

**MODELOVANJE I SIMULACIJA MODULARNOG PRETVARAČA SA VIŠE NIVOA (MMC) U REALNOM VREMENU KORISTEĆI PREKIDAČKU FUNKCIJU****MODELING OF MODULAR MULTI-LEVEL CONVERTER (MMC) USING SWITCHING FUNCTION APPROACH SUITABLE FOR REAL-TIME SIMULATIONS.**Simiša Simić, Vladimir Katić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast –ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratka sadržaj** – U radu su objašnjeni neki od osnovnih topologija pretvarača sa više nivoa. Takođe urađen je matematički model ovog pretvarača. Prikazani su načini modelovanja kao i rezultati simulacije modela u realnom vremenu korišćenjem Typhoon HIL uređaja. Prikazana su tri primera primene ovog modela. Prva simulacija pokazuje rad pretvarača priključenog na „jaku“ mrežu. Druga simulacija prikazuje rad pri iznenadnoj promeni potrošnje, a treća pri linearnoj promeni snage potrošača.

**Ključne reči:** Modularni pretvarač sa više nivoa, Simulacija sistema, Modelovanje u realnom vremenu

**Abstract** – In this paper some of the basic topologies of multi-level converters (MMC) are explained, and MMC mathematical model has been developed. Modeling methods as well as the simulation results in real-time using the Typhoon HIL emulator has been shown. Three examples of application of the model are given. The first simulation shows operation of the MMC converter connected to a strong grid. The second simulation shows operation under instantaneous change of power demand, while the third under a linear change of power demand.

**Keywords:** Modular Multi-Level Converter, Simulation, Real-time modelling

**1. UVOD**

Razvojem novih tehnologija i uređaja tokom XX veka u centru pažnje je došla racionalna konverzija električne energije putem pretvarača energetske elektronike. Kada je u pitanju transport energije od velikih elektrana do samih potrošača i to na velike udaljenosti, sve više pažnje se posvećuje visoko-naponskom prenosu jednosmernom strujom (eng. *High-Voltage Direct Current - HVDC*). Osnovne prednosti HVDC prenosa električne energije su:

- Manji gubici,
- Lakša kontrola toka aktivne snage,
- Mogućnost kontrolisanog transfera energije,
- Ograničenje struje kratkog spoja,
- Manji uticaj na okolinu i životnu sredinu,
- Manji troškovi.

Prilikom primene konvencionalnih pretvarača za HVDC javljaju se izvesni problem, kao što su niske vrednosti naprežanja, veliki broj komponenti, mala pouzdanost, složena konstrukcija, nepouzdana pogonska kola itd.

**NAPOMENA:**

**Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio prof. drVladimir Katić.**

Da bi se ovi problem umanjili predložena je primena modularnih pretvarača sa više nivoa (eng. *Modular Multi-level Converters - MMC*). Oni donose određene prednosti kao što su:

- Mogućnost postizanja višeg naponskog nivoa,
- Modularna konstrukcija,
- Duži vek trajanja,
- Povećanje pouzdanosti samog pretvarača,
- Niža cena,
- Jednostavno balansiranje napona,
- Mala vrednost harmonijskog izobličenja naona.

Nedostaci su veliki broj DC kondenzatora i manja pouzdanost zbog većeg broja komponenti.

U ovom radu su razmotreni MMC pretvarači za primenu u HVDC sistemima. Napravljen je matematički i simulacioni model korišćenjem Tajfun HIL emulatora. Prikazana su tri primera primene ovog modela, tj. rešena su tri zadatka. Prvo rešenje, odnosno simulacija pokazuje rad pretvarača priključenog na „jaku“ mrežu. Druga simulacija prikazuje rad pri iznenadnoj promeni potrošnje, a treća pri linearnoj promeni snage potrošača.

