

DOI: [10.46793/CIGRE37.B4.06](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B4.06)**B4.06****MODELOVANJE MODULARNOG VIŠENIVOVSКОG PRETVARAČA SA REALNIM  
PREKIDAČKIM KOMPONENTAMA****MODELING OF A MODULAR MULTILEVEL CONVERTER WITH NON-IDEAL  
SWITCHING COMPONENTS****Anita Mijajlović, Milovan Majstorović, Bogdan Brković\***

**Kratak sadržaj:** Modularni višenivovski pretvarač (MMC) je inovativna topologija koja ima potencijal da postane široko rasprostranjena u svim segmentima industrije i proizvodnje i prenosa električne energije, naročito na visokom i srednjem naponu. Prenos električne energije proizvedene u vetroparkovima na moru i HVDC sistemi samo su neka od polja primene ovog tipa pretvarača. MMC je relativno dobro ispitan u pogledu dizajna i upravljanja, ali vrlo malo istraživanja je posvećeno proračunu ili merenju gubitaka i stepena iskorišćenja. Ovaj rad je usmeren ka sprovođenju upravo jednog takvog istraživanja, koje može unaprediti razumevanje prednosti MMC-a i pružiti dodatnu motivaciju za njegovu primenu. U okviru rada formiran je model pretvarača koristeći realne prekidačke komponente, što omogućava detaljan proračun gubitaka. Pored stepena iskorišćenja, koji predstavlja jedan od osnovnih kriterijuma za poređenje sa konvencionalnim topologijama, vrednost snage gubitaka značajna je i sa aspekta projektovanja sistema za hlađenje i, shodno tome, složenosti i ukupne mase i dimenzija pretvarača. Iz svega pobrojanog proistekla je težnja da se predloži analitički model za proračun gubitaka baziran na informacijama o prekidačkim komponentama datim od strane proizvođača. Rezultati analitičkog proračuna upoređeni su sa vrednostima koje su prethodno dobijene kao rezultat modelovanja gubitaka u softverskom paketu PLECS, čime je potvrđena tačnost izloženog analitičkog modela. Doprinos rada ogleda se u formiranju modela pomoću kog je moguće proračunati gubitke MMC-a na osnovu podataka dostupnih u katalogu proizvođača, a koji se bez gubitka opštosti može primeniti i u slučaju velikog broja podmodula.

**Ključne reči:** MMC, proračun gubitaka, analitički model, PLECS

**Abstract:** A Modular Multilevel Converter (MMC) is an innovative topology that has the potential to become widely used in all segments of industry, production, and power transmission, particularly at high and medium voltage levels. The transmission of electricity generated in offshore wind farms and HVDC systems are just some of the applications of this type of converter. MMC has been relatively well studied in terms of design and control, but very little research has been dedicated to the calculation or measurement of losses and efficiency. This paper focuses on conducting such a study, which can enhance the understanding

---

\* Anita Mijajlović, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, [ma243020m@student.etf.bg.ac.rs](mailto:ma243020m@student.etf.bg.ac.rs)  
Milovan Majstorović, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, [majstorovic@etf.bg.ac.rs](mailto:majstorovic@etf.bg.ac.rs)  
Bogdan Brković, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, [brkovic@etf.bg.ac.rs](mailto:brkovic@etf.bg.ac.rs)

of MMC advantages and provide further motivation for its application. In the paper, a converter model was formed using real switching components, enabling a detailed loss calculation. In addition to the efficiency, which is one of the key criteria for comparison with conventional topologies, the power loss value is also important from the perspective of designing cooling systems and, consequently, the complexity, total mass, and dimensions of the converter. Based on all the above, the aim was to propose an analytical model for loss calculation based on switching component information provided by the manufacturer. The results of the analytical calculation were compared with values previously obtained through loss modeling in the PLECS software package, confirming the accuracy of the presented analytical model. The contribution of the paper lies in the formation of a model that allows the calculation of MMC losses based on data available in the manufacturer's catalog, which can be applied, without loss of generality, even in the case of a large number of submodules.

**Keywords:** MMC, loss calculation, analytical model, PLECS

## 1 UVOD

Intenzivan razvoj područja u kojima primenu nalaze pretvarači velike snage zahteva odstupanje od standardnih rešenja, čime se otvara prostor za primenu modularnih pretvarača. Modularni pretvarači pripadaju grupi naponski napajanih pretvarača (*Voltage controlled source* - VCS), koji zbog povećane kontrolabilnosti i povoljnijih performansi sa aspekta harmonijskog izobličenja, kao i moguće uštede energije u pogonima koji rade sa promenljivom brzinom, već neko vreme preovlađuju u odnosu na strujno napajane [1]. Prvi izazov na putu ka modularnoj topologiji bio je postizanje željene snage uz održavanje ponašanja pretvarača u zadatim granicama. U prethodnim topologijama, za dobijanje visokog napona koristili bi se transformatori ili bi više uređaja bilo povezano na red, što je povećavalo cenu i zapreminu sistema, dok su se neke od kasnijih pokušaja suočili sa problemom nejednakog naponskog naprezanja poluprovodničkih elemenata [2]. Modularni višenivovski pretvarač (*Modular Multilevel Converter* – MMC) ima veliki potencijal za rešavanje pomenutih problema. MMC čine identični podmoduli kaskadno povezani tako da podjednako dele napon, što omogućava optimalno dimenzionisanje poluprovodničkih komponenata u aplikacijama velike snage, gde najviše dolazi do izražaja njegova isplativost.

