzdržne napetosti izkazujejo tudi nizko napetost v prevodnem stanju in dosegajo visoke preklopne hitrosti ter manjše izgubne moči [59]. Imajo tudi trikrat boljše toplotno prevodnost, kar zagotavlja učinkovitejše odvajanje toplote in zato delujejo tudi do 175 °C z manj omejevanja toka kot pri Si. SiC tehnologija zaradi zmanjšanih stikalnih izgub omogoča 2- do 5-krat višje stikalne frekvence kot Si tehnologija. S tem pa se zmanjšajo tudi pasivni elementi, hladilni sistem je manjši in cenejši [60], [61].

Za krmiljenje SiC MOSFET-ov je priporočena napetost prožilnega vezja za prevajanje 20 V in 0 V za

blokiranje, za večjo toleranco na motnje in še hitrejšo preklopne čase pa celo – 5 V.

3.3 GaN

Komercialno dostopni so GaN tranzistorji do napetostnega nivoja 650 V. Za močnostna stikala so izvedeni v vezavi "cascode" z nizkonapetostnimi MOSFET-i, da delujejo kot normalno izklopljeni tranzistorji [62]. Imajo nižjo pragovno napetost reda 1,5 V, ki v kombinaciji z visoko napetostno strmino ob preklopu drugega tranzistorja v tranzistorski veji lahko privede do samoproženja. Eden od načinov preprečevanja pojava je negativna prednapetost vrat - 3 V. Vendar pa ta povečuje napetostni padec in s tem izgube ob reverznem prevajanju. Zato je priporočljivo slediti najboljšim praksam za izvedbo tiskanega vezja, da se znižajo parazitne induktivnosti, in uporabiti prožilno napetost med 0 V in 6 V. 600 V GaN ima s primerljivim Si SJ-MOSFET-om enako $R_{DS,on}$, 10-krat nižji izhodni naboj in 10-krat nižji naboj vrat. Sprostitveni naboj pa ima 100-krat nižji. To omogoča izjemno hitre preklope z zelo kratkimi zakasnitvami ob spremembi prožilnega signala. Vklonpa napetostna strmina, ki jo lahko doseže GaN, je 80 V/ns, izklopna pa celo preseže 100 V/ns. V primerjavi s SiC MOSFET-om s podobnim $R_{DS,on}$ GaN 4-krat hitreje vklopi in 2-krat hitreje izklopi [63]. GaN tranzistorji omogočajo delovanje pri stikalnih frekvencah <100 MHz. Ker so preklopne izgube zelo majhne, je višja stikalna frekvenca še toliko bolj smiselna [64].

V strokovni javnosti so odmevno prepoznavnost GaN tehnologije povzročili zmagovalci Googlevega natečaja "Little box challenge", ki so z uporabo GaN tranzistorjev 2026 VA razsmernik (DC 400 V na AC 230) izvedli v 0,23-litrskem ohišju s 95,4-odstotnim izkoristkom [65]. Da pa kljub superiornim karakteristikam WBG elementi (še) ne bodo v širšem področju uporabe izpodrinili obstoječe, uveljavljene Si tehnologije, so krivi cena, dobavljivost in pa tudi dejstvo, da ne omogočajo direktne zamenjave Si elementov, ampak je treba aplikacijo prilagoditi. Zato bomo v prihodnosti spremljali koeksistenco tehnologij [66], [67].

4 INTEGRACIJA MOČNOSTNE ELEKTRONIKE IN ELEKTRIČNIH STROJEV

Zaradi želje po izboljšanju karakteristik električnega pogona namesto ločenih sklopov čedalje pogosteje srečujemo integrirane električne pogone, kjer ima električni stroj že prigrajeno tudi močnostno elektroniko [7], [68], [69], [70]. Načrtovanje integriranih pogonov se omenja kot eden ključnih korakov k doseganju večjega izkoristka [71].

Napredek je opazen tudi pri integraciji obstoječe tehnologije stikal, ki se integrira v tako imenovane pametne module. Ti poleg močnostne stopnje v istem ohišju združujejo tudi prožilna vezja [72]. Pri

nizkonapetostnih aplikacijah pa modul lahko vsebuje tako močnostno stopnjo, kot tudi vso potrebno senzoriko in krmiljenje ali celo mikrokrmilnik [73], [74]. Razvijalci težijo h koncentriranju močnostnih komponent in posledično povečevanju gostote moči [68]. Čedalje pogostejše so tako imenovane »sendvič« strukture [75], [76], ki so izbrane zaradi majhne vgradne višine in ugodnejšega oblikovanja tokokrogov z veliko tokovno obremenitvijo (amplituda in strmina) [77], [78]. Dodatno so poleg običajnih materialov tiskanin (na primer FR4) močnostne tiskanine čedalje pogosteje izdelane na izoliranem metaliziranem substratu (IMS – angl. Insulated Metal Substrate), ki omogoča učinkovit prehod toplotnega toka na aluminijasto ali bakreno sredico in naprej na ohišje pretvornika, s čimer se lahko skrajšajo razdalje med močnostnimi stikali [75].

