

# OPTIMIZACIJA NAVORNE KARAKTERISTIKE ELEKTRONSKO KOMUTIRANEGA MOTORJA V HIBRIDNEM POGONU

Boštjan Pevec<sup>1</sup>, Primož Bajec<sup>2</sup>, Janez Nastran<sup>1</sup>, Danijel Vončina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, Slovenija

<sup>2</sup>Hidria Rotomatika d.o.o., Spodnja Idrija, Slovenija

**Ključne besede:** hibridno vozilo, elektronsko komutirani stroj, integrirani zaganjalnik-generator, navorna karakteristika, močnostni stikalni pretvornik, krmiljenje EK motorja

**Izvleček:** V članku je predstavljena problematika zagona hibridnega pogonskega agregata, sestavljenega iz enosmernega elektronsko komutiranega (EK) stroja s trajnimi magneti (NdFeB) in štiriktaktnega motorja z notranjim zgorevanjem (NZ). Pogonski agregat je namenjen pogonu cestnega motocikla. Zahteve po visokih zagonskih navorih motorjev z NZ, omejitve fizičnih dimenzij EK stroja in širok razpon vrtilne hitrosti narekujejo posebno pazljivost pri načrtovanju električnega stroja in v nadaljevanju tudi analizo krmilnih algoritmov EK stroja, predvsem v območju nizkih vrtilnih hitrosti. Obravnavana sta dva pristopa k optimizaciji navorne karakteristike EK stroja in sicer slabljenje glavnega magnetnega pretoka v stroju in nastavljanje kota prevajanja tranzistorjev močnostnega stikalnega pretvornika. Predlagan je nov princip krmiljenja obravnavanega tipa motorja, ki vključuje oba navedena pristopa. Predstavljene so primerjalne meritve časovnih potekov vrtilnih hitrosti zagona motorja z NZ, med predlaganim in običajnim načinom krmiljenja EK motorja v hibridnem pogonskem agregatu. Eksperimentalni rezultati potrjujejo izboljšave, ki jih doprinese predlagano krmiljenje EK stroja v motorskem režimu obratovanja.

## Torque Characteristic Optimization of Brushless DC Motor in the Hybrid Vehicle

**Key words:** hybrid vehicle, brushless DC motor, integrated starter-generator, torque characteristic, switched mode power converter, BLDC motor control

**Abstract:** The paper outlines a case study on a brushless direct current (BLDC) motor for a hybrid propulsion system, with a particular focus on the motor torque characteristic. The discussed hybrid propulsion system is in its origin intended to drive the motorcycle. The subject of our research is the Integrated Starter-Generator (ISG) coupled to the internal combustion (IC) engine. Requirements for a high power density and an acceptable construction of the electrical machine have led to the permanent-magnet BLDC machine with surface mounted rare-earth magnets on the external rotor. Very wide rotational speed range of modern IC engines (up to 15 000 rpm), dictates particular properties and capabilities of the switch-mode power converter (SPC) (Fig. 1) in order to support all operating modes of the ISG and to enable a bi-directional energy flow. High efficiency is of course an imperative. During the design of the converter, our attention was paid also to efficient operation of the ISG at the operation range limits such as providing an efficient and fast starting maneuver of the IC engine and extending the low-speed generator operation range /7/.

Stringent starting torque demands, electrical machine geometry limitations and a wide rotational speed range of the BLDC are reasons for control algorithm analysis in the low speed operation mode to improve electric motor torque characteristic. Two approaches for the optimization of torque characteristic are discussed in the paper: magnetic flux weakening method and a modification of transistor conduction angle.

The flux-weakening method is a well known principle to extend the rotational speed range of the BLDC described by many authors /1-3/, which is achieved with a phase current leading technique. The decreasing of the main magnetic flux is influencing on decreasing of the back EMF in the stator winding which consequently increases the maximal possible stator current. On the other hand with this approach the main magnetic flux is decreased which directly decreases the electromagnetic torque (Fig. 4). That is why the influence of the phase current leading is studied in detail to determine the optimal angle of the phase current at rotational speed range directed by the starting manoeuvre of the IC engine.

To achieve optimal motor regime of the BLDC, modification of the phase current conduction is studied in detail. Two most common principles of BLDC control are a  $2\pi/3$  angle switch-on mode (Fig. 5) and a  $\pi$  angle switch-on mode /1, 2/ (Fig. 6). The first control principle has a higher efficiency, whereas with the second one we can produce a higher maximal electromagnetic torque. Conduction angles of switches between both control principles are studied in detail to determine the optimal angle for switches of the AC/DC converter. Consequently that means that during one electrical turn the transistor conduction angle is between  $2\pi/3$  and  $\pi$  (Fig. 7).

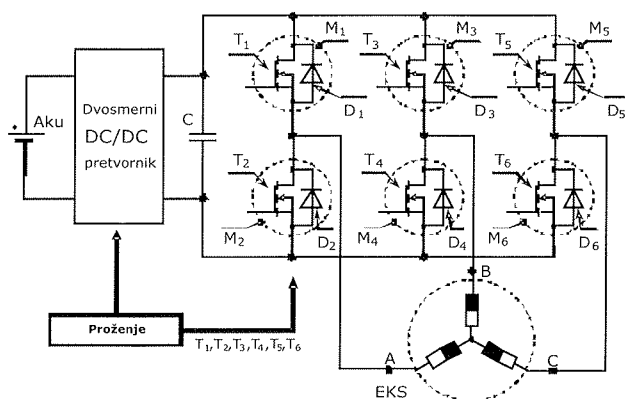
A novel control principle is proposed which includes both of the above discussed approaches and is based on laboratory measurements of the BLDC motor (Fig. 7-10). A torque characteristic comparison between a commonly used control method and the proposed control method is presented (Fig. 11). Experimental results verify improvements on the starting procedure of the hybrid vehicle made by the proposed control algorithm of the BLDC (Fig. 12).