MMC predstavlja inovativnu tehnologiju koja kombinuje prednosti kaskadnih pretvarača sa efikasnijim rešenjima. Bez potrebe za izolovanim napajanjem ili skupim i glomaznim transformatorima, MMC pokriva širok opseg napona i snage [3]. Formiranje velikog broja naponskih nivoa obezbeđuje nisko harmonijsko izobličenje napona, ali i otvara mogućnost da se prekidanje u okviru podmodula obavlja na relativno niskim učestanostima, što ujedno doprinosi smanjenju prekidačkih gubitaka.

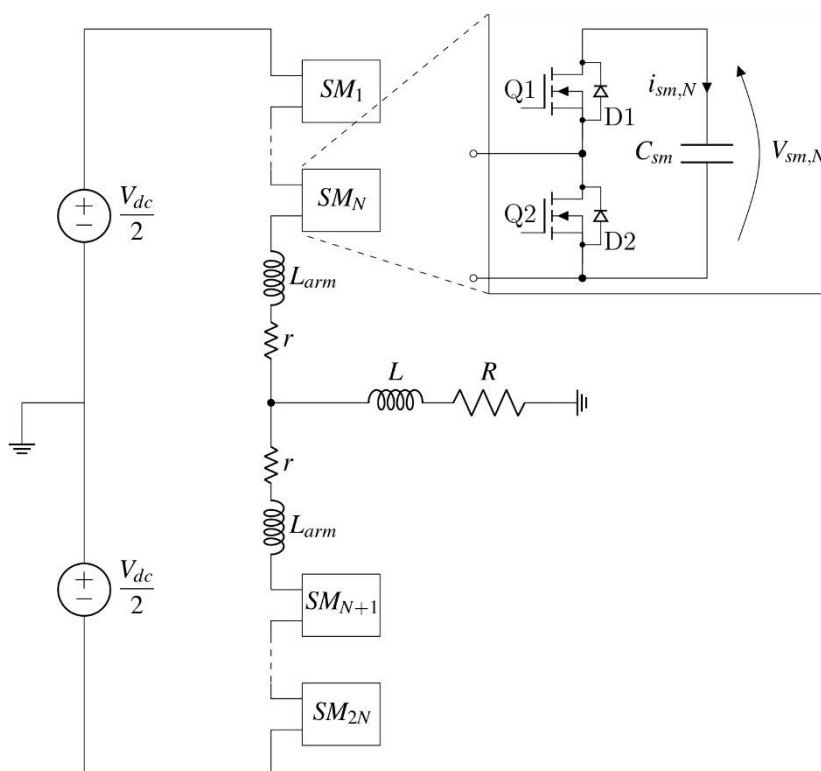
Poznavanje stepena iskorišćenja od velike je važnosti s obzirom na potencijalna polja primene MMC-a, gde bi svako unapređenje ovog parametra moglo biti od velikog značaja. Snaga gubitaka određuje termičke karakteristike pretvarača, pa prema tome uslovljava projektovanje sistema za hlađenje, a samim tim utiče na složenost i ukupnu masu pretvarača. Iako je MMC dosta dobro ispitan u pogledu dizajna i upravljanja, nedostaju istraživanja o gubicima i stepenu iskorišćenja. Cilj ovog rada je da, koliko je to moguće, popuni prazninu koja trenutno postoji.

Rad je organizovan tako da nakon uvodnog sledi poglavlje 2 u kome je pojašnjen princip rada pretvarača, predstavljena modulacija i algoritam upravljanja korišćen za potrebe simulacije rada pretvarača. U poglavlju 3 opisan je način modelovanja gubitaka u softverskom paketu PLECS i izložen je analitički proračun gubitaka. Poglavlje 4 daje prikaz rezultata i međusobno

poređenje kao vid verifikacije analitičkog proračuna. Izvedeni zaključci i pravci budućih istraživanja predstavljeni su u poglavlju 5.

## 2 PRINCIP RADA, MODELOVANJE I OSNOVNE TEHNIKE UPRAVLJANJA

Topologija monofaznog MMC-a prikazana je na Slici 1. Izlazni AC priključak nalazi se na sredini stuba (eng. *leg*) i deli ga na dva dela – gornji i donji polustub (eng. *arm*). Jedan polustub sadrži  $N$  podmodula (SM). Razmatra se polumosna (eng. *Half-bridge*) topologija podmodula, koja je zbog jednostavne konstrukcije i kontrole korišćena topologija u HVDC sistemima i elektromotornim pogonima. Podmodul se sastoji iz dva prekidača, Q1 i Q2. Analiza je sprovedena za dva najčešće korišćena upravljiva prekidačka elementa, MOSFET i IGBT. Diode D1 i D2 označavaju inherentne (*body*) diode u prvom, odnosno, povratne diode u drugom ispitivanom slučaju. Parametri  $L_{arm}$  i  $r$  predstavljaju induktivnost i otpornost polustuba, respektivno, dok je opterećenje otporno-induktivnog karaktera ( $R-L$ ).