Prostorsko porazdeljene snovno-geometrične lastnosti (kot so upornost, induktivnost in kapacitivnost) povezav na tiskanini so bile v preteklosti irelevantne, kar pa ne velja za novejšo zasnovano pretvornikov, kjer so lahko izjemno pomembni vplivi [75], [79], [80]:

- lastne upornosti vezic, ki postaja primerljiva upornosti prevodnega kanala MOSFET-a ...($R_{ds,on} = 2 \text{ m}\Omega$) in ESR podpornih kondenzatorjev, s čimer so primerljiv izvor toplotnega toka; nenamerna zožitev vezic prav tako vodi v lokalno pregrevanje;

- lastne induktivnosti vezic med močnostnimi stikali, kjer velikostni razred parametra postaja prav tako primerljiv z induktivnostmi stikala, ki so pogojena z velikostjo in obliko ohišja ($L_d = 1 \text{ nH}$ do 3 nH); zanemaritev slednje lahko posledično vodi v nepravilno oceno preklopnih izgub in prenapetosti na stikalih, saj sta obe pogojeni s strmino komutirajočega toka;

- lastne kapacitivnosti, ki jo tvorijo vezice z veliko površino (jakotočni del vezja) na IMS tiskanini s tanko dielektrično plastjo ($\epsilon_r = 9$) proti hladilnemu telesu, ki je praviloma na istem potencialu kot ohišje pogona; problematične so vezice, katerih potencial se spreminja z visoko strmino, saj ob tem prek kapacitivnosti tečejo lebdeči toki, ki povečujejo elektromagnetno emisijo naprave; taista kapacitivnost se v določenih primerih prišteva k izhodni kapacitivnosti (C_{DS}) MOSFET-a, s čimer se povečajo preklopne izgube;

- medsebojne induktivnosti med jakotočnimi in šibkotočnimi (merilnimi, krmilnimi) tokokrogi, ki se lahko manifestira predvsem v napačno zajetih merilnih signalih (meritev toka, in/ali položaja s Hallovimi senzorji).

Razdalje med komponentami za ciljne stikalne frekvence aplikacij močnostne elektronike so sicer še vedno manjše od desetkratne dolžine elektromagnetnega (EM) vala, zato lahko vezje po navadi poenostavimo z impedančno matriko koncentriranih nadomestnih komponent. Te je treba izpeljati analitično ali določiti z numeričnimi tehnikami, kot so metode končnih elementov (FEM – angl. Finite element method), torej s pomočjo simulacijskih programov. Oba pristopa sta zamudna ob povečani kompleksnosti postavitve komponent.

5 POSTOPEK NAČRTOVANJA POGONOV

Z naraščajočo računsko močjo lahko s sodobnimi orodji preverimo veliko različnih lastnosti načrtovanega pogona, še preden se lotimo izdelave prototipov. Ker pada tudi cena izdelave prototipa, je cikel načrtovanja čedalje krajši. Posledično si danes lahko privoščimo optimizacijo vsakega načrtovanega pogona za specifično aplikacijo. Poleg tega aktualni trendi narekujejo povečanje učinkovitosti in specifične moči močnostnega pretvornika, kajti le tovrstna prizadevanja lahko privedejo do kompaktnejšega električnega pogona. Posledično se načrtovanje posameznega pretvornika spremeni v unikatno delo tima raziskovalcev različnih profilov znanj, ki morajo poleg električnih in toplotnih vidikov upoštevati še mehanske obremenitve, ki so jim izpostavljene vgrajene komponente [76], [81]. V izjemno pomoč so v tem koraku lahko simulacijski programi in koncept kosimulacije.

5.1 Simulacija

Zaradi koncentrirane postavitve močnostnih stikal in pasivnih komponent (dušilke in kondenzatorji) je postala potreba po uporabi primernih oblikovalskih in simulacijskih orodij bolj nujna kot kdaj koli prej. Na voljo so številni komercialno dostopni paketi za večdomensko simulacijo [82].

Razvijalcu vezij je danes prav tako na voljo več programov za shematično načrtovanje in oblikovanje tiskanin. Med zmogljivejšimi je Altium Designer [83], ki ne omogoča le zgoraj naštetega, temveč je v paket pridruženih že kar nekaj simulacijskih orodij. Med pogosto uporabljanimi so tudi Allegro Cadence [84], Autodesk Eagle [85], PADS [86], OrCAD [87] ter odprtokodni KiCad EDA [88]. Ti na področju elektromagnetne in termične simulacije za zdaj žal še ne morejo tekmovali z orodji, ki so specifično namenjena simulaciji fizikalnih sistemov, kot so Ansys Multiphysics [89], COMSOL Multiphysics [90], FEATool Multiphysics [91] itn.