**2. MODULARNI PRETVARAČ SA VIŠE NIVOA**

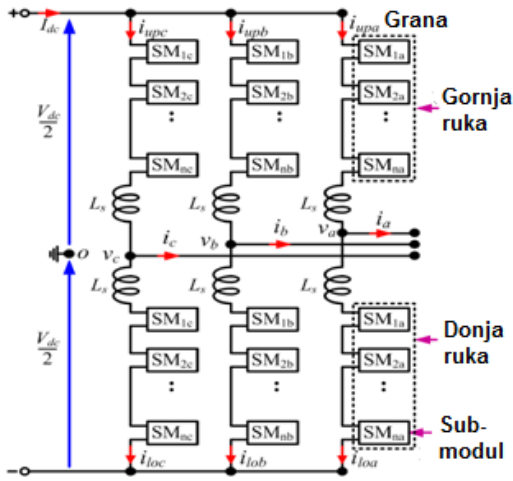
MMC je nova topologija prvi put predstavljena 2002 [1]. Ova topologija je sastavljena od više submodula kao na slici 1 [2]. Sličan koncept prikazan je i u [3]. Svaki submodul se sastoji od polu-mostne konfiguracije sastavljene od dva IGBT-a i kondenzatora (slika 2 [2]). Submoduli su uključeni ili isključeni u zavisnosti od prekidačke funkcije, koja određuje stanje svakog submodula.

U svakom submodulu nalazi se jedan DC kondenzator, koji je napunjen sa naponom:

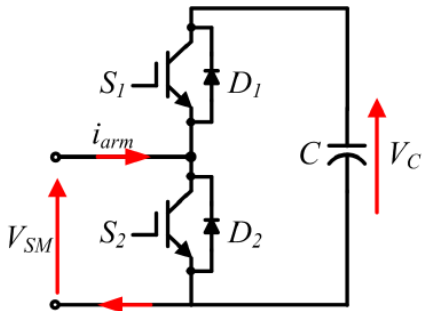
$$V_c = \frac{V_{DC}}{m-1}, \quad (1)$$

gde je  $V_c$  napon na kondenzatoru,  $V_{DC}$  napon na DC strani, a  $m$  – broj nivoa. Svaka ruka može da generiše najviše  $\pm n * V_c = \pm V_{DC}$ , gde su moduli uključeni ili isključeni tako da kreiraju AC izlazni napon.

Za  $m$  - naponskih nivoa potrebno je  $m - 1 = n$  submodula po grani, dok za celu granu invertora je potrebno  $2(m - 1) = 2n$  submodula po grani. U poređenju sa sličnom CMCI modulima, kod MMC modul može da ima samo dva naponska nivoa  $V_c$  ili 0. Ovo objašnjava zašto dve ruke se nalaze unutar jedne grane. Dve induktivnosti, u svakoj ruci grane su tu da bi preuzeli razliku napona prilikom uključanja i isključanja submodula.



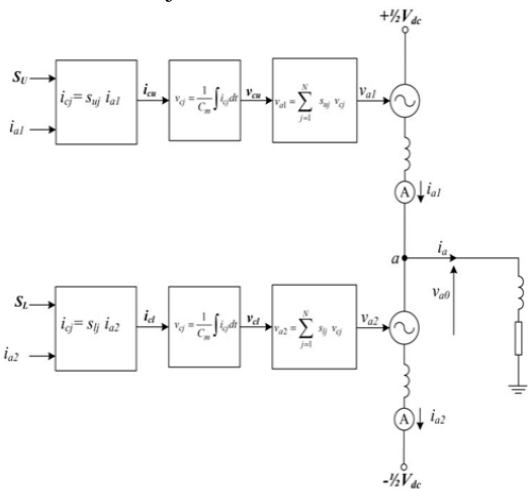
Slika 1. Uprošćen izgled MMC pretvarača [2]



Slika 2. Izgled jednog SM u MMC pretvaraču [2]

### 2.1. Matematički model prekidačke funkcije

Na slici 3 [4] prikazana je reprezentacija jedne grane MMC-a sa N submodula po grani, čija blok šema je data na slici 1, koristeći upravljačku (prekidačku) funkciju. Ovaj prikaz je pogodan za postavljanje matematičkog, odnosno simulacionog modela. Svaki kondenzator je opterećen  $\frac{V_{dc}}{N}$  i ta vrednost mora ostati približno ista tokom cele simulacije.



