



# TOPOLOGIJE BATERIJSKI NAPAJANIH VUČNIH PRETVARAČA

Rastislav Kragić, Slobodan Vukosavić\*  
“Raskovnik” - Beograd, SCG  
\*Elektrotehnički fakultet – Beograd, SCG

**Sadržaj:** U električnim vozilima sa autonomnim napajanjem poželjno je da nominalni napon baterije bude što niže vrednosti. Nasuprot tome, za napajanje invertora pogonskog asinhronog motora, ekonomičnije je koristiti napon od nekoliko stotina volti. Ovaj rad opisuje rešenje koje zadovoljava oba pomenuta opozitna zahteva upotrebom čopera u sprezi baterije i pogonskog invertora.  
**Ključne reči:** Baterija, Napajanje, Čoper, Asinhroni motor

## 1. UVOD

Savremena rešenja pogona električnih vozila podrazumevaju upotrebu asinhronih motora. Takva koncepcija se pokazala kao ekonomičnija i naprednija u odnosu na, do skoro jedino korišćene, motore jednosmerne struje. Kod vozila koja se napajaju iz mreže (preko trole) napon napajanja pogonskog invertora je reda nekoliko stotina volti, što pogoduje klasičnim konstrukcijama pretvarača za industrijske pogone. Prekidači u IGBT tehnologiji, korišćeni na ovim invertorima, omogućavaju visoku pouzdanost i veoma male gubitke u pogonu.

Kod vozila sa autonomnim napajanjem poželjno je da nominalni napon baterije bude što je moguće niži. Time se dobija duži vek baterije, manji rizik od proboja izolacije, manje samopražnjenje baterije, veći koeficijent energija/kg (akumulirano Wh/kg), manji rizik po korisnika vozila od strujnog udara pri eventualnom kvaru ili nestručnom rukovanju, niži koeficijent cena/kg (cena akumuliranog Wh/kg).

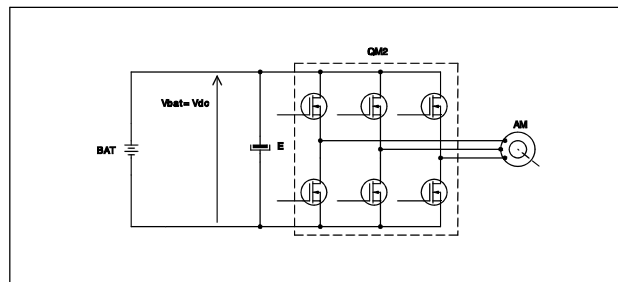
Ovaj rad analizira mogućnost zadovoljenja oba postavljena uslova umetanjem čopera između baterije i invertora za pogon asinhronog motora. Analiza je rađena na modelu nominalne snage 3kW, a svi dobijeni rezultati eksperimentalno provereni na realnom modelu.

## 2. RAČUNSKA ANALIZA

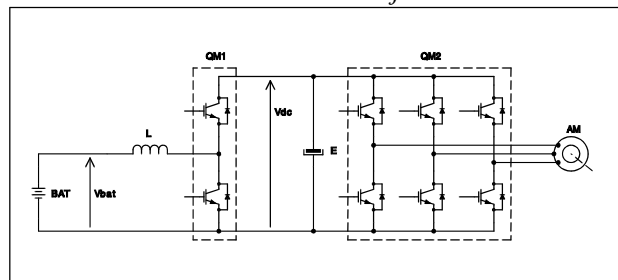
Na sl.1 prikazana je šema energetskog kola invertora napajanog direktno iz baterije.

Sl.2 prikazuje šemu energetskog kola invertora i baterije spregnute čoperom kojim se energija može prenositi i iz baterije ka invertoru ( dizač napona) i obratno, prilikom kočenja motorom (spuštač napona).

U prvom slučaju, gde se inverter napaja direktno iz baterije, kao prekidački elementi koriste se MOSFET tranzistori. U drugom slučaju, i u čoperu i u invertoru primenjeni su prekidači u IGBT tehnologiji.



Sl.1. Šema energetskog kola invertora napajanog direktno iz baterije.



Sl.2. Šema energetskog kola invertora napajanog iz baterije preko čopera.

Tabela 1 prikazuje polazne parametre oba kola primenjene i u numeričkoj analizi i pri eksperimentalnoj verifikaciji. Konkretni polazni parametri uzeti su za potrebe izrade lakog električnog vozila, sa pogonom primenljivim na lakim transportnim (industrijskim) vozilima, kao i na lakim vozilima za individualnu upotrebu (malo gradsko vozilo).