Princip uporabe simulacijskega orodja lahko prikažemo na primeru programa Ansys Multiphysics, ki združuje več programskih paketov. Osnovno funkcionalnost shematično podanega vezja (na primer trifaznega dvonivojskega razsmernika s pripadajočo krmilno logiko) je mogoče preveriti z Ansys Simplorer-*jem*. Glede na zahtevano globino analize lahko uporabnik izbira med različno kompleksnostjo simulacijskih modelov posameznih komponent, od idealnih do fizičnih Spice modelov, s katerimi operira tudi orodje LTSpice [92]. Ta orodja sicer dajo orientacijsko uporabne rezultate, a je za natančnejši vpogled potreben nadaljnji prehod simulacijskih modelov s shematičnega nivoja na kompleksnejši strojno-fizični nivo. S programskim paketom Q3D-Extractor je mogoče ob upoštevanju razporeditve močnostnih komponent in pripadajočih vezic na vezju ustvariti impedančno matriko koncentriranih elementov.

To se nato kot komponenta doda v shematični model Simplorer-*ja*, s čimer lahko na primer podrobneje ovrednotimo vpliv tiskanine na povišanje prenapetosti tranzistorja in preklopnih izgub [75], [93]. Elektromagnetne razmere v električnem stroju je mogoče simulirati in preveriti v programskem paketu Ansys Maxwell [94], [95], [96]. Programski paket SIWave je namenjen analizi elektromagnetne interference vezja.

5.1.1 Kosimulacija

Prepoznavo in analizo termičnih izvorov oziroma t. i. vročih točk v vezju dajejo v okrnjeni obliki že PDN analizatorji (angl. Power Distribution Network Analysis), ki jih vsebuje marsikateri oblikovalski paket. Vendar pa je njihova zmogljivost omejena, kar velja tudi za namensko orodje Ansys Icepak, saj analiza razmer temelji na ocenjenih tokih in njihovih potekih, ki lahko bistveno odstopajo od realnih.

Spre gledano mesto s čezmerno tokovno gostoto in posledično višjo temperaturo v vezju, kjer je gostota komponent velika, lahko vodi v pospešeno odpoved komponent. Vzrok je tako imenovana elektromigracija [97], ki postaja pereča tudi v močnostnih stikalih z veliko tokovno zmogljivostjo. Še zlasti so občutljiva spojna mesta, kjer se omenjeno manifestira v prazninah (angl. void) oziroma v povečevanju upornosti spojnega mesta, ki dodatno pospeši opisano degradacijo oziroma lahko napreduje v okvaro. Evidentiranje tokovne gostote danes posledično spada med standardne rutine.

Natančnejšo napoved gostote toka lahko v opisanem programskem paketu pridobimo neposredno s tako imenovano kosimulacijo. Temelji na dinamični povezavi med orodjema Simplorer in Maxwell. Prvi izračuna realni potek tokov (ob upoštevanju predhodno dodane impedančne matrike IMS tiskanine), medtem ko se na isti tiskanini, ki je bila uporabljena za določitev impedančnih parametrov s Q3D Extractor-*jem*, v Maxwellu ovrednotijo tokovna gostota, izgube v posameznih povezavah, prepoznajo mesta z lokalnim pregrevanjem itd. Izračun se osveži v vsakem simulacijskem koraku, izvedenem v modelu Simplorer. V omenjeni proces kosimulacije orodij Simplorer in Maxwell je seveda mogoče vključiti tudi dvo- ali tridimenzionalni model stroja in tako ovrednotiti elektromagnetne razmere tudi v električnem stroju [98], [99], [100], [101]. Mogoča je tudi kosimulacija programskih paketov Ansys Simplorer in MATLAB/Simulink [102]. V tem primeru lahko na primer krmilno logiko, pripravljeno v programu Simulink, povežemo s shemo vezja močnostnega pretvornika (ali električnega pogona) iz simulacije v Ansysu [103]. Prednost takega pristopa je v dodatni stopnji svobode pri izbiri simulacijskega programa. Kot alternativa podanemu principu se ponuja kosimulacija programskih orodij Altair HyperWorks (CEDRAT Flux) [104] in Portunus, o čemer poročajo Di Leonardo in soavtorji v [105].

Ob zapisanem velja poudariti, da Q3D-Extractor rešuje le kvazistatična 3-D polja. V nasprotju s tem orodje HFSS (High Frequency Electromagnetic Field Simulator) razrešuje 3-D polja brez omejevanja veljavnosti Maxwellovih enačb. Omejitev točnosti je v obeh primerih seveda odvisna od velikosti mrežnih oken.