Slika 1 Topologija monofaznog MMC-a sa polumosnom konfiguracijom podmodula

### 2.1 MODULACIJA NAPONA

Za analizirani pretvarač važi  $N = 6$ , što znači da je moguće ostvariti sedam naponskih nivoa polustuba:  $0, v_{sm}, 2v_{sm}, 3v_{sm}, 4v_{sm}, 5v_{sm}$  i  $6v_{sm}$ . Ukoliko je gornji prekidač uključen (pod pretpostavkom da su prekidači idealni), izlazni napon podmodula jednak je naponu na kondenzatoru ( $v_{sm}$ ) i kaže se da je podmodul *insertovan*, a ukoliko je uključen donji, izlazni napon podmodula jednak je nuli, odnosno podmodul je premošćen. Napon polustuba predstavlja zbir izlaznih napona podmodula. Dakle, najniži naponski nivo dobija se ukoliko su svi podmoduli premošćeni, a najviši ukoliko su svi insertovani.

Za kontrolu višenivovskih topologija najčešće se upotrebljava impulsno-širinska modulacija (*pulse width modulation* – PWM), gde se signal koji se dovodi na gejtr tranzistora generiše upoređivanjem referentnog (modulišućeg) signala i signala nosioca. U tom slučaju, potrebno je

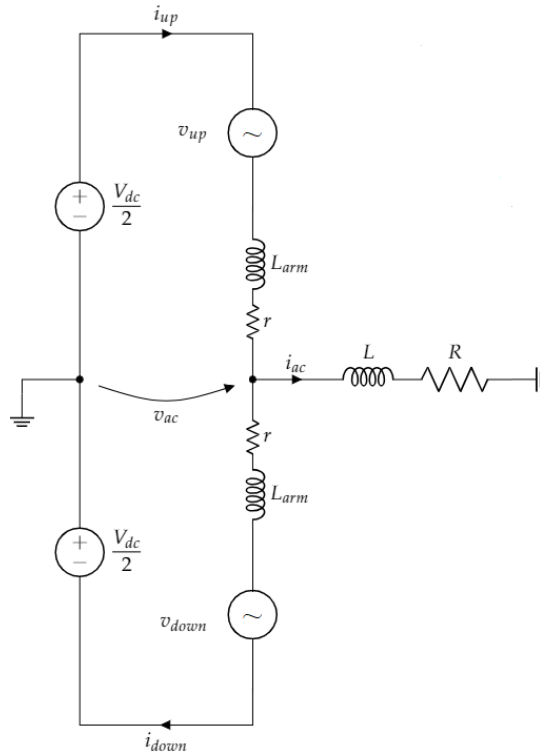
onoliko nosilaca koliko ima podmodula, u ovom slučaju 12. Pritom, raspored nosilaca može biti takav da su međusobno fazno pomereni (*phase-shifted carrier modulation* – PSCPWM) ili da su vertikalno naslagani (*level-shifted carrier modulation* – LSCPWM). Za potrebe simulacija u ovom radu korišćena je PSCPWM [4].

Modulišući signali predstavljeni su jednačinama

$$v_{up} = \frac{V_{dc}}{2} - v_{ac} - L_{arm} \frac{di_{up}}{dt} - ri_{up} \quad (1)$$

$$v_{down} = \frac{V_{dc}}{2} + v_{ac} - L_{arm} \frac{di_{down}}{dt} - ri_{down} , \quad (2)$$

formiranim na osnovu pojednostavljenog kola sa Slike 2, na kojoj je  $N$  podmodula gornjeg i donjeg polustuba zamenjeno kontrolisanim izvorima naizmeničnog napona.



**Slika 2** Pojednostavljena topologija monofaznog MMC-a

Nosioci polustuba, kojih ima ukupno  $N$ , međusobno su fazno pomereni za ugao  $\phi_c$ .

$$\phi_c = \frac{360^\circ}{N} \quad (3)$$

Ugao za koji su pomereni nosioci gornjeg i donjeg polustuba jedni u odnosu na druge (*interleave angle*) je:

$$\phi_{ci} = \frac{360^\circ}{2N} \quad (4)$$

Postojanje faznog pomeraja između nosilaca doprinosi povećanju efektivne prekidačke frekvencije.