Slika 3. Reprezentacija jedne noge MMC koristeći prekidačku funkciju [4]

Matematički model izlaznog napona  $v_{a0}$  za fazu  $a$  može se predstaviti preko gornje ili preko donje grane u kolu. Ako se predstavi preko gornje grane dobija se izraz (2), a ako preko donje grane izraz (3):

$$v_{a0} = \frac{1}{2}V_{dc} - \sum_{j=1}^N S_{uj}V_{cj} - R_d i_{a1} - L_d \frac{di_{a1}}{dt} \quad (2)$$

$$v_{a0} = -\frac{1}{2}V_{dc} + \sum_{j=1}^N S_{lj}V_{cj} + R_d i_{a2} + L_d \frac{di_{a2}}{dt} \quad (3)$$

gde su:  $[v_{a0}]$  – izlazni AC napon,  $[V_{dc}]$  – napon DC – sabirnice,  $[S_{uj}]$  – prekidačka funkcija gornje grane j-og kondenzatora,  $[S_{lj}]$  – prekidačka funkcija donje grane j-og kondenzatora,  $[V_{cj}]$  – napon j-og kondenzatora,  $[R_d]$  – otpornost celokupne grane (gornje i donje),  $[L_d]$  – induktivnost celokupne grane (gornje i donje),  $[i_{a1}]$  – struja kroz gornju granu,  $[i_{a2}]$  – struja kroz donju granu. Naponi na svakom od kondenzatora u grani se mogu prikazati koristeći prekidačku funkciju za gornju granu:

$$v_{cj} = \frac{1}{C_m} \int S_{uj} i_{a1}(t) dt \quad (4)$$

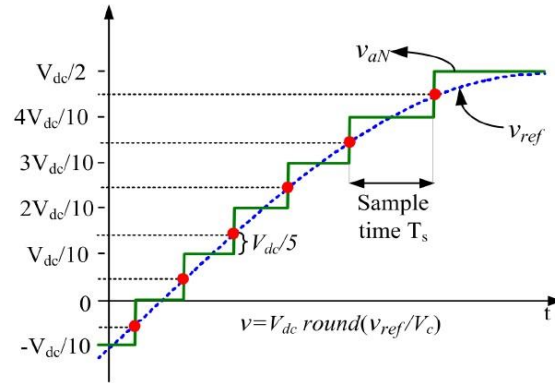
odnosno sledeću prekidačku funkciju za donju granu:

$$v_{cj} = \frac{1}{C_m} \int S_{lj} i_{a2}(t) dt \quad (5)$$

gde su:  $[V_{cj}]$  – napon j-og kondenzatora,  $[i_{a1}]$  – struja kroz gornju granu,  $[i_{a2}]$  – struja kroz donju granu,  $[S_{uj}]$  – prekidačka funkcija gornje grane j-og kondenzatora,  $[S_{lj}]$  – prekidačka funkcija donje grane j-og kondenzatora,  $[C_m]$  – vrednost kondenzatora.

### 2.2. Kontrola i balansiranje MMC-a

Da bi se dobila referenca za odabir naponskog nivoa koristi se metoda najbližeg naponskog nivoa (*eng. Nearest Level Control - NLC*) [2]. Naponi u tri faze se kontrolišu nezavisno. Slika 4 prikazuje način na koji se kreiraju nivoi u poređenju sa referentnim naponom.



Slika 4. NLC metoda [2]

Korišćenjem  $v_{ref}$  signal, preko relacije (6) dobija se naponski nivo  $n_{nl}$ .

$$n_{nl} = \frac{1}{v_c} * \text{round}(v_{ref}) \quad (6)$$

gde je  $[v_c]$ – napon na kondenzatorima dat sa:

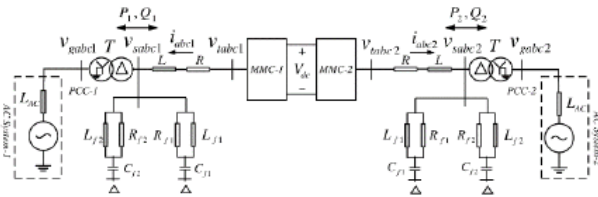
$$v_c = \frac{v_{dc}}{n} \quad (7)$$

gde je  $n$  broj kondenzatora po grani,  $[v_{ref}]$  – referentni signal,  $[n_{nl}]$  – broj naponskog nivoa, odabiraju se oni kondenzatori na kojima je napon najveći. Ovim algoritmom se postiže da kondenzatori “plutaju”