Zaradi naraščajoče računske zahtevnosti izjemno natančnih FEM modelov bodo ti za dodatne analize dinamičnih stanj čedalje pogosteje kombinirani z dodatnimi linearnimi in nelinearnimi modeli [106], ki omogočajo precej hitrejšo in največkrat še vedno dovolj natančne analize.

6 SKLEP

Napredek na področju močnostne elektronike v pogonskih sistemih bo tudi v prihodnje postopen. Tako lahko pričakujemo, da se bodo zahtevnejše in nove tehnologije čedalje pogosteje uporabljale predvsem v aplikacijah, kjer se bodo premikale meje dosegljivega. Za večino aplikacij pa bo predvidoma še vedno najprimernejša izbira klasičen mostič B6 skupaj s trifaznim strojem.

Prav tako je pričakovati postopne spremembe pri načrtovanju pogonov. Čedalje bolj se bodo pri načrtovanju zahtevala poglobljena znanja na vseh področjih (elektromagnetika, termika, mehanika), ki pa jih bo treba združevati in predvsem usklajevati.

Razvoj močnostne elektronike za vodenje električnih strojev se bo nadaljeval predvsem v smeri integracije sklopov močnostne elektronike in električnih strojev, optimizacije razporeditve močnostnih komponent z namenom zmanjševanja parazitnih efektov, uporabe novejših tehnologij in materialov za povečanje izkoristka ter v smeri prilagajanja obstoječih in zasnove novih topologij pretvornikov in strojev za zagotavljanje ustreznosti za uporabo v novih, še zahtevnejših aplikacijah.

LITERATURA

- [1] J. Millán, P. Godignon, X. Perpiñà, A. Pérez-Tomás, J. Rebollo. "A survey of wide bandgap power semiconductor devices", *IEEE transactions on Power Electronics*, 29(5), str. 2155–2163, 2013.
- [2] A. Emadi, S. S. Williamson, A. Khaligh. "Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric, and fuel cell vehicular power systems", *IEEE Transactions on power electronics*, 21(3), str. 567–577, 2006.
- [3] B. K. Bose. "Power electronics and motion control-technology status and recent trends", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 29(5), str. 902–909, 1993.
- [4] B. K. Bose. "Power electronics and motor drives recent progress and perspective", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(2), str. 581–588, 2008.
- [5] T. M. Jahns, V. Blasko. "Recent advances in power electronics technology for industrial and traction machine drives", *Proceedings of the IEEE*, 89(6), str. 963–975, 2001.
- [6] S. S. Williamson, A. K. Rathore, F. Musavi. "Industrial electronics for electric transportation: Current state-of-the-art and future challenges", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(5), str. 3021–3032, 2015.
- [7] R. Abebe, G. Vakil, G. L. Calzo, T. Cox, S. Lambert, M. Johnson, B. Mecrow. "Integrated motor drives: state of the art and future trends", *IET Electric Power Applications*, 10(8), str. 757–771, 2016.
- [8] T. Marčič, G. Štumberger, M. Hadžiselimović, I. Zagradišnik. "Vpliv modulacijske frekvence na izgube elektromotornega pogona, harmonsko popačenje toka in temperaturo asinhronskega motorja", *Elektrotehniški vestnik*, 2(73), str. 125–130, 2006.
- [9] M. Quraan, T. Yeo, P. Tricoli. "Design and control of modular multilevel converters for battery electric vehicles", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(1), str. 507–517, 2015.
- [10] L. Franquelo, J. Rodriguez, J. Leon, S. Kouro, R. Portillo, M. Prats. "The age of multilevel converters arrives", *IEEE Ind. Electron. Mag.*, 2(2), str. 28–39, 2008.
- [11] P. Qashqai, A. Sheikholeslami, H. Vahedi, K. Al-Haddad. "A review on multilevel converter topologies for electric transportation applications" V: *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, str. 1–6, Okt. 2015.
- [12] M. F. M. Elias, N. A. Rahim, H. W. Ping, M. N. Uddin. "Asymmetrical Cascaded Multilevel Inverter Based on Transistor-Clamped H-Bridge Power Cell", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 50(6), str. 4281–4288, Nov. 2014.
- [13] M. Schweizer, T. Friedli, J. W. Kolar. "Comparative Evaluation of Advanced Three-Phase Three-Level Inverter/Converter Topologies Against Two-Level Systems", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 60(12), str. 5515–5527, Dec. 2013.
- [14] S. Bhattacharya, D. Mascarella, G. Joos, J.-M. Cyr, J. Xu. "A Dual Three-Level T-NPC Inverter for High-Power Traction Applications", *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, 4(2), str. 668–678, Jun. 2016.
- [15] M. F. Escalante, J.-C. Vannier, A. Arzande. "Flying capacitor multilevel inverters and DTC motor drive applications", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 49(4), str. 809–815, Aug. 2002.
- [16] A. Nordvall. "Multilevel inverter topology survey", *Magistrska naloga*, Göteborg, Švedska, 2011.
- [17] F. Z. Peng. "A Generalized Multilevel Inverter Topology with Self Voltage Balancing", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 37(2), str. 611–618, 2001.
- [18] S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou, L. G. Franquelo, B. Wu, J. I. Leon. "Recent advances and industrial applications of multilevel converters", *IEEE Transactions on industrial electronics*, 57(8), str. 2553–2580, 2010.
- [19] I. Colak, E. Kabalci, R. Bayindir. "Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes," *Energy Convers. Manag.*, 52(2), str. 1114–1128, 2011.
- [20] K. K. Gupta, A. Ranjan, P. Bhatnagar, L. K. Sahu, S. Jain. "Multilevel inverter topologies with reduced device count: A review", *IEEE transactions on Power Electronics*, 31(1), str. 135–151, 2015.
- [21] M. M. Biswas, S. Podder, M. Z. R. Khan. "Modified H-bridge multilevel inverter for Photovoltaic micro-grid systems", str. 377–380, 2016.
- [22] O. Josefsson. "Investigation of a multilevel inverter for electric vehicle applications", Göteborg: Chalmers Univ. of Technology, 2015.
- [23] A. Bourouina, A. Djahbar, A. Chaker, Z. Boudjema. "High order sliding mode direct torque control of a DFIG supplied by a five-level SVPWM inverter for the wind turbine", *Elektrotehniški Vestnik*, 85(5), str. 263–270, 2018.
- [24] M. Sandhu, T. Thakur. "Multilevel Inverters: Literature Survey–Topologies, Control Techniques & Applications of Renewable Energy Sources-Grid Integration", *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 4(3), str. 644–652, 2014.
- [25] P. Hothongkham, V. Kinnares. "Investigation into Harmonic Losses in a PWM Multilevel cascaded H-Bridge Inverter Fed Induction Motor," V: *IEEE 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, str. 1043–1048, Nov. 2007.