## 2.2 KLASIČNA KONTROLA

Metod klasične kontrole zahteva nezavisnu regulaciju izlazne struje, napona na kondenzatorima podmodula i cirkulacione struje [5]. Pritom, kontrola napona na kondenzatorima obuhvata balansiranje ukupne energije sadržane u kondenzatorima stuba i balansiranje energije unutar samog stuba. Primarni nivo kontrole (kontrola izlazne struje i kontrola napona na kondenzatorima podmodula) obezbeđuje pravilan rad, dok se sekundarni nivo (kontrola cirkulacione struje) vezuje za gabarite, pouzdanost i efikasnost pretvarača. Blok dijagram klasične kontrole prikazan je na Slici 3.



Slika 3 Blok dijagram klasične kontrole MMC-a

## 3 MODEL MMC-A

Simulacioni model MMC-a načinjen je u softverskom paketu PLECS predstavljen na Slici 4. Kao što je ranije rečeno, razmatran je pretvarač sa  $N = 6$  podmodula po polustubu. Parametri pretvarača dati su u Tabeli 1.

Tabela 1 Parametri monofaznog MMC-a

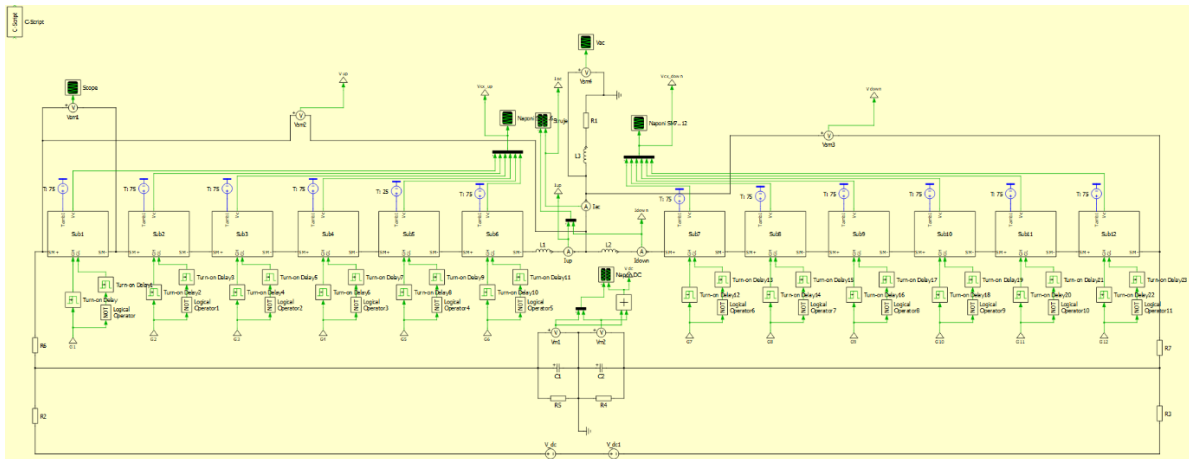
| Naziv parametra          | Oznaka   | Vrednost    |
|--------------------------|----------|-------------|
| Ulazni DC napon          | $V_{dc}$ | 3 kV        |
| Otpornost opterećenja    | $R$      | 80 $\Omega$ |
| Induktivnost opterećenja | $L$      | 0.19 H      |
| Učestanost prekidanja    | $f_{sw}$ | 6 kHz       |
| Osnovna učestanost       | $f$      | 50 Hz       |

Sa aspekta proračuna gubitaka važno je naglasiti da je u okviru simulacije modelovano postojanje mrtvog vremena ( $t_d$ ). U zavisnosti od tipa korišćenog prekidača, MOSFET ili IGBT, body diode, odnosno povratne diode modelovane su zasebno, a ne tako da njihove karakteristike budu integrisane u okviru prekidača.

### 3.1 Modelovanje gubitaka u softverskom paketu PLECS primenom realnih prekidačkih komponenata

Određen broj proizvođača ima dostupne PLECS termičke modele prekidačkih komponenti, pa je u okviru softverskog paketa PLECS moguće izvršiti proračun gubitaka koristeći preuzete modele i već postojeće blokove. U okviru podsistema  $P_{cond}$  i  $P_{sw}$ , prikazanih na Slikama 5. i 6, realizovana su kola za izračunavanje kondukcioni i komutacioni gubitaka stuba, respektivno. Softver vrši proračun na osnovu lookup tabela datih u okviru modela. Kako su podaci u tabelama zavisni od temperature, neophodno je postaviti komponente na izotermičku površ