(“plivaju”) oko  $\frac{v_{dc}}{n}$  vrednosti, i to tako da se prazne oni sa najvećim naponom, a pune oni sa najmanjim naponom. Kondenzatori, koji imaju najmanju količinu naelektrisanja na njihovim pločama su oni sa najmanjim naponom, ukoliko je struja u gornjoj ruci manja od nule. Ukoliko je struja u gornjoj grani veća od nule odabiraju se dvadeset submodula. Način nakoji se bira koji će od submodula biti uključen zavisi isključivo od smera struje i od količine elektriciteta na pločama kondenzatora.

### 3. REZULTATI SIMULACIJE

Posmatra se MMC u HVDC sistemu, koji se sastoji od MMC-1 (AC/DC pretvarača) na jednoj (ulaznoj) strani i MMC-2 (DC/AC pretvarača) na drugoj (izlaznoj) strani (slika 5 [5]). Sistem povezuje dve AC mreže (AC system 1 i AC system 2).



Slika 5. Primena MMC u HVDC sistemu [5]

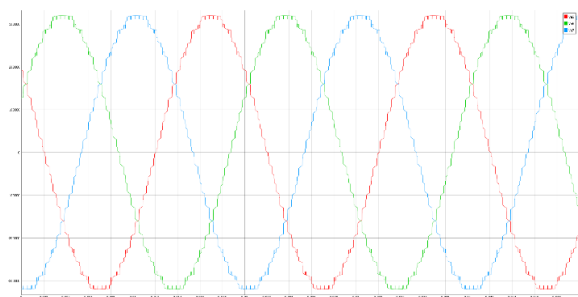
Zadatak 1: Potrebno je modelovati i simulirati rad MMC pretvarača, koji je priključen na javnu mrežu u stabilnim (balansiranim) uslovima.

Zadatak 2: Modelovati i simulirati rad pretvarača u slučaju da se na izlaznoj strani (u AC sistemu 2) naglo priključi i isključi opterećenje od  $S = 250 \text{ MVA}$  sa faktorom snage  $\cos \varphi = 0.85$ . Pratiti promene talasnih oblika struje i napona.

Zadatak 3: Modelovati i simulirati rad pretvarača u slučaju da se na izlaznoj strani (u AC sistemu 2) opterećenje linearno menja aktivna snaga u opsegu od  $P = 500 \text{ MW}$  do  $P = 935 \text{ MW}$ .

#### 3.1 Rezultati simulacije pretvarača na mreži u ustaljenom stanju (Zadatak 1)

Prvi zadatak je da se simulira model povezan na krutu mrežu. Pretvarač u ovom slučaju treba da predstavlja idealni izvor sinusnog napona. Model MMC pretvarača sadrži dvadeset i jedan naponski nivo. Model koristi prekidačku funkciju za opis submodula.



Slika 6. Izgled izlaznog napona iz pretvarača

Na slici 6 se vidi da svaki od napona je kreiran koristeći MMC sa dvadeset i jednim naponskim nivoom. Vrednost ukupnog harmonijskog izobličenja napona (*eng. Total Harmonic Distortion - THD*) iznosi  $THDU = 2,43 \%$ . Amplituda napona iznosi  $\frac{v_{dc}}{2} = 320.000 \text{ [V]}$  sa

frekvencijom od 50 Hz. Vidi se da je izgled napona na izlazu iz pretvarača skoro pa idealan sinus sa jako malom procentualnom vrednosti harmonijskog izobličenja.

#### 3.2 Rezultati simulacije za promenu potrošnje u mreži (Zadatak 2)

U drugom zadatku je potrebno pratiti ponašanje pretvarača za naglo povećanje potrošnje. Model je napravljen tako da upravljanjem prekidača iz stanja 1 u 0 predstavlja prelaz iz stanja manje potrošnje u stanje veće potrošnje. Povećanje potrošnje se postiže tako što se naglo smanjuje otpornost grane, što je adekvatno dodavanju novih potrošača, odnosno naglom povećanju njihove snage. U ovom primeru prate se vrednosti napona i struje po fazama, kao i snage koje se prenose od pretvarača do potrošnje.