- [26] P. Rasilo, A. Salem, A. Abdallah, F. De Belie, L. Dupré, J. A. Melkebeek. "Effect of multilevel inverter supply on core losses in magnetic materials and electrical machines", *IEEE transactions on Energy Conversion*, 30(2), str. 736–744, 2014.
- [27] M. Schweizer, J. W. Kolar. "Design and implementation of a highly efficient three-level T-type converter for low voltage applications", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(2), str. 899–907, 2013.
- [28] A. Choudhury, P. Pillay, S. S. Williamson. "DC-link voltage balancing for a three-level electric vehicle traction inverter using an innovative switching sequence control scheme", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2(2), str. 296–307, 2014.
- [29] S. Busquets-Monge, R. Maheshwari, J. Nicolas- Apruzzese, E. Lupon, S. Munk-Nielsen, J. Bordonau. "Enhanced DC-link capacitor voltage balancing control of DC–AC multilevel multileg converters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(5), str. 2663–2672, 2015.
- [30] H. Kernstock, B. Plassnegger. "High efficiency soft switched 3-level MOSFET Inverter for an Electric Vehicle PMSM Drive", V: *IEEE Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International*, str. DS1b-9, 2012.
- [31] Z. Wang, J. Chen, M. Cheng, Y. Zheng. "Fault-tolerant control of paralleled-voltage-source-inverter-fed PMSM drives", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(8), str. 4749–4760, 2015.
- [32] R. Bojoi, S. Rubino, A. Tenconi, S. Vaschetto. "Multiphase electrical machines and drives: A viable solution for energy generation and transportation electrification", V: *IEEE International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, str. 632–639, Oct. 2016.
- [33] E. Levi. "Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 55(5), str. 1893–1909, May 2008.
- [34] E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H. A. Toliyat, S. Williamson. "Multiphase induction motor drives – a technology status review", *IET Electr. Power Appl.*, 1(4), str. 489–516, 2007.
- [35] F. Barrero, M. J. Duran. "Recent advances in the design, modeling, and control of multiphase machines—Part I", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(1), str. 449–458, 2015.
- [36] M. J. Duran, F. Barrero. "Recent Advances in the Design, Modeling, and Control of Multiphase Machines - Part II", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 63(1), str. 459–468, 2016.
- [37] N. Schofield, X. Niu, O. Beik. "Multiphase machines for electric vehicle traction", V: *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, str. 1–6, Jun. 2014.
- [38] M. Darijevic, M. Jones, E. Levi. "An open-end winding four-level five-phase drive", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(1), str. 538–549, 2015.
- [39] K. V. Praveen Kumar, T. Vinay Kumar. "Predictive torque control of open-end winding induction motor drive fed with multilevel inversion using two two-level inverters," *IET Electr. Power Appl.*, 12(1), str. 54–62, 2018.
- [40] R. Chandan, A. Hota, S. Jain, V. Agarwal. "An optimized dual inverter configuration for open end winding induction motor drive with Common Mode Voltage elimination", V: *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, str. 1–5, 2016.
- [41] K. Gopakumar, V. T. Ranganathan. "Split-Phase Induction Motor Operation from PWM Voltage Source Inverter," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 29(5), str. 927–932, 1993.
- [42] L. Parsa. "On advantages of multi-phase machines", V: *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, str. 1574–1579, 2005.
- [43] Y. Hu, Z. Q. Zhu, K. Liu. "Current control for dual three-phase permanent magnet synchronous motors accounting for current unbalance and harmonics", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2(2), str. 272–284, 2014.