### 1. Uvod

Prve ideje o vozilih na električni pogon segajo daleč v leto 1830. Kot rezultat nenehnega razvoja motorjev z notranjim zgorevanjem (NZ), električnih strojev, akumulatorjev, sklopov močnostne elektronike, mikroprocesorske tehnike in nenazadnje čedalje večje okoljske zavesti ter s tem pove-

zanimi ukrepi za omejevanje onesnaževanja okolja se je kot najprimernejša izkazala združitev več različnih tipov pogonskih strojev v skupni pogonski agregat. Možnih je več kombinacij, med katerimi je tudi kombinacija motorja z NZ in električnega stroja, napajane iz obnovljivega vira električne energije. Ena izmed možnih izvedb hibridnega pogona je tudi integrirani zaganjalnik-generator (IZG) na

skupni mehanski gredi z motorjem z NZ. Pri izbiri električnega stroja za IZG so bile ključne zahteve po obratovalnih karakteristikah stroja v obeh možnih režimih delovanja, in sicer v motorskem in v generatorskem režimu /7/. Po rezultatih študije različnih tipov električnih strojev se je kot najprimernejši izkazal enosmerni elektronsko komutirani (EK) stroj (*angl.* BLDC) s trajnimi magneti iz redkih zemelj na zunanjem rotorju, ki ob pravilni konstrukciji in izbiri materialov nudi sprejemljivo specifično mehansko oz. električno moč. Zaradi velikega razpona vrtilne hitrosti sodobnih motorjev z NZ za cestne motocikle je za načrtovalce velik izziv konstrukcija električnega stroja, ki bi dosegala optimalne obratovalne karakteristike tako v generatorskem kot tudi v motorskem režimu delovanja. Omenjena zahteva in tudi sam princip delovanja EK stroja narekujejo uporabo namenskega močnostnega pretvornika za napajanje električnega stroja, ki mora optimalno delovati v vseh obratovalnih režimih IZG-ja in omogočati dvosmerni pretok električne energije (Slika 1).



Slika 1: Močnostni stikalni pretvornik za vodenje IZG.  
Fig. 1: The switch-mode power converter topology.

Močnostni stikalni pretvornik je sestavljen iz dvosmernega DC/DC pretvornika, ki skrbi za nastavljanje ustreznih napetostnih nivojev v odvisnosti od režima delovanja EK stroja in trifaznega pretvornika, ki omogoča delovanje stroja v motorskem in v generatorskem režimu. Pri zagonu motorja z NZ je zaradi zmanjšanja parazitnega padca napetosti dvosmerni DC/DC pretvornik premoščen.

Med načrtovanjem celotnega hibridnega pogona, predvsem pa močnostnega pretvornika /8/, je bila posvečena posebna pozornost obratovalnim karakteristikam električnega stroja pri mejnih vrednostih vrtilne hitrosti, kot na primer optimizacija procesa zagona motorja z NZ in obratovanje IZG v generatorskem režimu vse do najvišjih vrtilnih hitrosti pogonskega agregata /7/.

Zahteve po visokih zagonških navorih motorjev z NZ (zagon pri  $-10^{\circ}\text{C}$  s polovično napolnjenostjo akumulatorja), omejitve pri geometriji in fizičnih dimenzijah EK stroja ter širok razpon vrtilne hitrosti narekujejo skrbno analizo navorne karakteristike EK stroja. Analiza motorskega obratovanja IZG je potekala predvsem v smeri dviga navorne karakteristike v obsegu vrtilnih hitrosti, ki jih narekuje za-

gon motorja z NZ, kar pripomore k hitrejšemu, zanesljivejšemu in energijsko manj potratnemu zagonu. V članku sta analizirana dva pristopa k doseganju predhodno zastavljenega cilja in sicer slabljenje glavnega magnetnega pretoka in nastavljanje kota prevajanja posameznih tranzistorjev trifaznega pretvornika.

V literaturi je pogosto navedena metoda slabljenja polja za razširitev območja delovanja EK motorja /1-3/, ki je dosežena s tehniko faznega prehitavanja statorskega magnetnega pretoka. Zmanjšanje glavnega magnetnega pretoka vpliva na znižanje inducirane protinapetosti v statorskem navitju, kar posledično povečuje maksimalno možno vrednost statorskega toka. Po drugi strani pa s tem zmanjšujemo delovno komponento magnetnega pretoka, ki vpliva na generiranje elektromagnetnega navora. Zato je v nadaljevanju podrobno raziskan vpliv faznega prehitavanja statorskega magnetnega pretoka na elektromagnetni navor enosmerne EK motorja med zagonom motorja z NZ.

Drugi ukrep za doseganje optimalne navorne karakteristike EK motorja je nastavljanje kota prevajanja tranzistorjev trifaznega pretvornika. V praksi sta najpogosteje uporabljena dva principa proženja tranzistorjev in s tem dva načina krmiljenja enosmerne EK motorja /1, 2/: tako imenovano  $120^{\circ}$  proženje in  $180^{\circ}$  proženje tranzistorjev. Prednost  $120^{\circ}$  proženja tranzistorjev je nekoliko višji izkoristek, prednost  $180^{\circ}$  proženja pa večji maksimalni navor, ki ga motor lahko razvije. Podrobno je raziskano področje, ki zajema kote proženja tranzistorjev med obema načinoma proženja z namenom, ugotoviti optimalen kot prevajanja posameznih tranzistorjev. To pomeni, da bo dejanski kot prevajanja posameznega tranzistorja znotraj električnega obrata pri predlaganem načinu krmiljenja med  $120^{\circ}$  in  $180^{\circ}$ , odvisno od trenutne vrtilne hitrosti EK motorja. Povečanje kota prevajanja posameznega tranzistorja ima za posledico povečanje elektromagnetnega navora in zmanjšanje izkoristka stroja.