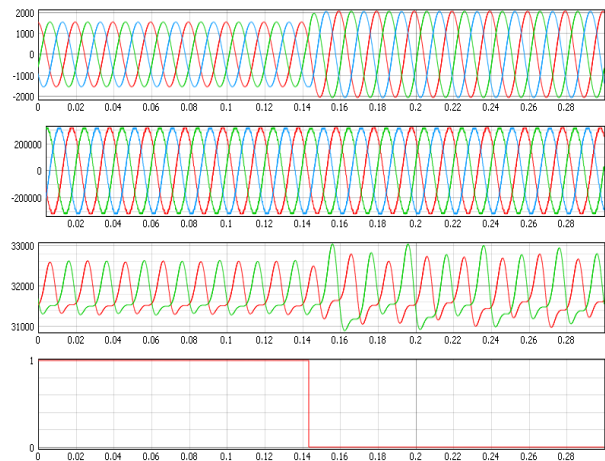
U periodu od početka simulacije do reagovanja prekidača vrednost očekivane struje se računa na sledeći način. Potrošnja iznosi  $S=750 \text{ MVA}$  sa  $\cos \varphi=0.85$  za nominalni napon DC-sabirnice  $V_{dc}=650 \text{ kV}$ . Potrošnja se predstavlja preko konstantne impedance po fazi i struje grane.

$$Z_{pot} = \frac{V_a^2}{3 * S} \quad (8)$$

$$I_a = \frac{V_n}{Z_{pot} + Z_d} \quad (9)$$

$$I_{a_{eff}} = |I_a| \quad (10)$$

gde su:  $V_a$  – efektivna fazna vrednost napona na izlazu iz pretvarača,  $S$  – fazna snaga potrošnje,  $Z_{pot}$  – impedansa potrošača,  $I_a$  – fazna struja potrošača,  $I_{a_{eff}}$  – efektivna fazna vrednost struje potrošnje,  $Z_d$  – impedansa pretvarača. Na slici 6 prikazani su talasni oblici odziva u slučaju naglog povećanja (odnosno smanjivanja otpornosti). Karakteristične vrednosti (očekivane i dobijene) za nivo potrošnje od 750 kVA i povećane od 1000 kVA, date su u tabelama 1 i 2, respektivno.



Slika 7. Prikaz odziva modela u slučaju naglog povećanja potrošnje

Na slici 7 su na prvom grafiku prikazane tri fazne struje, na drugom tri fazna napona, na trećem trenutne vrednosti napona na kondenzatorima, a na četvrtom preklopno stanje prekidača sa 1 na 0 kada dolazi do povećanja

potrošnje. Vidi se da dolazi do povećanje struje pri većoj snazi potrošnje. Takođe se može videti da se pretvarač ponaša stabilno u slučaju naglog povećanja potrošnje. Zbog veće struje potrošnje, javlja se i veći napon na kondenzatorima.

Tabela 1. Očekivane i dobijene vrednosti za potrošnju od 750 kVA

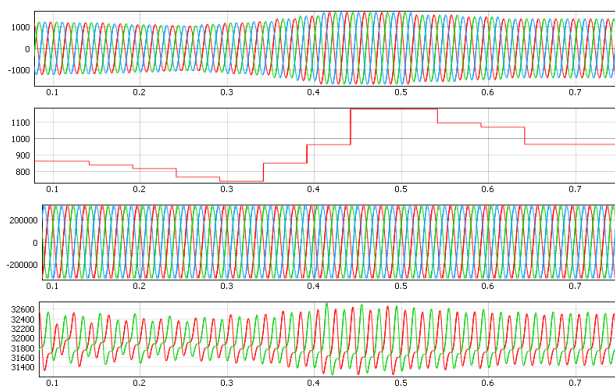
Naziv signala	Očekivane vrednosti	Izmerene vrednosti	Jedinica
$Z_{pot}$	174.33 + $i117.3$	174.33 + $i117.3$	$\Omega$
$P$	637.500	636.692	MW
$Q$	395,087	394.563	MVA <sub>r</sub>
$k$	0.850	0.851	-
$S$	750	749.0	MVA
$I_{a\text{eff}} =  I_a $	1.0769	1104.138	kA