- [44] J. Huang, M. Kang, J. q Yang, H. b Jiang, D. Liu. "Multiphase machine theory and its applications", V: *International Conference on Electrical Machines and Systems*, str. 1–7, 2008.
- [45] Y. Ren, Z. Q. Zhu. "Reduction of both harmonic current and torque ripple for dual three-phase permanent-magnet synchronous machine using modified switching-table-based direct torque control", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(11), str. 6671–6683, 2015.
- [46] A. R. Muñoz. "Dual Stator Winding Induction Machine Drive," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 36(5), str. 1369–1379, 2000.
- [47] S. Basak, C. Chakraborty. "Dual stator winding induction machine: Problems, progress, and future scope", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(7), str. 4641–4652, 2015.
- [48] H. Xu, H. A. Toliyat, L. J. Petersen. "Five-phase induction motor drives with DSP-based control system", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17(4), str. 524–533, 2002.
- [49] P. Zhao, G. Yang. "Torque density improvement of five-phase PMSM drive for electric vehicles applications", *Journal of Power Electronics*, 11(4), str. 401–407, 2019.
- [50] E. Bounadja, Z. Boudjema, A. Djahbar. "Direct-Power Control of a Grid-connected Five-phase Permanent-Magnet Synchronous Generator Based on a Five-to Three-phase Matrix Converter", *Elektrotehniški Vestnik*, 86(1/2), str. 21–28, 2019.
- [51] L. Parsa, H. A. Toliyat. "Five-phase permanent-magnet motor drives", *IEEE Transactions on Industry applications*, 41(1), str. 30–37, 2005.
- [52] G. R. Catuogno, G. O. Garcia, R. Leidhold. "Fault tolerant control in six-phase PMSM under four open-circuits fault conditions", V: *42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, str. 5754–5759, Oct. 2016.
- [53] T. Ogura. "Recent technical trends and future prospects of IGBTs and power MOSFETs", V: *Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE-ASIA)*, str. 2068–2073, 2014.
- [54] A. Rihari, P. Zajec, M. Nemeč, M. Petkovšek, D. Vončina. "Nacrtovanje, zasnova in izdelava večfaznega razsmernika z MOSFET stikali", V: *Proceedings of the Twenty-seventh International Electrotechnical and Computer Science Conference ERK 2018*, str. 217–220, Sep. 2018.
- [55] H. Abu-Rub, S. Bayhan, S. Moinoddin, M. Malinowski, J. Guzinski. "Medium-voltage drives: Challenges and existing technology", *IEEE Power Electronics Magazine*, 3(2), str. 29–41, 2016.
- [56] J. Liao, R. Eden. "Market Forecasts for Silicon Carbide & Gallium Nitride Power Semiconductors", V: *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Long Beach, CA, str. 1–30, Mar. 2016.
- [57] H. A. Mantooth, M. D. Glover, P. Shepherd. "Wide bandgap technologies and their implications on miniaturizing power electronic systems", *IEEE Journal of emerging and selected topics in Power Electronics*, 2(3), str. 374–385, 2014.
- [58] X. She, A. Q. Huang, O. Lucia, B. Ozpineci. "Review of silicon carbide power devices and their applications", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(10), str. 8193–8205, 2017.
- [59] J. Colmenares, D. Pefitsis, G. Tolstoy, D. Sadik, H. P. Nee, J. Rabkowski. "High-efficiency three-phase inverter with SiC MOSFET power modules for motor-drive applications", V: *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, str. 468–474, Sep. 2014.
- [60] E. Gurpinar, A. Castellazzi. "Single-Phase T-type inverter performance benchmark using Si IGBT's, SiC MOSFET's and GaN HEMT's", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(10), str. 7148–7160, 2016.
- [61] R. Semiconductor. "SiC Power Devices and Modules - Application Note", *Issue June*, str. 1–41, 2013.
- [62] E. A. Jones, F. F. Wang, D. Costinett. "Review of commercial GaN power devices and GaN-based converter design challenges", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 4(3), str. 707–719, 2016.
- [63] GaN Systems. "Design with GaN Enhancement mode HEMT - GN001 Application Guide", Feb. 2018.

