

Referenčni vir sinusnega toka

Marijan Španer

Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

Univerza v Mariboru,

Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija

marijan.spaner@uni-mb.si

Power source of reference sinusoidal current

Abstract

Paper describes building of the equipment for measuring of the power losses in the stator cores of the asynchronous motors. Computer controlled generator for sinusoidal magnetization current of the stator stack is described in details. Magnetization current is generated from transistor converter with pulse-width modulation. Current control is realized with cascade control loop with addition of feedforward part and ensures good static and dynamic properties of the current source in the large span-width of the frequencies and amplitudes. High repeatability of the measurements and insensitivity to the deviations of the net voltage is also guaranteed.

1. Uvod

Karakteristike motorjev so v veliki meri odvisne od lastnosti vgrajenih magnetnih materialov, predvsem od magnetne pločevine. Magnetne lastnosti pločevine se merijo na standardnem vzorcu z Epstein-ovim ali "single sheet" testerjem. Med lastnostmi pločevine in lastnostmi že sestavljenega statorskega jedra pa lahko pride do bistvenih razlik, ki so posledica tehnologije obdelave materiala. V proizvodnji se kontrola kakovosti magnetnih materialov izvaja dvakrat, to je kot vhodna kontrola lastnosti materiala in po koncu obdelave še kot kontrola lastnosti izdelka.

Izdelavo statorskih jeder za izmenične motorje sestavlja nekaj tehnoloških faz. Pločevina se po odvijanju s kolutov v

stiskalnicah razsekava v željene oblike lamel za posamezne tipe statorjev. Sestavljanje lamel in fiksiranje v jedro poteka po enem izmed običajnih postopkov, kot so varjenje, spenjanje, prosto zlaganje ali uporaba zagozd. Že sestavljeni paketi se termično obdelajo, s čimer se popravijo magnetne lastnosti materiala in izboljša površinska izolacija lamel. Med tehnološkimi postopki je možno, da pride do napak, ki spremenijo kvaliteto elektromagnetnih lastnosti jedra. Zaradi dotrajanosti orodij za izsekavanje nastanejo poškodbe na robovih lamel, posledica česar je prevodnost med posameznimi lamelami. Podoben negativen učinek povzročijo ostanki olja za mazanje pri izsekavanju, ki se kasneje ob žarjenju spremenijo v električno prevoden ogljik. Preverjanje kakovosti izdelkov se izvaja tako, da se pri določenem delu vseh izdelkov opravi kontrola elektromagnetnih lastnosti jedra, ki morajo ustrezati določenemu tolerančnemu območju.

2. Izgube v jedru

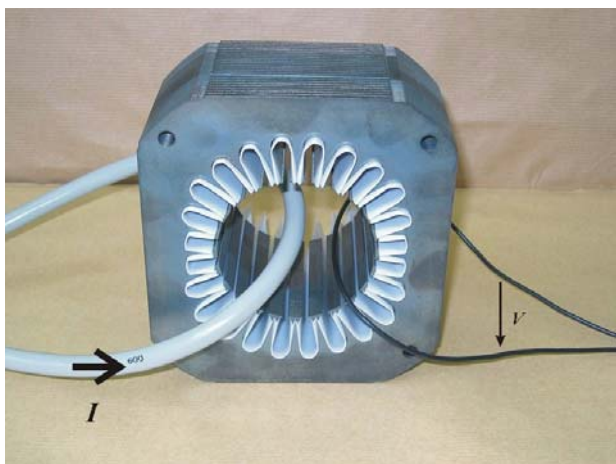
Izgube v magnetnem jedru se odražajo kot segrevanje jedra. Povzročata jih dva fizikalna pojava, zato jih ločimo na histerezne in vrtilne izgube.

Histerezne izgube predstavljajo količino vložene energije, potrebne za spremembo magnetne polaritete jeklene pločevine ob spremembi izmeničnega toka v navitju. Vrednost vložene energije za eno periodo je premosorazmerna površini, ki jo opiše magnetilna krivulja v B-H diagramu (histerezna krivulja). Odvisna je tudi od amplitude gostote magnetnega pretoka. Obliko karakteristike določata tip in količina uporabljenih dodatkov v jekleni pločevini.

Vrtinčni tokovi tečejo zaradi inducirane napetosti, ki se pojavi kot sprememba magnetnega polja v električno prevodnem materialu. Da bi bilo segrevanje čim manjše, je jedro lamelirano in električno izolirano, kar zmanjša inducirane napetosti v posameznih lamelah. Poškodba izolacije in neželjeni stiki med lamelami povečujejo izgube in povzročajo segrevanje jedra na teh mestih.