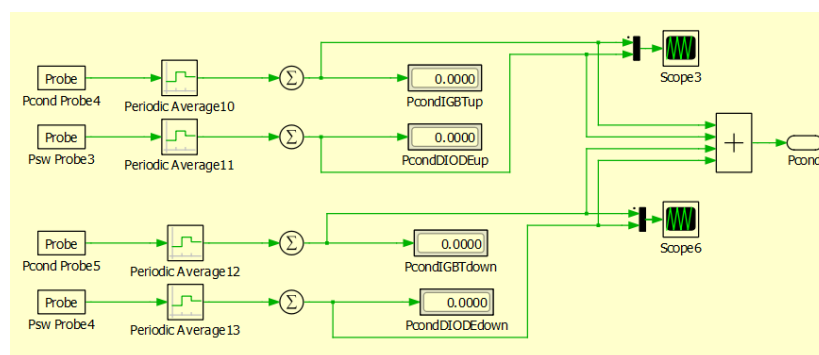
(*Heat Sink*), čije se termičke karakteristike (inicijalna temperatura i termička kapacitivnost) mogu podešavati. Između komponenata koje su u kontaktu sa izotermičkom površi postoji razmena toplote, usled čega dolazi do promene njene temperature. U cilju pojednostavljenja analize, proračun je izvršen za jednu vrednost temperature koja ostaje nepromenjena za vreme trajanja rada pretvarača, tako što se temperatura hladnjaka podesi na željenu vrednost (75 °C) pomoću izvora koji generiše konstantnu temperaturu, a termička kapacitivnost postavlja na nulu. Time se obezbeđuje da temperatura spoja (*junction temperature  $T_j$* ) bude jednaka zadatoj temperaturi.



**Slika 4** Model MMC-a u softverskom paketu PLECS

### 3.1.1 Proračun kondukcioni gubitaka

Kondukcioni gubici računati su odvojeno za oba polustuba, za prekidač i diodu pojedinačno, stoga se koriste četiri sonde, kao što je prikazano na Slici 5. Blok *Periodic Average* koristi se za usrednjavanje ulaznog signala na periodu koja se unutar njega zadaje. Vrednost kondukcioni gubitaka se prolazeći kroz prekidačke periode menja usled promene struje, ali je očekivano da se nakon osnovnog perioda struje oblik zavisnosti kondukcioni gubitaka od vremena ponavlja, zbog čega je u ovom bloku podešeno da se usrednjavanje vrši na 20 ms.

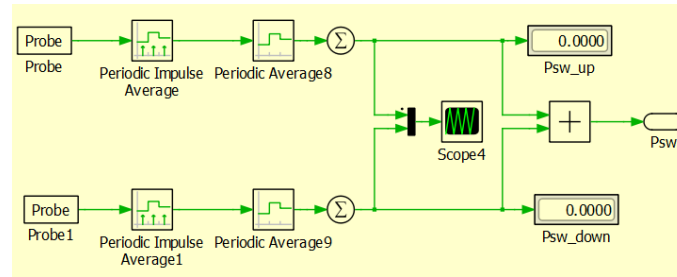


**Slika 5** Podsystem za izračunavanje kondukcioni gubitaka

### 3.1.2 Proračun komutacionih gubitaka

U cilju proračunavanja komutacionih gubitaka može se koristiti blok *Periodic Impulse Average*, sa Slike 6, koji sa zadatim periodom vrši usrednjavanje Dirakovih impulsa, jer se komutacioni gubici u PLECS-u manifestuju kao impulsi. Izlaz bloka se ažurira svaki put po završetku

zadatog perioda. Period usrednjavanja impulsa podešava se tako da bude jednak periodu prekidanja  $1/f_{sw}$ . Zatim se vrši usrednjavanje dobijenih vrednosti sa periodom od 20 ms u okviru bloka *Periodic Average*.



**Slika 6** Podsystem za izračunavanje komutacionih gubitaka

### 3.2 Proračun gubitaka na osnovu podataka proizvođača prekidačkih komponenti

U okviru specifikacija datih od strane proizvođača mogu se pronaći svi podaci potrebni za analitički proračun kondukcionih i komutacionih gubitaka komponenti u različitim uslovima rada (za različite vrednosti napona, struje, temperature itd). U narednim odeljcima objašnjen je način formiranja analitičkih izraza za proračun gubitaka koristeći raspoložive podatke. Proračun se temelji na primeni talasnih oblika struje i napona, koji su dobijeni kao rezultat PLECS simulacije sa idealnim prekidačkim komponentama. U skladu sa prirodom provođenja, analitički izrazi se razlikuju za MOSFET i IGBT, te su odgovarajući proračuni sprovedeni zasebno.

#### 3.2.1 Proračun kondukcionih gubitaka MOSFET prekidača

Primena klasične kontrole obezbeđuje da u gotovo svakom trenutku  $N$  podmodula bude insertovano, a  $N$  premošćeno. Jedina situacija kada ovaj uslov nije ispunjen je u toku mrtvog vremena, jer tada podmodul nije niti insertovan niti premošćen, već provodi *body dioda*. Period mrtvog vremena nastupa po isključenju jednog prekidača i traje sve do uključenja drugog, kako bi se izbegla mogućnost da oba prekidača provode istovremeno.