- [64] A. Tüysüz, R. Bosshard, J. W. Kolar. "Performance comparison of a GaN GIT and a Si IGBT for high-speed drive applications", V: *International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE ASIA)*, str. 1904–1911, May 2014.
- [65] R. G. Born. "Soft-Switching, Interleaved Inverter for High Density Applications," *PhD Thesis*, Virginia Tech, 2016.
- [66] T. McDonald, E. Persson, A. Bricconic, F. Grawert. "GaN in a Silicon world: competition or coexistence?", V: *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conf.(APEC)*, str. 1–23, 2016.
- [67] M. Su, C. Chen, S. Rajan. "Prospects for the application of GaN power devices in hybrid electric vehicle drive systems", *Semiconductor Science and Technology*, 28(7), 074012, 2013.
- [68] M. März, A. Schletz, B. Eckardt, S. Egelkraut, H. Rauh. "Power electronics system integration for electric and hybrid vehicles", V: *2010 6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*, str. 1–10, Mar. 2010.
- [69] G. Engelmann, M. Kowal, R. W. De Doncker. "A highly integrated drive inverter using directfets and ceramic dc-link capacitors for open-end winding machines in electric vehicles", V: *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, str. 290–296, Mar. 2015.
- [70] W. Lee, S. Li, D. Han, B. Sarlioglu, T. A. Minav, M. Pietola. "Achieving high-performance electrified actuation system with integrated motor drive and wide bandgap power electronics", V: *2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)*, str. P-1, Sep. 2017.
- [71] B. C. Mecrow, A. G. Jack. "Efficiency trends in electric machines and drives", *Energy Policy*, 36(12), str. 4336–4341, 2008.
- [72] STMicroelectronics, "PWD13F60 High-density power driver - high voltage full bridge with integrated gate driver," str. 26, Nov. 2017.
- [73] STMicroelectronics, "STSPIN32F0 Advanced BLDC controller with embedded STM32 MCU," str. 40, Mar. 2017.
- [74] Texas Instruments, "DRV10983 12- to 24-V, Three-Phase, Sensorless BLDC Motor Driver", Feb. 2018
- [75] S. Hanif, P. Zajec. "Low profile inverter stack – simulation of PCB's parasitic components and current density inspection", V: *Proceedings of the Twenty-fifth International Electrotechnical and Computer Science Conference ERK 2016*, A, str. 281–284, Sep. 2016.
- [76] A. Schmidhofer, J. Horvat, T. Gabriel, H. Lanzenberger, D. Prix, M. Bichler. "Highly integrated power electronics for a 48 V hybrid drive application", V: *2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, str. 1–7, Sep. 2013.
- [77] G. Langer, M. Leitgeb, J. Nicolics, M. Unger, H. Hoschopf, F. P. Wenzl. "Advanced thermal management solutions on PCBs for high power applications," *J. Microelectron. Electron. Packag.*, 11(3), str. 104–114, 2014.
- [78] M. B. Yazdi, X. Wu, P. Haaf, K. Neumaier. "A Study of the Thermal and Parasitic optimization of a large current density highly parallelized three-phase reference Board for Motor Drive", V: *PCIM Europe 2016; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management; Proceedings of*, str. 1–8, 2016.
- [79] Y. Ren, X. Yang, F. Zhang, L. Tan, X. Zeng. "Analysis of a low-inductance packaging layout for Full-SiC power module embedding split damping", V: *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, str. 2102–2107, Mar. 2016.
- [80] B. Aberg, R. S. K. Moorthy, L. Yang, W. Yu, I. Husain. "Estimation and minimization of power loop inductance in 135 kW SiC traction inverter", V: *2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, str. 1772–1777, Mar. 2018.
- [81] J. Wang, Y. Li, Y. Han. "Integrated modular motor drive design with GaN power FETs", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(4), str. 3198–3207, 2015.
- [82] K. Hasegawa, K. Koga, H. Mandavia. "Improving design performance with system-level co-design and multi-physics analysis: Thermal and stress-aware design for three dimensional stacked IC package", V: *Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific)*, pp. 1–7, 2016.
- [83] Altium Designer, <https://www.altium.com/>, (28.8.2019).
- [84] Cadence, <https://www.cadence.com/>, (28.8.2019).
- [85] Eagle, <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview>, (28.8.2019).
- [86] PADS, <https://www.pads.com/>, (28.8.2019).
- [87] OrCAD, <https://www.orcad.com/#>, (28.8.2019).
- [88] KiCAD, <http://www.kicad-pcb.org/>, (28.8.2019).
- [89] Ansys, <https://www.ansys.com/>, (28.8.2019).
- [90] COMSOL, <https://www.comsol.com/>, (28.8.2019).
- [91] FEATool, <https://www.featool.com/>, (28.8.2019).
- [92] LTSpice, <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>, (28.8.2019).
- [93] H. Daou, M. Ameziani, D. Lhotellier, F. Costa, M. Petit, E. Labouré. "Dynamic electric model for IGBT power module based on Q3D® and Simplorer®: 3D Layout design, stray inductance estimation, experimental verifications", V: *2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, str. 1–6, Nov. 2016.
- [94] O. S. Kachin, A. V. Kiselev, A. B. Serov. "Research of operation modes of the synchronous electric motor drive system with use of software ANSYS maxwell and simplorer", V: *2014 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, str. 362–364, Jun. 2014.
- [95] B. S. Umesh, K. Sivakumar. "15 phase induction motor drive with 1: 3: 5 speed ratios using pole phase modulation", V: *2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE ASIA)*, str. 1400–1404, May 2014.
- [96] Z. Ferkova. "Comparison of two-phase induction motor modeling in ANSYS Maxwell 2D and 3D program", V: *2014 ELEKTRO*, str. 279–284, May 2014.
- [97] D. Li, M. Marek-Sadowska, S. R. Nassif, "Layout Aware Electromigration Analysis of Power/Ground Networks", V: *Circuit Design for Reliability*, Springer, str. 145–173, 2015.
- [98] A. Karvonen, T. Thiringer. "Co-simulation and harmonic analysis of a hybrid vehicle traction system", V: *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, str. 1–6, Oct. 2015.
- [99] C. Schulte, J. Böcker. "Co-simulation of an electric traction drive", V: *2013 International Electric Machines & Drives Conference*, str. 974–978, May 2013.
- [100] D. Uygun, S. Solmaz. "Design and dynamic study of a 6 kW external rotor permanent magnet Brushless DC motor for electric drivetrains", V: *2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, str. 87–92, May 2015.
- [101] J. Klíma, M. Mach, O. Vitek. "Analysis of high speed squirrel cage induction motors", V: *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, str. 1302–1305, Jun. 2015.
- [102] Matlab/Simulink, <https://www.mathworks.com/>, (28.8.2019).
- [103] A. Rihar, P. Zajec, D. Vončina. "Cosimulation of ansys simplorer and MATLAB/Simulink", V: *2017 19th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)*, str. 313–317, Oct. 2017.
- [104] Altair, <https://www.altair.com/flux/>, (28.8.2019).
- [105] L. Di Leonardo, F. Parasiliti, M. Tursini, M. Villani. "Transient analysis of PM synchronous motor drives by finite element model co-simulation", V: *IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, str. 6834–6840, Nov. 2013.
- [106] K. Drobnič, L. Gašparin, R. Fišer. "Hiter in natančen izračun dinamičnih obratovnih stanj magnetno nasičenega sinhronskega stroja", *Elektrotehniški Vestnik*, 85(5), str. 217–223, 2018.