Tabela 1. Polazni parametri kola sa sl.1 i sl.2 primenjeni u numeričkoj analizi i eksperimentalnoj verifikaciji.

parametar	kolo sa sl.1 (bez čopera)	kolo sa sl.2 (sa čoperom)
nom. napon baterije, $V_{bat}$ (V)	48	48
ulazni DC napon invertora, $V_{dc}$ (V)	48	540
nom. napon motora na 50Hz, $V_{mot}$ (V)	34	380
nom. snaga motora, $P_n$ (kW)	3	3
15-sek. snaga motora, $P_{max}$ (kW)	4.5	4.5

$\cos \omega$ motora nom.	0.83	0.83
$\eta_n$ motora nomin.	0.85	0.85
$\eta_{max}$ motora pri max. opterećenju	0.7	0.7
odnos max. i nom. struje mot. $I_{max}/I_n$	2	2
radna frekvencija čopera, $f_1$ (kHz)	-	20
radna frekvencija invertora, $f_2$ (kHz)	5	5

Kolom sa sl.2 se upravlja tako da se vrednost napona napajanja invertora ( $V_{dc}$ ) održava konstantnom, zbog lakše analize. U praksi se primenjuje složena funkcija upravljanja radi postizanja uštede energije pri radu.

U oba slučaja važiće:

-nominalna prividna snaga motora:

$$S_n = \frac{P_n}{\eta_n \cdot \cos \varphi} = \frac{3kW}{0.85 \cdot 0.83} = 4.25kVA \quad (1)$$

-nominalna aktivna snaga invertora (uz zanemarenje gubitaka na invertoru):

$$P_{dc} = \frac{P_n}{\eta_n} = \frac{3kW}{0.85} = 3.5kW \quad (2)$$

-maksimalna (15-sekundna) aktivna snaga invertora (uz zanemarenje gubitaka na invertoru):

$$P_{dc \max} = \frac{P_{\max}}{\eta_{\max}} = \frac{4.5kW}{0.7} = 6.4kW \quad (3)$$

## 2.1. Proračun kola sa invertorom napajanim direktno iz baterije

Za kolo bez čopera (sl.1) važiće:

-nominalna efektivna vrednost fazne struje motora:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot V_{mot}} = \frac{4.25kVA}{\sqrt{3} \cdot 34V} = 72A \quad (4)$$

-najveća (15-sekundna) efektivna vrednost fazne struje motora (na osnovu koeficijenta iz tabele 1):

$$I_{max} = 2 \cdot I_n = 2 \cdot 72A = 144A \quad (5)$$

-najveća trenutna vrednost fazne struje motora (koeficijent pulsacije zbog PWM-a je 1.1):

$$I_{pik} = \sqrt{2} \cdot I_{max} \cdot 1.1 = \sqrt{2} \cdot 144A \cdot 1.1 = 225A \quad (6)$$

Na osnovu gore prikazanih proračuna i analize kataloških podataka nekoliko vodećih proizvođača poluprovodničkih prekidača, za inverter QM2 izabrani su MOSFET tranzistori sledećih karakteristika:

-nazivna struja tranzistora,  $I_{qm2}$ : 125A

-otpor vođenja  $R_{ds}$ : 10m $\Omega$

Nakon složenog proračuna izvedenog pomoću softverskog paketa MATCAD, izračunata je disipacija na prekidačima invertora u nominalnom režimu rada, i ona iznosi:

$$P_{d2nom} = 175W. \quad (7)$$

## 2.2. Proračun kola sa invertorom napajanim preko čopera dizača napona

Za kolo sa čoperom (sl.2) važiće:

-nominalna efektivna vrednost fazne struje motora:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot V_{mot}} = \frac{4.25kVA}{\sqrt{3} \cdot 380V} = 6.5A \quad (8)$$

-najveća (15-sekundna) efektivna vrednost fazne struje motora (na osnovu koeficijenta iz tabele 1):

$$I_{max} = 2 \cdot I_n = 13A \quad (9)$$

-najveća trenutna vrednost fazne struje motora (koeficijent pulsacije zbog PWM-a je 1.1):

$$I_{pik} = \sqrt{2} \cdot I_{max} \cdot 1.1 = \sqrt{2} \cdot 13A \cdot 1.1 = 21A \quad (10)$$

Na osnovu gore prikazanih proračuna i analize kataloških podataka nekoliko vodećih proizvođača poluprovodničkih prekidača, izabrani su IGBT tranzistori sledećih karakteristika za inverter QM2:

-nazivna struja tranzistora,  $I_{qm2}$ : 22A

-napon CE pri struji od 5A,  $V_{ce}$ : 2V

Nakon složenog proračuna u softverskom paketu MATCAD, izračunata je disipacija na prekidačima invertora u nominalnom režimu rada:

$$P_{d2nom} = 42W. \quad (11)$$

Ako se zanemare gubici na mostu Q2, onda je struja napajanja invertora pri najvećem (15-sekundnom) opterećenju:

$$I_{dc \max} = \frac{P_{dc \max}}{V_{dc}} = \frac{6.5kW}{540V} = 12A \quad (12)$$