MOSFET je bidirekcionni prekidač, odnosno ima sposobnost da provodi u oba smera. Nezavisno od smera struje, i kod insertovanih i kod premošćenih podmodula provodi kanal prekidača. Proračun kondukcionih gubitaka usrednjenih na 20 ms izvršen je za gornji polustub i pomnožen koeficijentom 2, kako bi se obuhvatio ceo stub. Za ovaj proračun je od značaja broj prekidačkih perioda sadržanih u jednoj osnovnoj periodi signala, čija vrednost u ovom slučaju iznosi:

$$n = \frac{f_{sw}}{f} = \frac{6000}{50} = 120 \quad (5)$$

Sada se vrednost kondukcionih gubitaka prekidača može izraziti kao:

$$P_{condMOSFET} = 2N \frac{\sum_{i=1}^n R_{dsON}(\langle i_{up} \rangle_{T_{swi}}) \cdot \langle i_{up} \rangle_{T_{swi}}^2}{n} \quad (6)$$

U (6)  $R_{dsON}$  predstavlja otpornost spoja drejn-sors prilikom vođenja prekidača, čija vrednost zavisi od struje drejna i temperature. Međutim, na osnovu ranije uvedenog pojednostavljenja, vrednost gubitaka se računa za jednu određenu vrednost temperature, tako da se za tu vrednost

otpornost spoja drejn-sors menja samo u zavisnosti od struje. Srednja vrednost struje na prekidačkom periodu označena je sa  $\langle i_{up} \rangle_{T_{swi}}$ . Na (6) je potrebno dodati vrednost kondukcionih gubitaka *body* dioda u toku mrtvog vremena, usrednjenu na 20 ms

$$P_{deadtime}^{MOSFET} = f_{sw} \cdot t_d \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (V_{FD} + r_{FD} |\langle i_{up} \rangle_{T_{swi}}|) \cdot |\langle i_{up} \rangle_{T_{swi}}|}{n}, \quad (7)$$

gde su  $V_{FD}$  i  $r_{FD}$  su karakteristike vođenja *body* diode i zavise od temperature i napona gejtsors.

### 3.2.2 Proračun kondukcionih gubitaka u slučaju primene IGBT prekidača

IGBT, za razliku od MOSFET-a, provodi samo u smeru od kolektora ka emiteru, dok struju suprotnog smera provodi povratna dioda. Iz tog razloga, analitička formula za izražavanje vrednosti kondukcionih gubitaka zavisi od smera struje polustuba i zahteva informaciju o broju insertovanih podmodula. Broj insertovanih podmodula gornjeg polustuba u toku prekidačkog perioda izražava se u funkciji srednje vrednosti reference izlaznog AC napona na prekidačkom periodu  $T_{swi}$  kao:

$$\langle n \rangle_{T_{swi}} = \left( \frac{1}{2} - \frac{\langle v_{ac}^{ref} \rangle_{T_{swi}}}{V_{dc}} \right) N. \quad (8)$$

Jednačina za broj insertovanih podmodula donjeg polustuba dobija se kada se znak minus u prethodnom zameni znakom plus.

Za pozitivan smer struje polustuba kod insertovanih podmodula ( $i_{up} > 0$ ) provodi povratna dioda D1, dok kod premošćenih provodi prekidač Q2, po oznakama sa Slike 1. Od  $n$  elemenata niza struje,  $n_p$  odgovara pozitivnim elementima, a  $n_n$  negativnim, tako da važi:

$$n = n_p + n_n \quad (9)$$

Elementi matrice kondukcionih gubitaka koji su posledica pozitivne struje dobijaju se formulom (10):

$$P_{cond}^{pos}(i) = \langle n \rangle_{T_{swi}} (V_{FD} + r_{FD} \langle i_{up} \rangle_{T_{swi}}) \cdot \langle i_{up} \rangle_{T_{swi}} + \\ + (N - \langle n \rangle_{T_{swi}}) (V_{FQ} + r_{FQ} \langle i_{up} \rangle_{T_{swi}}) \cdot \langle i_{up} \rangle_{T_{swi}}, \quad i \in [1, n_p], \quad (10)$$

gde  $V_{FD}$ ,  $r_{FD}$ ,  $V_{FQ}$  i  $r_{FQ}$  predstavljaju karakteristike vođenja povratne diode, odnosno prekidača, i zavise od temperature i napona gejtemiter.

Za negativnu vrednost struje ( $i_{up} < 0$ ) situacija je obrnuta. Kod insertovanih podmodula provodi prekidač Q1, a kod premošćenih dioda D2, stoga jednačina za proračun vrednosti kondukcionih gubitaka ima sledeći oblik:

$$P_{cond}^{neg}(j) = \langle n \rangle_{T_{swj}} (V_{FQ} + r_{FQ} |\langle i_{up} \rangle_j|) \cdot |\langle i_{up} \rangle_{T_{swj}}| + \\ + (N - \langle n \rangle_{T_{swj}}) (V_{FD} + r_{FD} |\langle i_{up} \rangle_{T_{swj}}|) \cdot |\langle i_{up} \rangle_j|, \quad j \in [1, n_n]. \quad (11)$$

Vrednost kondukcionih gubitaka polustuba usrednjena na 20 ms dobija se formiranjem nove matrice, koja sadrži elemente matrica dobijenih pomoću (10) i (11) i izračunavanjem njene srednje vrednosti. Nova matrica sadrži  $n$  elemenata. Dobijenu vrednost neophodno je pomnožiti sa dva i na to dodati gubitke usled vođenja povratnih dioda tokom mrtvog vremena:

$$P_{deadtime}^{IGBT} = f_{sw} \cdot t_d \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (V_{FD} + r_{FD} | \langle i_{up} \rangle_{T_{swi}} |) \cdot | \langle i_{up} \rangle_{T_{swi}} |}{n}. \quad (12)$$