Andraž Rihar je diplomiral leta 2012 in doktoriral leta 2016 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer je trenutno tudi zaposlen v Laboratoriju za regulacijsko tehniko in močnostno elektroniko. Raziskovalno je aktiven na področju razvoja večfaznih in večnivojskih pretvornikov, dodatno pa se ukvarja tudi z računalniškim modeliranjem malih hidroelektrarn.

Mitja Nemeč je diplomiral leta 2003 in doktoriral leta 2008 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer je tudi zaposlen. Ukvarja se s področjem diganostike, krmiljenja in regulacije močnostne elektronike s poudarkom na električnih pogonih, precizijskih virih in aktivnih močnostnih filtrih.

Henrik Lavrič je diplomiral leta 1997, magistriral leta 2001 in doktoriral leta 2004 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Zdaj je zaposlen v isti ustanovi kot asistent v Laboratoriju za elektromotorske pogone. Področje njegovega raziskovalnega dela so načrtovanje in optimizacija elektromotorskih pogonov, linearni in hibridni ojačevalniki, močnostni pretvorniki in specialni merilni pretvorniki za zahtevna industrijska okolja.

Peter Zajec je diplomiral leta 1994, magistriral leta 1997 in leta 1999 zagovarjal doktorsko disertacijo na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer je zaposlen kot izredni profesor. Težišče njegovega raziskovalnega dela je na področju statičnih pretvornikov električne energije.

Danjel Vončina je diplomiral leta 1989, magistriral leta 1992 in doktoriral leta 1996 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je od leta 2010 redni profesor. Njegovo pedagoško in raziskovalno delo vključuje področja energetske elektronike, regulacijske tehnike, informacijske elektronike in materialov v elektrotehniko.