## 2. Teoretično ozadje predlaganega pristopa

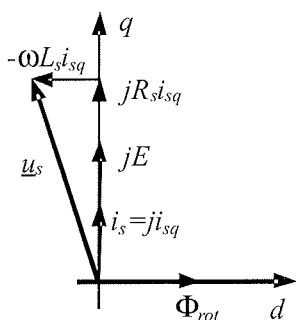
### A) Slabljenje glavnega magnetnega pretoka

Razširitev področja obratovalnih vrtilnih hitrosti električnih strojev z metodo slabljenja glavnega magnetnega pretoka v stroju je pogosto uporabljen ukrep v elektromotorskih pogonih /1-3/. Iz fizikalnih zakonitosti EK motorja izhaja, da je ključnega pomena odvisnost med amplitudo inducirane protinapetosti v statorskem navitju motorja in vrtilno hitrostjo rotorja. Pozitivna napetostna razlika med enosmerno napajalno napetostjo in vsoto induciranih napetosti v dveh faznih navitjih (v primeru, da so navitja zvezana v zvezdo) pogojuje velikost električnega toka v EK motorju in s tem velikost razvitega navora. Z višanjem vrtilne hitrosti se napetostna razlika zmanjšuje, s čimer posledično upada električni tok in tudi navor motorja.

Princip delovanja enosmernega EK motorja v področju slabljenja polja oziroma v področju konstantne moči je zelo podoben vektorsko reguliranemu pogonu z asinhronskim motorjem ali pogonu s tuje vzbujanim enosmernim motorjem. Pri vektorski regulaciji asinhronskega motorja je z  $d$ -komponento statorskega toka (v smeri  $d$ -osi pri modelu motorja v  $dq$  koordinatnem sistemu) neposredno določeno celotno magnetenje (vzbujanje) stroja, medtem ko pri enosmernem tuje vzbujanem motorju in tudi EK motorju z dodatno komponento statorskega toka (vzdolžna komponenta  $i_d$ ) le slabimo izhodiščni magnetni pretok v motorju, ki je lahko rezultat tujega vzbujanja ali magnetnega pretoka zaradi vgrajenih trajnih magnetov.

Za natančno analizo delovanja EK motorja v področju slabljenja polja je treba zapisati model EK motorja v  $dq$  koordinatnem sistemu, vezanem na rotor motorja in sicer tako, da je  $d$  os usmerjena skladno z rezultančnim vektorjem magnetnega pretoka rotorja  $\vec{\Phi}_{rot}$ . Pri EK motorju s sinusno obliko induciranih napetosti in pri sinusnem vzbujanju sta  $i_d$  in  $i_q$  konstantni vrednosti v rotorskem  $dq$  koordinatnem sistemu. Pri EK motorju s trapezno obliko induciranih faznih napetosti je modeliranje motorja in zapis v rotorskem  $dq$  koordinatnem sistemu sorazmerno zahtevno. Trapezno obliko induciranih napetosti v statorskem navitju lahko zapišemo z vsoto prispevkov osnovne in dodatnih višjiharmonskih komponent statorske napetosti /6/. Pri simetrični trapezni obliki inducirane napetosti s srednjo vrednostjo nič nastopajo v Fourierovi vrsti le lihi višji harmoniki. V končni obliki je model EK motorja zapisan v mešanem  $dq$  in  $\alpha\beta$  koordinatnem sistemu /6/.

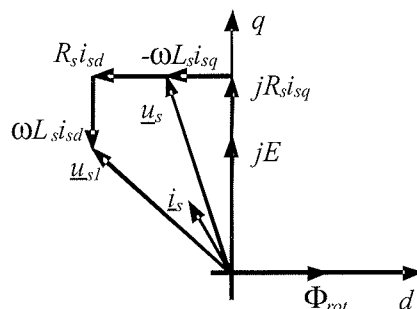
Delovanje EK motorja s trapezno obliko inducirane napetosti v področju slabljenja polja lahko opišemo na osnovi modela motorja s sinusno obliko inducirane napetosti v rotorskem  $dq$  koordinatnem sistemu.  $dq$  koordinatni sistem je definiran tako, da vzdolžna komponenta toka  $i_d$  neposredno vpliva na vzbujanje motorja in sovpada z rezultančno komponento rotorskega magnetnega pretoka  $\vec{\Phi}_{rot}$ , prečna komponenta  $i_q$  pa vpliva na proizveden navor (Slika 2).



Slika 2: Kazalčni diagram EK motorja.  
Fig. 2: Brushless AC motor phasor diagram.

V optimalnem režimu delovanja (maksimalen navor) EK motorja je vzdolžna komponenta toka  $i_d = 0$ . Režim delovanja je možen do vrtilne hitrosti, pri kateri je pri dani napajalni napetosti regulacija zelenega statorskega toka še izve-

dljiva. Obratovanje EK motorja v področju slabljenja glavnega magnetnega polja je razvidno iz slike 3.



Slika 3: Kazalčni diagram EK motorja v področju slabljenja polja.

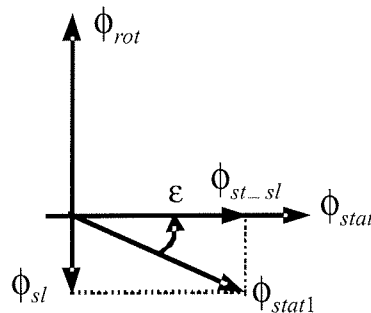
Fig. 3: Phasor diagram of the Brushless AC motor in the flux-weakening area.

Statorski tok EK motorja lahko razstavimo na komponenti v smeri  $d$  in  $q$  osi, pri čemer komponenta toka  $i_q$  vpliva na proizveden elektromagnetni navor, negativna komponenta  $i_d$  pa vpliva na rezultančni magnetni pretok rotorja. Pri tuje vzbujanem enosmernem motorju ima podobno vlogo reakcija indukta. Posledica dodatne komponente toka  $i_d$  in dopustne maksimalne vrednosti statorskega toka, določene z

$$I_s = \sqrt{i_{sq}^2 + i_{sd}^2}, \quad (1)$$

je zmanjšanje komponente toka  $i_q$ , kar se odraža v zmanjšanju navora EK motorja.