3. Merilna metoda za meritev izgub v jedru

Za merjenje izgub v jedru sta običajna dve testni metodi. Prva je metoda segregacijskih izgub, opisana v standardu IEEE, standard 112. Daje dobre rezultate, vendar je za izvedbo potreben kompleten sestavljen motor. Druga metoda, imenovana test toroidnega transformatorja ali zančni test, je zelo primerna za testiranje v fazi proizvodnje (slika 1).



Slika 1: merjenje izgub v jedru

Izgube so podane kot razlika med dovedeno in izhodno močjo stroja:

$$P_W = P_{In} - P_{Out} \quad (1)$$

Celotne izgube so vsota izgub v jedru in izgub v navitju (2).

$$P_{Fe} = P_W - P_{Cu} \quad (2)$$

V primeru testiranja le magnetnega jedra brez navitja, je izhodna moč enaka nič. To

pomeni, da vsa dovedena moč za magnetenje jedra predstavlja izgube v jedru. Princip meritve po metodi zančnega testa za osnovo uporablja Faraday-ev zakon:

$$v = -n \left(\frac{d\phi}{dt} \right), \quad (3)$$

kjer je v inducirana napetost, n število ovojev in ϕ magnetni pretok skozi navitje. Magnetni pretok je produkt gostote magnetnega pretoka in površine, oziroma preseka jedra:

$$\phi = B \cdot A. \quad (4)$$

Enačbo za magnetni pretok vstavimo v Faraday-evo enačbo in dobimo:

$$v = n \left(\frac{d(B \cdot A)}{dt} \right). \quad (5)$$

V praksi ima pri zančnem testu vzbujalno navitje le en ovoj. Dovajana moč, ki istočasno predstavlja tudi izgube v jedru, je določena z:

$$P_{Fe} = v \cdot I_1, \quad (6)$$

kjer je v inducirana napetost in I_1 vrednost magnetilnega toka. Če se napetost meri na vzbujalnem navitju, je potrebno upoštevati padec napetosti na ohmski upornosti navitja, oziroma ovoja. Upornost kontaktnega mesta, kjer je sklenjen ovoj, je težko določljiva in tudi temperaturno odvisna vrednost. Zato je bolje inducirano napetost meriti na ločenem merilnem ovoju (slika 1).

4. Zahteve

Glavni problem pri meritvi je zagotoviti ustrezno vzbujalno napetost ali tok. Pogoj naročnika je bil, da je magnetilni tok sinusne oblike in z nastavljivo frekvenco. Tem pogojem komercialne testirne naprave, ki se napajajo neposredno z omrežne napetosti, ne ustrezajo. Ob popačeni omrežni napetosti z vsebnostjo višjih harmonskih komponent se ne more zagotoviti niti potrebna ponovljivost meritev. To je bilo tudi razlog za gradnjo sinusnega tokovnega generatorja nastavljive amplitude in frekvence. S

pomočjo spremenljive frekvence magnetenja je možno tudi ločiti delež histereznih in vrtničnih v skupnih izgubah jedra.

Zahteve, katere mora naprava izpolnjevati, so naslednje:

- harmonična (sinusna) oblika izhodnega toka,
- amplituda toka nastavljiva v območju od 0 do $150A_{RMS}$,
- frekvenca toka nastavljiva v območje od 30 do 100Hz.

5. Delovanje naprave

Vzorci statorskih jeder, za katere se bo uporabljala tokovni vir, imajo maso do 2kg. Za magnetenje takšnih jeder je potrebna pri mejnih pogojih (toku $150A_{RMS}$ in frekvenci 100Hz) generatorska napetost okrog $3V_{RMS}$. Na osnovi teh vrednosti določena izhodna moč naprave je 500W, oziroma 1000VA trenutne moči. Velikostni razred moči omogoča dve možnosti izvedbe močnostnega dela: uporabo linearnega ojačevalnika ali preklopne vezje. Prednosti in slabosti obeh:

Linearni ojačevalnik:

- dobre dinamične lastnosti (+),
- natančnost, linearnost (+),

- dober frekvenčni obseg (+),
- relativno enostavno vezje (+),
- slab izkoristek (-),
- višja cena pri velikih močeh (-).