Radi stabilnog rada uslovljava se da oscilacije napona na elektrolitskom kondenzatoru E budu manje od 5%:

$$\Delta V_{dc} \leq 0.05 \cdot V_{dc} \quad (13)$$

Dalje važi:

$$I_{dc \max} = E \cdot \frac{\Delta V_{dc}}{\Delta t} \quad (14)$$

gde je:

$$\Delta t \cong T_2 = \frac{1}{f_2} \quad (15)$$

Vrednost elektrolita E je:

$$E = \frac{I_{dc \max}}{\Delta V_{dc} \cdot f_2} = \frac{12A}{0.05 \cdot 540V \cdot 5kHz} = 89\mu F \cong 100\mu F \quad (16)$$

Ako se zanemari disipacija energije na čoperu važiće:

$$P_{dc} = I_{dc} \cdot V_{dc} = I_{bat} \cdot V_{bat} \quad (17)$$

$$I_{bat} = \frac{V_{dc}}{V_{bat}} \cdot I_{dc} \quad (18)$$

gde je  $I_{bat}$  struja baterije. Najveća (15-sekundna) srednja vrednost struje baterije iznosi:

$$I_{bat \max} = \frac{V_{dc}}{V_{bat}} \cdot I_{dc \max} = \frac{540V}{48V} \cdot 12A = 135A \quad (19)$$

Ako struja u toku jedne periode PWM-a čopera osciluje sa manje od 20%:

$$\Delta I_{bat} \leq 0.2 \cdot I_{bat} \quad (20)$$

i zbog  $V_{dc} \gg V_{bat}$ , se usvoji kao približno tačno:

$$\Delta t = T_1 = \frac{1}{f_1} \quad (21)$$

vrednost prigušnice se izračunava kao:

$$V_{bat} = L \cdot \frac{\Delta I_{bat}}{\Delta t} \quad (22)$$

$$L = \frac{V_{bat}}{\Delta I_{bat} \cdot f_1} = \frac{48V}{0.2 \cdot 135A \cdot 20kHz} = 89 \mu H \quad (23)$$

Nominalna srednja vrednost struje baterije je:

$$I_{batn} = \frac{P_{dcnom}}{V_{bat}} = \frac{3.5kW}{48V} = 73A \quad (24)$$

uz uslov da su zanemareni gubici na pretvaračima.

Na osnovu izračunatih vrednosti i pregleda kataloške ponude IGBT tranzistora, za čoper QM1 izabran je IGBT prekidač sledećih karakteristika:

-nazivna struja tranzistora,  $I_{qm1}$ : 150A

-napon CE pri struji od 73A,  $V_{ce}$ : 1.8V

Složenim proračunom u programskom paketu MATCAD, izračunata je disipacija na QM1 u nominalnom režimu rada:

$$P_{d1nom} = 135W \quad (25)$$

Na osnovu (11) i (25) izračunava se ukupna disipacija na QM1 i QM2 u nominalnom režimu rada:

$$P_{dnom} = P_{d1nom} + P_{d2nom} = 135W + 42W = 177W. \quad (26)$$

### 3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Na modelu pogona izvedenog u skladu sa prethodnim proračunima, urađena je eksperimentalna verifikacija parametara oba pogona. Rezultati ispitivanja prikazani su u tabeli 2, uporedo sa računski dobijenim vrednostima.

Tabela 2. Rezultati proračuna i ispitivanja.

parametar	kolo sa sl.1 (bez čopera)	kolo sa sl.2 (sa čoperom)
proračunski gubici na QM1 i QM2	175W	177W
eksperimentalno izmereni gubici na QM1 i QM2	150W	155W

Merenja su izvršena pri nominalnom opterećenju rotora na 50Hz statorske učestanosti i pri naponu baterije od 48V.

### 4. ZAKLJUČAK

Nakon izložene računске analize i eksperimentalnih merenja, uočava se da su oba rešenja sa približno istim gubicima, pri istim uslovima rada. Uzimajući u obzir materijalne troškove izrade obe varijante u blagoj je prednosti rešenje sa umetnutim čoperom (sl.2), i to za oko 15%.

Tehnologija proizvodnje IGBT tranzistora sve više napreduje, dok se MOSFET prekidači sve ređe koriste u energetskim kolima za struje veće od 50A. Složenost samog sklopa, u savremenim uslovima proizvodnje, sve manje predstavlja presudan faktor pri izboru rešenja.

Na osnovu svega izloženog, može se zaključiti, da vreme pogona sa dizačem napona tek predstoji.

### 5. LITERATURA

- [1] "Power Electronics", Semikron, 2002.
- [2] "Semiconductors", IXYS, 2002./2003.
- [3] B.K. Bose "Power electronics and AC drives", Prentice Hall 1986.
- [4] "Digital signal processing solution: TMS320C62XX Technical brief", Texas Instruments, January 1997.

### NOVEL CONVERTER TOPOLOGIES OF BATTERY SUPPLIED TRACTION DRIVES

**Abstract:** In electrical vehicles with autonomous supply, it is desirable to have a battery with a low number of series connected cells and, hence, a low rated voltage. Opposite to that, power converter design requirements and the convenience of using low cross-section power cables suggest higher DC-bus voltages. Considerations included in this paper offer a solution for these two opposite requirements by inserting chopper into the battery-driver connection.

**Key Words:** Battery, Supply, Chopper, Induction motor