Poenostavljen diagram EK motorja s trapezno obliko induciranih napetosti, ki zajema razmere s slik 2 in 3, kaže slika 4. Pri obratovanju električnega motorja brez slabljenja polja je kot med vektorjema magnetnih pretokov rotorja  $\vec{\Phi}_{rot}$  in statorja  $\vec{\Phi}_{stat}$  stroja enak  $90^\circ$  (največji elektromagnetni navor). Pri obratovanju s slabljenjem polja vektor magnetnega pretoka  $\vec{\Phi}_{stat1}$  prehiteva vektor rotorskega pretoka za več kot  $90^\circ$ , kar je na sliki označeno s kotom  $\epsilon$ .



Slika 4: Kazalčni diagram EK motorja s trapezno obliko induciranih napetosti.

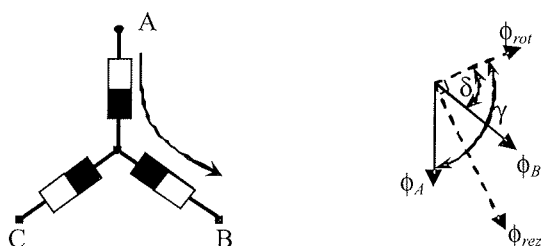
Fig. 4: Phasor diagram of the BLDC motor in the flux-weakening area.

Vektor  $\vec{\Phi}_{stat1}$  razstavimo na komponento  $\vec{\Phi}_{sl}$ , ki slabi magnetni pretok rotorja in na komponento  $\vec{\Phi}_{st-sl}$ , ki ustvarja ele-

ktromagnetni navor. Vidimo, da je slednji nekoliko manjši od  $\bar{\phi}_{stat}$ , kar bi pri nižjih vrtilnih hitrostih pomenilo tudi nižji navor. Pri višjih vrtilnih hitrostih pa zaradi posledično nižje inducirane napetosti teče v motor večji tok.

## B) Nastavljanje kota prevajanja tranzistorjev

Osnovna dva principa krmiljenja enosmernega EK motorja sta  $120^\circ$  prevajanje tranzistorjev in  $180^\circ$  prevajanje tranzistorjev v enem električnem obratu. Pri prvem načinu krmiljenja sočasno prevajata po dva tranzistorja in električni tok teče skozi dve fazni navitji. V prikazanem primeru (Slika 5) teče tok v navitje faze A in iz navitja faze B. V naslednjem koraku (vrtenje v smeri urinega kazalca) bi tekla tok v navitje faze A in iz navitja faze C. Komutacija toka iz enega faznega navitja v drugega se vrši vsakih  $60^\circ$  (električnih) in sicer  $30^\circ$  pred največjo vrednostjo maksimalnega navora. Na tak način dosežemo največji povprečni navor in najmanjšo valovitost navora (angl. Torque Ripple).



Slika 5:  $120^\circ$  prevajanje tranzistorjev.  
Fig. 5:  $2\pi/3$  angle switch-on mode.

EK motor razvija maksimalen navor pri zavrtem rotorju (ni inducirane protinapetosti). Takrat lahko zapišemo skupni tok iz vira kot:

$$I_{vh} = \frac{U}{R_F \cdot 2}, \quad (2)$$

kjer je  $U$  napajalna napetost,  $R_F$  pa je upornost faznega navitja.

Če označimo količnik  $U/R_F = I$ , lahko zapišemo:

$$I_{vh} = \frac{I}{2}, \quad (3)$$

Elektromagnetni navor motorja je zapisan kot:

$$M = k \cdot \bar{\phi}_{rot} \times \bar{I}_{mot}, \quad (4)$$

kjer je  $\phi_{rot}$  magnetni pretok rotorja, v  $k$  pa združimo vse konstrukcijske konstante motorja. Če želimo izračunati elektromagnetni navor, moramo upoštevati vse komponente statorskega toka (slika 5):

$$M = k \cdot \phi_{rot} \cdot (I_A \sin \gamma + I_B \sin \delta + I_C \sin \lambda), \quad (5)$$

kjer je  $\gamma$  kot med vektorjema magnetnega pretoka rotorja in magnetnega pretoka faze A ( $120^\circ$ ),  $\delta$  kot med vektorjema magnetnega pretoka rotorja ter magnetnega pretoka faze B ( $60^\circ$ ) in  $\lambda$  kot med vektorjema magnetnega pretoka rotorja ter magnetnega pretoka faze C.

Tako dobimo največji navor motorja pri  $120^\circ$  prevajanju tranzistorjev:

$$M_{max} = k \cdot \phi_{rot} \cdot \left( \frac{I}{2} \sin 120^\circ + \frac{I}{2} \sin 60^\circ \right) = k \cdot \phi_{rot} \cdot I \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (6)$$

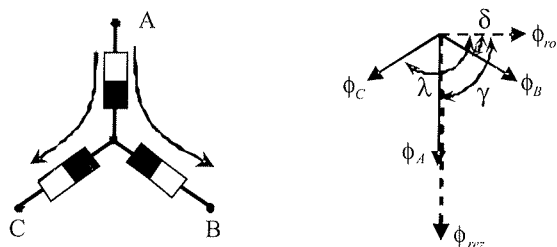
Če zavrtimo rotor za  $30^\circ$  dobimo najnižjo vrednost navora, ki znaša:

$$M_{min} = k \cdot \phi_{rot} \cdot \left( \frac{I}{2} \sin 90^\circ + \frac{I}{2} \sin 30^\circ \right) = k \cdot \phi_{rot} \cdot I \cdot \frac{3}{4}. \quad (7)$$