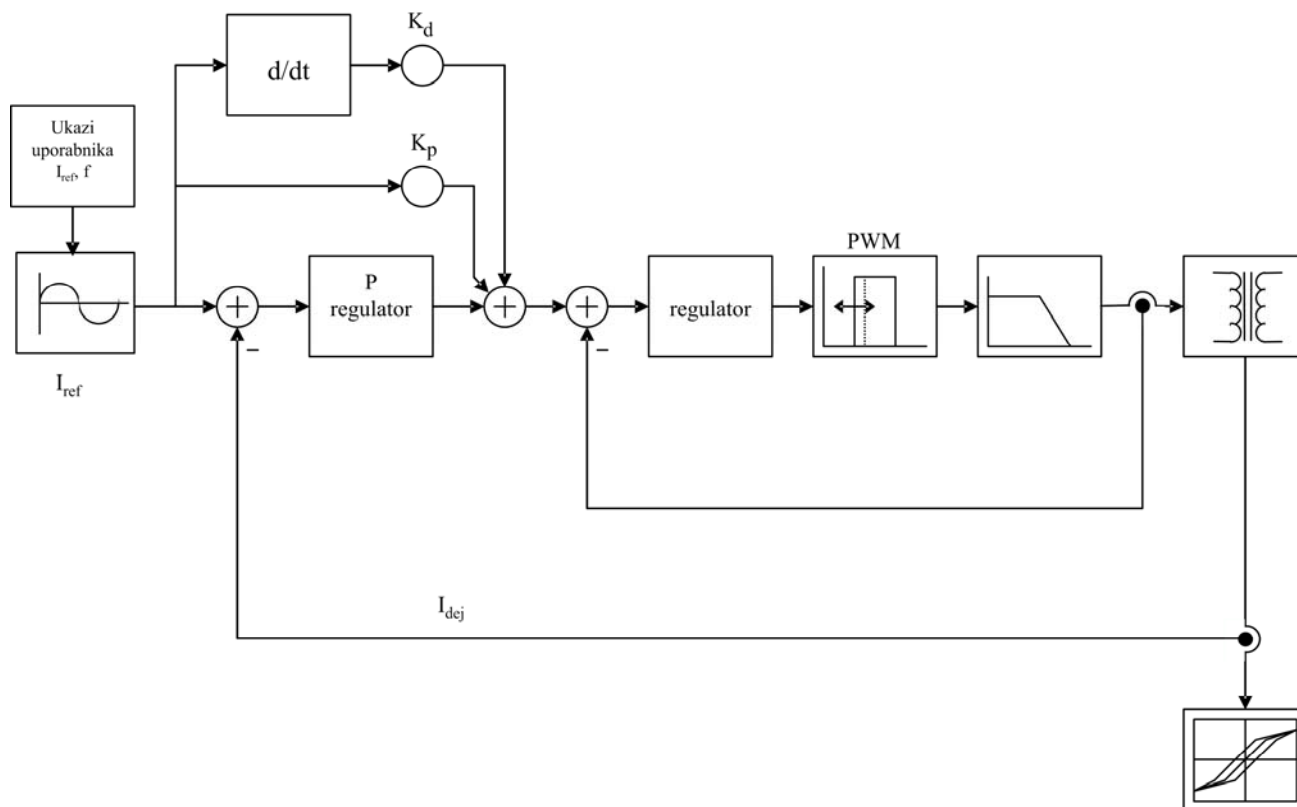
Preklopno vezje:

- dober izkoristek (+),
- nižja cena pri večjih močeh (+),
- kompleksno vezje, uporaba PWM (-),
- slabše dinamične lastnosti (-),
- možnost sevanja RF motenj (-).

Obe možnosti sta v tem območju moči skoraj enakovredni, vendar smo se glede na hiter razvoj tehnologije preklopnih vezij v zadnjih letih odločili za slednjo možnost. Le-ta omogoča tudi kompaktnejšo in cenejšo izvedbo naprave.

6. Izvedba in opis posameznih sklopov

Zahteva naročnika je bila izdelati kompletno merilno napravo za merjenje izgub v jedru. Da bi se zmanjšal vpliv elektromagnetnega valovanja iz pulznega vezja na merilni del, je izvedba takšna, da je tokovni vir ločen od merilnega dela. Ta način in uporaba umerjenih in certificiranih, komercialno dostopnih merilnikov toka, napetosti in moči [2], zagotavljata verodostojnost meritve.



Slika 2: blokovna shema tokovnega vira

Kot močnostni ojačevalnik je uporabljen že predhodno razvit servoregulator za enosmerni motor [1], ki vsebuje naslednje funkcionalne sklope (slika 1):

- močnostni MOSFET H-mostič s pripadajočo pogonsko stopnjo in vezjem za zaščito proti kratkemu stiku,
- simetrični pulznoširinski modulator (PWM) s preklopno frekvenco 20kHz,
- PI regulator toka,
- vhodni diferenčni ojačevalnik s filtrom.