### 3.2.3 Proračun komutacionih gubitaka

Ispostavlja se da se proračun komutacionih gubitaka sprovodi na isti način nezavisno od toga da li je tip prekidača MOSFET ili IGBT, iako se komutacije odvijaju na drugačiji način. U oba slučaja, u toku jednog prekidačkog perioda dva puta dolazi do promene stanja podmodula. Neka je struja  $i_{up}$  pozitivna i neka provodi prekidač Q1, koji je pritom MOSFET. Po završetku vođenja prekidača Q1 nastupa mrtvo vreme, tokom kog provodi *body* dioda D1. Gubici isključenja prekidača Q1 su zanemarljivo mali, jer se prekidač isključuje pri maloj vrednosti napona. Tokom uključenja prekidača Q2 javljaju se gubici oporavka diode (*reverse recovery*) D1 ( $E_{rr}$ ) i gubici uključenja Q2 ( $E_{on}$ ), koji su uvećani za gubitke usled oporavka diode [6]. Pri promeni stanja podmodula iz premošćenog u insertovan, javljaju se gubici isključenja Q2 ( $E_{off}$ ). Gubici uključenja Q1 nisu značajni jer se uključivanje vrši pri malom naponu, pošto mu prethodi vođenje diode D1 tokom mrtvog vremena.

Pokazuje se da se, nezavisno od tipa prekidača i smera struje, vrednost komutacionih gubitaka stuba može izraziti formulom:

$$P_{comm} = (E_{on} + E_{off} + E_{rr}) \cdot f_{sw}, \quad (13)$$

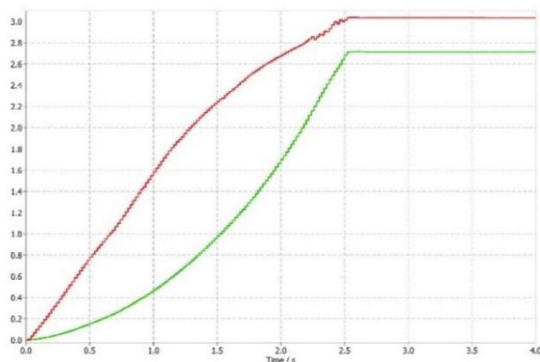
gde su  $E_{on}$ ,  $E_{off}$  i  $E_{rr}$  vrednosti određene pomoću *Double Pulse Test*-a. [7]

## 4 REZULTATI

U softverskom paketu PLECS simuliran je rad pretvarača sa parametrima iz Tabele 1. Amplituda reference izlazne AC struje podešena je na 12 A. Gubici disipirani od strane realnih prekidačkih komponenti u opisanom modularnom višenivovskom pretvaraču određivani su na dva načina: u softverskom paketu PLECS i analitički, koristeći podatke date od strane proizvođača prekidačkih komponenti. Analiza je sprovedena za dva tipa prekidača: silicijum karbidni (SiC) MOSFET i IGBT.

### 4.1 Rezultati proračuna sa MOSFET prekidačima

Najpre su gubici silicijum karbidnih (SiC) MOSFET prekidača određeni pomoću PLECS simulacije. Kao što je i očekivano, nakon ulaska u ustaljeno stanje gubici usrednjeni sa periodom 20 ms imaju konstantnu vrednost. Na Slici 7, crvenom linijom prikazani su komutacioni gubici, a zelenom kondukcioni. Zatim je proračun izvršen na osnovu analitičkih izraza iz poglavlja 3.2. Kao što je ranije navedeno, za analitički proračun iskorišćeni su talasni oblici struje polustuba i reference izlaznog AC napona, koji su rezultat PLECS simulacije sa idealnim prekidačkim elementima. Vrednosti gubitaka prikazane u Tabeli 2 obuhvataju sve prekidačke elemente stuba.



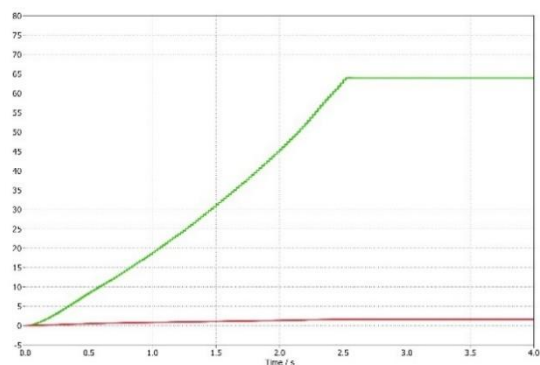
**Slika 7** Gubici u MOSFET prekidačima

**Tabela 2** Rezultati proračuna gubitaka u MOSFET prekidačima

|                        | PLECS | Analitički proračun | Odstupanje [%] |
|------------------------|-------|---------------------|----------------|
| Kondukциони gubici [W] | 2.603 | 2.714               | 4.09           |
| Komutacioni gubici [W] | 3.108 | 3.035               | -2.41          |
| Ukupni gubici [W]      | 5.711 | 5.749               | 0.66           |

## 4.2 Rezultati proračuna sa IGBT prekidačima

U nastojanju da se odredi vrednost gubitaka za IGBT prekidače iskorišćen je isti PLECS model pretvarača, jedino su prekidači zamenjeni. Rezultati simulacije prikazani su na Slici 8, gde su zelenom bojom označeni kondukциони gubici, a crvenom komutacioni.