Razmerje med navorom, ki ga razvija motor in tokom, ki teče iz vira, je pokazatelj energijskega izkoristka motorja; večje kot je razmerje višji je energijski izkoristek. Tako znaša navedeno razmerje pri zavrtem rotorju in pri  $120^\circ$  prevajanju tranzistorjev:

$$\frac{M_{max}}{k \cdot \phi_{rot} \cdot I_{vh}} = \sqrt{3} \quad ; \quad \frac{M_{min}}{k \cdot \phi_{rot} \cdot I_{vh}} = \frac{3}{2}. \quad (8)$$

Pri  $180^\circ$  prevajanju tranzistorjev so hkrati odprti trije tranzistorji, tok pa vedno teče v vseh treh faznih navitjih EK motorja. Na sliki 6 je prikazan primer, ko tok teče v navitje faze A in iz navitij faz B in C. Na desnem delu slike je kazalčni diagram magnetnih pretokov v trenutku, ko motor razvija največji navor.



Slika 6:  $180^\circ$  prevajanje tranzistorjev.  
Fig. 6:  $\pi$  angle switch-on mode.

Podobno kot pri  $120^\circ$  prevajanju stikal moramo pri izračunu največjega in najmanjšega navora pri zavrtem rotorju upoštevati vse tri komponente faznih tokov. Skupni tok iz vira znaša:

$$I_{vh} = \frac{U}{R_F \frac{3}{2}} = \frac{2}{3} \cdot I. \quad (9)$$

Če upoštevamo razmere s slike 6, lahko s pomočjo enačbe 5 zapišemo največji navor motorja pri  $180^\circ$  prevajanju tranzistorjev:

$$M_{max} = k \cdot \phi_{rot} \cdot \left( I \frac{2}{3} \sin 90^\circ + I \frac{1}{3} \sin 30^\circ + I \frac{1}{3} \sin 150^\circ \right) = k \cdot \phi_{rot} \cdot I. \quad (10)$$

Najnižjo vrednost navora dobimo, po istem postopku kot pri  $120^\circ$  prevajanju stikal, če zavrtimo rotor za  $30^\circ$ :

$$M_{min} = k \cdot \phi_{rot} \cdot \left( I \frac{2}{3} \sin 60^\circ + I \frac{1}{3} \sin 0^\circ + I \frac{1}{3} \sin 120^\circ \right) = k \cdot \phi_{rot} \cdot I \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (11)$$

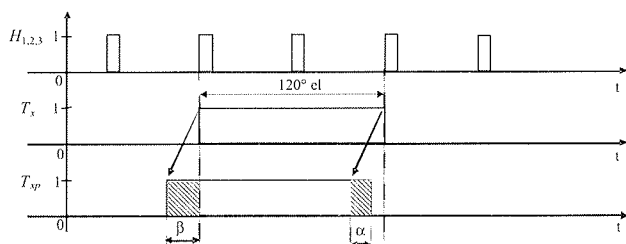
Razmerje med največjim oziroma najmanjšim navorom in tokom iz vira pri zavrtem rotorju in pri  $180^\circ$  kotu prevajanja stikal znaša:

$$\frac{M_{max}}{k \cdot \Phi_{rot} \cdot I_{vh}} = \frac{3}{2} ; \quad \frac{M_{min}}{k \cdot \Phi_{rot} \cdot I_{vh}} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{4} = 1,3. \quad (12)$$

### 3. Predlagan pristop optimizacije navorne karakteristike

V prejšnjem poglavju je podrobno obdelano teoretično ozadje predlaganih pristopov za optimizacijo navorne karakteristike EK motorja, iz katerih je moč predvideti njihovo odvisnost od vrtilne hitrosti motorja in od kota prevajanja tranzistorjev trifaznega pretvornika. Slabljenje glavnega magnetnega pretoka enosmernega EK motorja znižuje inducirano protinapetost in s tem povečuje največji možni tok faznega navitja. Po drugi strani pa se z nižanjem vrednosti glavnega magnetnega pretoka manjša tudi elektromagnetni navor. Zato je treba za optimalno delovanje EK motorja poiskati ustrezen nivo slabljenja glavnega magnetnega pretoka v celotnem poteku zagona motorja z NZ. Slabljenje glavnega magnetnega pretoka pri enosmernem EK motorju dosežemo s tehniko faznega prehitevanja statorskega magnetnega pretoka (Slika 4). To pomeni, da tranzistorje prožimo nekoliko prej od preklopa dajalnika pozicije (običajno trije Hall-ovi senzori), ki je nameščen tako, da motor razvije maksimalen navor 30° po spremembi njegovega logičnega stanja. Iz enačb 6 in 10 je vidna razlika v največjem navoru, ki ga enosmerni EK motor lahko razvija v dveh različnih režimih proženja tranzistorjev močnostnega stikalnega pretvornika. Iz enačb 8 in 12 pa je razvidno znižanje izkoristka motorja pri 180° prevajanju tranzistorjev. Iz navedenih primerjav je moč sklepati, da optimalno delovanje EK motorja dosežemo s kotom prevajanja tranzistorjev trifaznega pretvornika med 120° in 180°. Zato je treba poiskati optimalne delovne točke v celotnem obravnavanem področju vrtilnih hitrosti, kjer je razmerje navor/izkoristek največje.

Optimalno delovanje EK motorja dosežemo z upoštevanjem obeh obravnavanih principov krmiljenja, kar pomeni, da se preklopi tranzistorjev ne vršijo več ob spremembah logičnega stanja Hall-ovih signalov  $H_{1,2,3}$  (Slika 7), ampak so pogojeni s kotom predproženja tranzistorjev trifaznega pretvornika ( $\beta$ ) (slabljenje glavnega magnetnega pretoka) in kotom podaljšanja prevajanja tranzistorjev ( $\alpha$ ) pri določeni vrtilni hitrosti enosmernega EK motorja glede na 120° način krmiljenja.