Tokovna obremenitev izhoda znaša do +/-20A pri napetosti do +/-60V.

Izdelan je bil napajalnik močnostnega PWM ojačevalnika, ki napaja tudi ostale sklope v napravi [1]. Uporabljen je močnostni toroidni transformator, diodni usmernik in kondenzatorsko glajenje, za elektroniko še dodatna stabilizacija napetosti. Napajalnik ima sklop za omejevanje vklopnega toka iz omrežja.

Na izhodu PWM ojačevalnika je dodan LC filter drugega reda z lomno frekvenco $f_3 = 2\text{kHz}$ (slika 2). Filter dobro prepušča frekvenčni pas v katerem se nahaja magnetilni tok (do 200Hz), močno pa duši stikalno frekvenco 20kHz.

Nizka napetost in visoka vrednost toka za magnetenje določata zelo nizko impedanco bremena. Izdelava ojačevalnika z ustreznimi zmogljivosti bi bila neracionalna, zato impedanco bremena prilagodimo na izhod preklopnega ojačevalnika s transformatorjem. To omogoči lažje načrtovanje in izbiro elementov preklopnega vezja. Uporabljen je toroidni transformator z zelo majhnim stresanjem (razsipanjem), s čimer je zagotovljen širok frekvenčni obseg prenašanega signala. Pozornost je bila namenjena predvsem dimenzioniranju jedra transformatorja z namenom, da se prepreči nasičenje jedra tudi pri nizkih frekvencah in velikih amplitudah.

V napravi sta za potrebe regulacije uporabljena dva galvansko ločena Hall-ova merilnika (slika 2). Prvi meri tok na izhodu močnostnega ojačevalnika, drugi pa izhodni tok za magnetenja jedra.

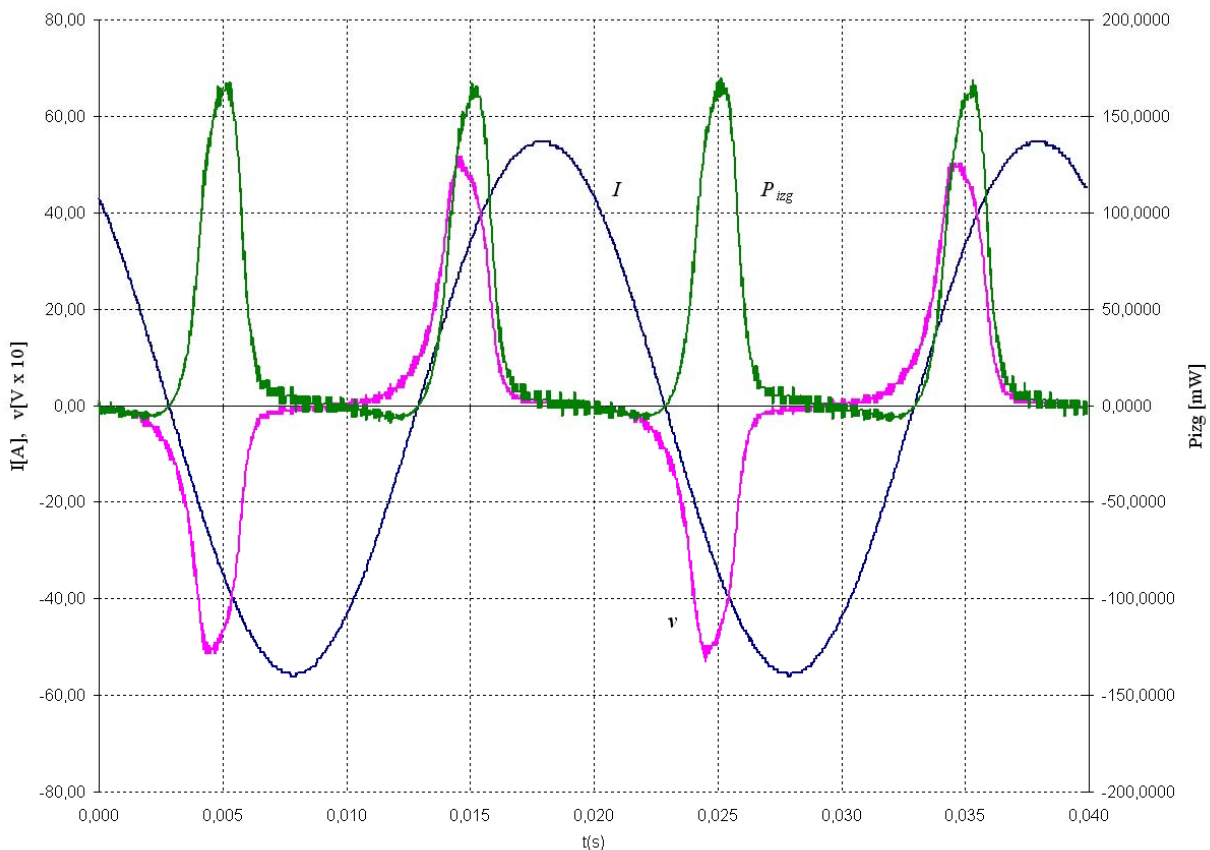
Breme ima dve značilnosti, zaradi katerih je v regulacijskem smislu zelo neugodno. Ima pretežno induktivni karakter in zaradi oblike magnetilne karakteristike tudi izrazito nelinearnost. Za doseganje čim manjšega pogoška je bila uporabljena metoda s proporcionalnim in diferencialnim predkrmiljenjem. Regulator toka deluje v kaskadni regulacijski shemi (slika 2). Notranja tokovna zanka s stikalnim ojačevalnikom s P regulatorjem toka zagotavlja simetrijo toka na primarni strani prilagoditvenega transformatorja. P regulator v zunanji zanki zagotavlja sistemu stabilnost in dobro sledenje referenčni vrednosti.