Tabela 2. Očekivane i dobijene vrednosti za potrošnju od 1000 kVA

Naziv signala	Očekivane vrednosti	Izmerene vrednosti	Jedinica
$Z_{pot}$	138.490 + $i76.377$	138.490 + $i76.377$	$\Omega$
$P$	900	897.585	MW
$Q$	435.889	434.986	MVA <sub>r</sub>
$k$	0.9	0.901	-
$S$	1000	997.432	MVA
$I_{a\text{eff}} =  I_a $	1.4307	1.468365	kA

### 3.3 Rezultati simulacije za linearnu promenu potrošnje (Zadatak 3)

Za samu promenu se koristio klizač, koji menja otpornost mreže od 150  $\Omega$  do 300  $\Omega$ . Snaga se kreće u opsegu od 500 MVA do 935 MVA.



Slika 8. Rezultati simulacije za linearnu promenu potrošnje

Na slici 8 se vide rezultati linearne promene snage. Zbog velike rezolucije simulacije linearna promena izgleda kao stepenasta. Na prvom grafiku se vidi kako se vrednosti struje povećavaju pri povećanju potrošnje mreže, na drugom vrednosti efektivne struje u fazi a, na trećem fazne vrednosti napona, i na četvrtom vrednosti napona na kondenzatorima. Tokom ove simulacije vrednosti napona se ne menjaju što dovodi do zaključka da se ovaj model MMC-a ponaša kao idealni naponski izvor. Vrednosti napona na kondenzatorima i dalje se kreću oko očekivane vrednosti

## 4. ZAKLJUČAK

Rad opisuje način modelovanja i simulacije u realnom vremenu modularnog pretvarača sa više nivoa (MMC). Objasnjene su osnove MMC pretvarača, napravljen matematički model i urađene simulacije u realnom vremenu jednog od najčešće korišćenih pretvarača. Pokazane su mogućnosti MMC pretvarača kao jednog od osnovnih topologija za buduće HVDC prenosne sisteme.

Simulacija nam omogućava da sa velikom preciznosti pratimo vrednosti svih važnih signala. Jedna od osnovnih prednosti jeste da se može sa sigurnosti vršiti odabir prekidača i kondenzatora unutar submodula. Uz povećanje broja naponskih nivoa smanjuje se naponsko naprezanje prekidača, čime se dolazi do zaključka da je moguće koristiti prekidače koji mogu da izdrže manje naponsko opterećenje dok je izlazni naponom znatno veći.

Model MMC-a na zavidnom nivou reprezentuje inverter HVDC postrojenja. Očekivani rezultati se podudaraju sa onim očekivanim što dovodi do zaključka da se ovakav model pretvarača može koristiti za verifikaciju HVDC postrojenja.

## 5. LITERATURA

- [1] R. Marquardt, A. Lesnicar, J. Hildinger, "Modulares stromrichterkonzept fur netzkupplungsanwendung bei hohen spannungen," *ETG-Fachtagung, Bad Nauheim, Germany*, 2002.
- [2] P.M. Meshram, V.B. Borghate "A Simplified Nearest level control (NLC) Voltage Balancing Method for Modular Multilevel Converter (MMC)", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol.30, No.1, Jan.2015.
- [3] D. Siemaszko, et al, "Evaluation of control and modulation methods for modular multilevel converters," *Inter. Power Electronics Conf. (IPEC)*, pp.746-753, 21-24 June 2010,
- [4] G.P. Adam, P. Li, I.A. Gowaid, B.W. Williams, "Generalized switching function model of modular multilevel converter", *ICIT, Sevilla*, 2015.
- [5] M. Saeedifard, R. Iravani, "Dynamic Performance of a Modular Multilevel Back-to-Back HVDC System", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 25, No. 4, Oct. 2010

### Kratka biografija:



**Simiša Simić** rođen je u Bijeljini 1994. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine odbranio je 2018.god. kontakt: simicsimisa@gmail.com



**Vladimir Katić** rođen je 1954. godine u Novom Sadu. Diplomirao je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu 1978. god., a magistrirao i doktorirao na Univerzitetu u Beogradu 1981. i 1991. godine, respektivno. Oblast interesovanja su energetska elektronika, kvalitet električne energije, obnovljivi izvori električne energije i električna vozila.