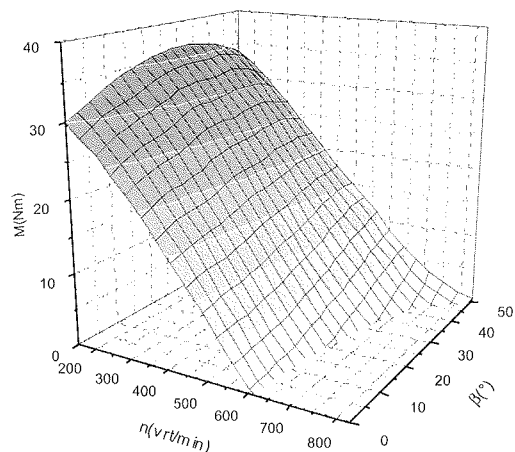


Slika 7: Proženje tranzistorjev v režimu slabljenja polja in podaljšanega prevajanja tranzistorjev.

Fig. 7: The proposed transistor switching.

Zaradi nesinusne oblike inducirane protinapetosti in nelinearnosti enosmernega EK motorja je odvisnost navora enosmernega EK motorja od kota predproženja  $\beta$ , od kota podaljšanja prevajanja tranzistorjev  $\alpha$  in od vrtilne hitrosti motorja analitično zelo zahtevno opisati. Določitev optimalnega poteka navorne karakteristike oziroma največjega navora v celotnem obsegu vrtilnih hitrosti zagona motorja z NZ je obsegala laboratorijske meritve navornih karakteristik. Na osnovi izmerjenih 3D karakteristik sta bila določena kota  $\alpha$  in  $\beta$  za posamezne vrtilne hitrosti EK motorja.

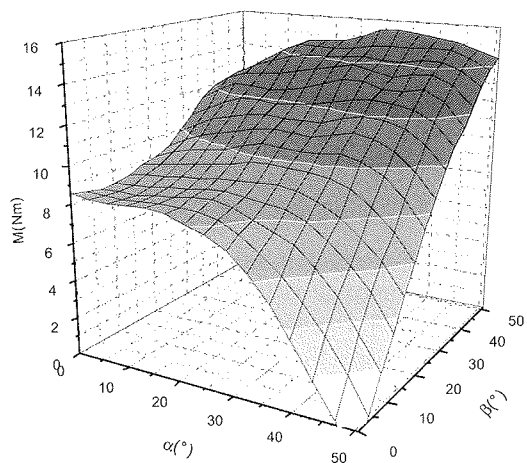
Izmerjeno odvisnost elektromagnetnega navora od kota predproženja  $\beta$  in od vrtilne hitrosti pri kotu  $\alpha = 22,5^\circ$  kaže slika 8.



Slika 8: Odvisnost navora od kota  $\beta$  in od vrtilne hitrosti pri  $\alpha = 22,5^\circ$ .

Fig. 8: Torque dependence on  $\beta$  and rotational speed at  $\alpha = 22,5^\circ$ .

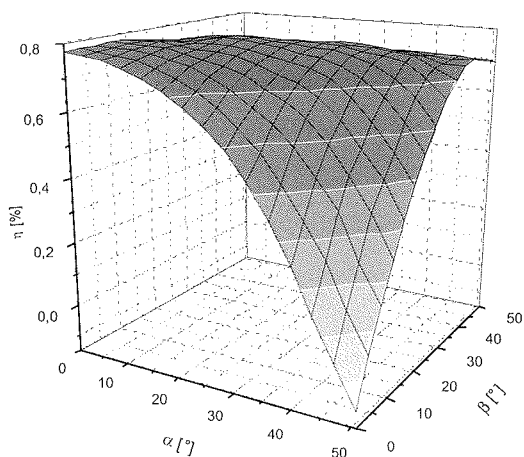
3D karakteristika na sliki 8 je le ena iz niza karakteristik, ki so bile izmerjene pri različnih kotih  $\alpha$ . Iz merilnih rezultatov je vidna pričakovana odvisnost navora EK motorja od vrtilne hitrosti in od kotov  $\alpha$  in  $\beta$ . Slika 9 kaže primer te odvisnosti pri vrtilni hitrosti motorja 500 vrt/min.



Slika 9: Odvisnost navora EK motorja od kota  $\alpha$  in kota  $\beta$  pri vrtilni hitrosti 500 vrt/min.

Fig. 9: Torque dependence on  $\alpha$  and  $\beta$  at rotational speed 500 rpm.

Slika 10 kaže odvisnost energijskega izkoristka motorja od kotov  $\alpha$  in  $\beta$  pri vrtilni hitrosti 500 vrt/min. Iz slike je razvidno zniževanje energijskega izkoristka pri povečevanju kota  $\alpha$ .



Slika 10: Odvisnost izkoristka motorja od kotov  $\alpha$  in  $\beta$  pri vrtilni hitrosti 500 vrt/min.

Fig. 10: Efficiency dependence on  $\alpha$  and  $\beta$  at rotational speed 500 rpm.

Pri strategiji zagona motorja z NZ je treba upoštevati trenutne razmere, ki vplivajo na zagonsko proceduro (temperatura bloka motorja, stanje napolnjenosti baterije, ...). Da dosežemo optimalno delovanje enosmernega EK motorja kot tudi celotnega hibridnega sklopa, je treba upoštevati tako vrednosti največjega navora kot tudi izkoristek pri določeni vrtilni hitrosti. Tako sta predlagani dve zagonski strategiji, ki upoštevata zgoraj navedene zahteve. Pri hladnem zagonu je smiselno upoštevati kote pri katerih enosmerni EK motor ustvarja maksimalen navor, kar pripomore k zanesljivemu zagonu motorja z NZ. V drugem primeru, ko je temperatura bloka motorja z NZ dovolj visoka, pa krmilimo EK motor tako, da dosežemo najvišji energijski izkoristek in s tem pripomoremo k učinkovitejši rabi električne energije baterije hibridnega vozila (Tabela 1).