**Slika 8** Gubici u IGBT prekidačima

U Tabeli 3 date su vrednosti gubitaka poluprovodničkih elemenata stuba. Primećuje se da su kondukциони gubici za red veličine veći nego u slučaju kada su korišćeni MOSFET prekidači. To se dešava jer sada veliki deo vremena provode povratne diode, koje kod razmatranog prekidača imaju znatno lošije karakteristike vođenja u odnosu na kanal.

**Tabela 3** Rezultati proračuna gubitaka u IGBT prekidačima

|                        | PLECS  | Analitički proračun | Odstupanje [%] |
|------------------------|--------|---------------------|----------------|
| Kondukcioni gubici [W] | 63.882 | 60.263              | -6.01          |
| Komutacioni gubici [W] | 1.647  | 1.608               | -2.43          |
| Ukupni gubici [W]      | 65.529 | 61.871              | -5.91          |

## 5 ZAKLJUČAK

Zahtevi savremene industrije i sistema za prenos i distribucije električne energije za visokonaponskim pretvaračkim topologijama doveli su do pojave modularnih višenivovskih pretvarača. Na osnovu do sada pokazanih performansi s pravom se može reći da ovi pretvarači opravdavaju ulaganja u dalje proučavanje i razvoj. U okviru ovog rada sprovedena je analiza snage gubitaka modularnog višenivovskog pretvarača. Predstavljene su dve pojednostavljene metode za određivanje gubitaka u prekidačima modularnih višenivovskih pretvarača kod kojih je primenjena klasična kontrola. U prvom slučaju proračun se vrši u okviru softverskog paketa PLECS, dok se u drugom slučaju proračun bazira na informacijama o prekidačkim komponentama datim od strane proizvođača. Drugi pristup zahteva više angažovanja u cilju prikupljanja potrebnih podataka iz kataloga komponenti. Uprkos dodatnom naporu i vremenu potrebnom za pripremu podataka, primena analitičkog postupka je pogodna jer omogućava proračun gubitaka komponentata za koje termički modeli nisu dostupni. Pogodnost primene analitičkog proračuna ogleda se u tome što je potrebno svega jednom sprovesti proces pribavljanja podataka iz kataloga proizvođača da bi se dobile vrednosti gubitaka za veći broj režima. Kako ova tema nije dovoljno ispitana, pravci potencijalnih budućih istraživanja su brojni. Za početak, predloženi proračun bi mogao da se unapredi tako što će se uvažiti uticaj promene temperature u toku rada pretvarača, što bi doprinelo tačnijem određivanju vrednosti gubitaka. Od interesa bi bilo sprovesti i analizu uticaja kompenzacije mrtvog vremena na vrednost gubitaka. Rezultati jednog takvog istraživanja poslužili bi kao dobar pokazatelj koliki udeo mrtvo vreme ima u ukupnim gubicima modularnih višenivovskih pretvarača. Konačno, bilo bi vrlo značajno izvršiti poređenje snage gubitaka MMC pretvarača i dvonivovskog invertora sa transformatorom, s obzirom na veliku rasprostranjenost ovog rešenja na srednjem naponu.

## 6 LITERATURA

- [1] Kamran Sharifabadi, Lenart Harnefors, Hans-Peter Nee, *Design, Control, and Application of Modular Multilevel Converters for HVDC Transmission Systems*, First Edition (2016), John Wiley & Sons, str. 7-8.
- [2] Sixing Du, Apparo Dekka, Bin Wu, Navid Zargari, *Modular Multilevel Converters Analysis, Control, and Applications*, First edition (2017), John Wiley & Sons, str. xvii
- [3] Sixing Du, Apparo Dekka, Bin Wu, Navid Zargari, *Modular Multilevel Converters Analysis, Control, and Applications*, First edition (2017), John Wiley & Sons, str. 5
- [4] Sixing Du, Apparo Dekka, Bin Wu, Navid Zargari, *Modular Multilevel Converters Analysis, Control, and Applications*, First edition (2017), John Wiley & Sons, str. 52
- [5] Milovan Majstorovic, Marko Rivera, Leposava Ristic, Patrick Wheeler, *Comparative Study of Classical and MPC Control for Single-Phase MMC Based on V-HIL Simulations*, Energies 2021

- [6] Application note, *Calculation of turn-off power losses generated by an ultrafast diode*, 2017, str. 11-15.
- [7] Application note, *Calculation of turn-off power losses generated by an ultrafast diode*, 2017, str. 11.