Referenčni signala se generira iz D/A pretvornika mikrokrmilnika. Sama zgradba naprave bi omogočala tudi generiranje drugačnih oblik izhodnega toka, vendar se za potrebe meritev izgub v statorskih jedrih uporablja le sinusni signal. Omejitev izhodnega signala je določena s pasovno širino v območju od 10Hz do 1000Hz. Parametri izhodnega signala se nastavljajo na osebni računalniku v za to narejenem uporabniškem programskem vmesniku. Tokovni vir se krmili z osebnim računalnikom preko serijske povezave RS-232.

7. Preizkusne meritve

Za preizkus tokovnega vira so bile narejene laboratorijske meritve na vzorčnem statorskem jedru. Testni sistem je bil sestavljen iz naslednjih komponent: tokovni vir kot generator magnetilnega toka in PC multifunkcijska A/D kartica za zajemanje signala toka in inducirane napetosti. Za kontrolo meritve je bila narejena aplikacija v programskem paketu Visual Designer. Preko uporabniškega vmesnika se prikazuje izmerjeni signal in se nastavlja frekvence in amplituda referenčne vrednosti magnetilnega toka.

Slika 3 prikaz časovni potek magnetilnega toka in inducirane napetosti. Izračunan je tudi produkt njunih trenutnih vrednosti, kar ustreza izgubam v jedru. Srednja vrednost izgub za dan primer znaša 0.03W, kar je primerna vrednost za magnetenje z relativno majhnim tokom.



Slika 3: časovni potek magnetilnega toka, inducirane napetosti in izgubne moči

8. Zaključek

Tokovni vir je v celoti izpolnil pričakovanja in zahteve naročnika. Bistveno se je povečala ponovljivost meritev. Možno je tudi generirati tokove drugih frekvenc, kar z metodo magnetenja neposredno iz omrežne napetosti ni bilo mogoče. Regulacija toka zraven čiste sinusne oblike zagotavlja tudi dobro amplitudno stabilnost ne glede na impedanco bremena. Ne nazadnje računalniško voden tokovni vir (za razliko od običajnega) omogoča izvedbo avtomatiziranih meritev ali skupin meritev.

Naprava se trenutno uporablja v avtomatizirani merilni verigi za merjenje izgub statorskih jeder s tekočega traku v

proizvodnji. Pri meritvah se kaže, da ima naprava precej rezerve v zmogljivostih, kar je posledica konservativnega dimenzioniranja posameznih sklopov. Pri morebitni bodoči maloserijski izdelavi teh naprav bi bilo možno tudi znižati stroške z optimizacijo nekaterih komponent. Pozornost bi bilo smiselno nameniti tudi dodatni harmonski analizi višjih harmonskih komponent, pa tudi meritvi količine elektromagnetnega sevanja v okolico.

9. Literatura:

- [1] M. Španer, *Večosni robotski servoregulator*, Avtomatizacija v industriji in gospodarstvu, Maribor 2001
- [2] Circutor, serie CVMK-4C, merilniki efektivne vrednosti, navodilo za uporabo