Tabela 1: Strategija zagona EK motorja pri dveh obratovalnih pogojih motorja z NZ.

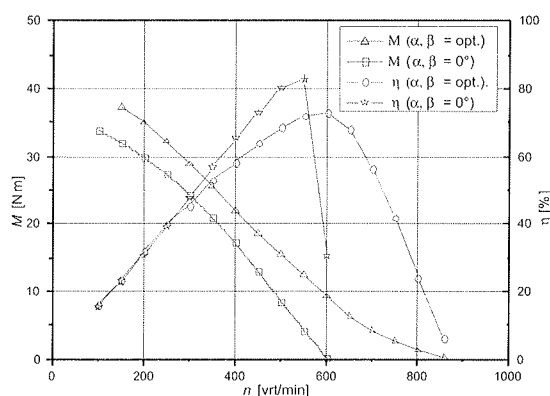
Table 1: Starting manoeuvre strategy at two operating modes of IC engine.

n [vrt/min]	Optimalen navor				Optimalen energijski izkoristek				
	$\alpha$	$\beta$	M [Nm]	$\eta$ [%]	n [vrt/min]	$\alpha$	$\beta$	M [Nm]	$\eta$ [%]
800	30	50,6	1,32	6,40	800	30	50,6	1,32	6,40
750	30	50,6	2,65	24,21	750	30	50,6	2,65	24,21
700	30	50,6	4,28	42,03	700	30	50,6	4,28	42,03
650	30	50,6	6,31	56,33	650	30	37,5	3,18	56,33
600	30	50,6	9,30	67,93	600	7,5	22,5	3,09	75,03
550	30	50,6	12,47	72,72	550	0	7,5	4,31	83,69
500	30	50,6	15,48	71,94	500	7,5	15	10,87	84,27
450	30	50,6	18,52	68,62	450	0	15	12,36	79,32
400	45	50,6	21,95	63,94	400	0	15	16,35	73,80
350	45	45	25,54	58,30	350	0	15	20,32	67,23
300	45	45	28,88	53,15	300	7,5	22,5	25,25	59,37
250	30	37,5	32,22	45,51	250	7,5	22,5	28,87	49,62
200	30	37,5	34,99	40,11	200	7,5	22,5	31,90	41,31
150	30	37,5	37,38	31,82	150	7,5	30	34,70	32,78
100	22,5	30	40,24	23,61	100	22,5	30	40,24	24,42
50	10	15	45,57	16,18	50	10	15	45,57	16,18
0	0	0	62,99	11,28	0	0	0	62,99	11,28

#### 4. Eksperimentalni rezultati

Izsledki teoretičnih raziskav so bili preverjeni na prototipnem hibridnem motociklu v katerem sta na skupni mehanski gredi 1100 cm<sup>3</sup> štiritačni motor z NZ in enosmerni EK stroj v funkciji IZG z nazivnimi parametri  $P_n = 900$  W,  $R_{A,B,C} = 8$  m $\Omega$ ,  $L_{A,B,C} = 50$   $\mu$ H. Vse merilne, regulacijske in krmilne funkcije so bile izvedene z mikrokrmilnikom PIC 18F452.

Slika 11 kaže dvig navorne karakteristike in razširitev obsega vrtilnih hitrosti s predlaganim načinom krmiljenja enosmernega EK motorja ter primerjavo izkoristkov v obeh režimih delovanja glede na običajno 120° krmiljenje EK motorja.



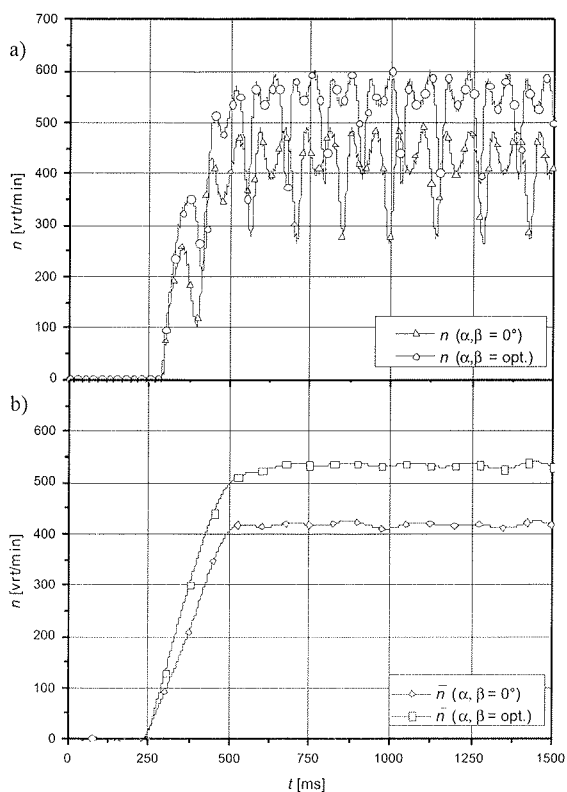
Slika 11: Primerjava navora in izkoristka enosmernega EK motorja pri  $\alpha$  in  $\beta = 0^\circ$  ter optimalnem  $\alpha$  in  $\beta$ .

Fig.11: Comparison of torque and efficiency at  $\alpha, \beta = 0^\circ$  and at optimal  $\alpha$  and  $\beta$ .

Iz slike je razvidno, da EK motor s predlaganim načinom krmiljenja doseže v povprečju za 15% višji navor in dvig zgornje meje motorskega območja delovanja za 30%, kar je v skladu s teoretičnimi izsledki v drugem poglavju. Pri nižjih vrtilnih hitrostih rotorja je izkoristek motorja pri predlaganem načinu krmiljenja primerljiv z izkoristkom pri 120° krmiljenju, tako zaradi krajšega kota podaljšanja prevajanja tranzistorjev kot tudi zaradi manjšega vpliva slabljenja magnetnega polja. Z višanjem vrtilne hitrosti povečujemo komponento toka, ki slabi glavni magnetni pretok v motorju in hkrati prilagajamo kot prevajanja tranzistorjev, kar posledično povečuje elektromagnetni navor obenem pa niža izkoristek EK motorja.

Ustreznost predlaganega pristopa krmiljenja enosmernega EK motorja je bila ovrednotena na podlagi primerjave časovnega poteka vrtilne hitrosti zagona motorja z NZ z običajnim (120°) krmiljenjem in krmiljenjem po predlagani strategiji (Slika 12).

Valovitost vrtilne hitrosti (Slika 12a) je posledica navorne karakteristike motorja z NZ (štiritačni motor). Doprinos predlaganega pristopa je bolje razviden iz primerjav povprečnih vrednosti vrtilne hitrosti (Slika 12b), kjer je očitna razlika v hitrosti naraščanja vrtilne hitrosti (pospeška) in tudi razlika v doseženi končni vrtilni hitrosti hibridnega agregata.



Slika 12: Primerjava časovnih potekov vrtilnih hitrosti zagona motorja z NZ.

Fig.12: IC engine starting maneuver comparison.

Med izvajanjem optimalnega zagonnega postopka se na podlagi izmerjene vrtilne hitrosti rotorja določata kota  $\alpha$  in  $\beta$ . Do vrtilne hitrosti 50 vrt/min sta oba kota enaka nič, saj je zaradi visoke dinamike spreminjanja vrtilne hitrosti gnane gredi hibridnega agregata in zaradi enostavnega načina detektiranja pozicije rotorja EK motorja težko pravilno aplicirati strategijo kotno premaknjenih prožilnih pulzov za posamezne tranzistorje močnostnega pretvornika. Visoka dinamika vrtilne hitrosti izvira iz visokih trenutnih vrednosti navora motorja z NZ, kot posledica kompresijskih in ekspanzijskih ciklov. Nad 50 vrt/min sta kota nastavljena v skladu s predlagano strategijo.

## 5. Zaključek

V članku je opisana problematika motorskega obratovanja enosmernega EK stroja kot izvršilnega člana integriranega zaganjalnik-generatorja v hibridnem motociklu. Obravnavana sta dva ukrepa za izboljšanje navorne karakteristike in sicer slabljenje glavnega magnetnega pretoka ter nastavljanje kota prevajanja tranzistorjev, ki sta se v praksi izkazala kot izjemno učinkovita. Največji navor, ki ga obravnavani stroj lahko razvije, se je v povprečju zvišal za 15%, povečal se je tudi razpon vrtilnih hitrosti delovanja stroja v motorskem režimu s 600 vrt/min na 860 vrt/min. Posledično se je izboljšala dinamika zagona motorja z notranjim zgorevanjem, kar je verificirano z meritvami na hibridnem vozilu. Slabost predlaganega pristopa je nižji izkoristek, ki je posledica slabljenja glavnega magnetnega pretoka in

daljšega kota prevajanja toka skozi posamezna fazna navitja. Predlagan pristop krmiljenja enosmernega EK motorja je moč uporabiti v aplikacijah, ki zahtevajo obratovanje z maksimalnim navorom, izkoristkom ali pa s kombinacijo obeh v celotnem območju vrtilnih hitrosti.

## Literatura

- /1/ B. K. Bose, Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice - Hall, New Jersey, 2002.
- /2/ T. M. Jahns, Torque Production in Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives with Rectangular Current Excitation, *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. 1A-20, No. 4, str. 803-813, julij/avgust, 1984.
- /3/ S. D. Sudhoff, K. A. Corzine, H. J. Hegner, A Flux-Weakening Strategy for Current-Regulated Surface-Mounted Permanent-Magnet Machine Drives, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 10, No. 3, str. 431-437, september 1995.
- /4/ P. Bajec, Analiza in sinteza integriranega zaganjalnika, generatorja in ojačevalnika navora v hibridnem pogonu, Doktorska disertacija, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2005.
- /5/ P. Uršič, Močnostni pretvornik za vodenje integriranega zaganjalnika in generatorja v hibridnem pogonu, Magistrsko delo, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2003.
- /6/ P. L. Chapman, S. D. Sudhoff, C. A. Whitcomb, Multiple Reference Frame Analysis of Non-Sinusoidal Brushless DC Drive, *IEEE Transactions on Energy conversion*, Vol. 14, No. 3, str. 440-446, september 1999.
- /7/ P. Bajec, B. Pevec, D. Vončina, D. Miljavec, J. Nastran, Extending the Low-Speed Operation Range of PM Generator in Automotive Applications Using Novel AC-DC Converter Control, *IEEE Transactions on Industrial Electronic*, Vol. 52, No. 2, str. 436-443, april 2005.
- /8/ H. Lavrič, D. Vončina, P. Zajec, F. Pavlovčič, J. Nastran, A Precision Hybrid Amplifier for Voltage Calibration Systems, *Inf. MIDEM*, vol. 34, No. 1, 2004, pp. 37 - 42

Boštjan Pevec, univ. dipl. inž. el.  
 prof. dr. Janez Nastran, univ. dipl. inž. el.  
 izr. prof. dr. Danijel Vončina, univ. dipl. inž. el.

Laboratorij za močnostno  
 elektroniko in regulacijsko tehniko  
 Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko  
 Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija  
 e-mail: bostjan.pevec@fe.uni-lj.si, janez.nastran@fe.uni-lj.si, voncina@fe.uni-lj.si  
 tel: +386 1 47 68 466, fax: +386 1 47 68 487

dr. Primož Bajec, univ. dipl. inž. el.  
 Hidria Rotomatika d.o.o.  
 Spodnja Kanomlja 23, 5281 Spodnja Idrija, Slovenija  
 e-mail: primoz.bajec@aet.si  
 tel: +386 1 47 68 466