

Delno razmagnetenje trajnih magnetov v elektronsko komutiranih strojih

Škoda Andraž, Treven Martin, Miljavec Damijan

Fakulteta za Elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: skoda.andraz@gmail.com

Partial demagnetization of permanent magnets in electronically commutated machines

The process of irreversible demagnetization of permanent magnets can quickly occur at the increase of the temperature and/or sudden increase of the supply currents (short circuit) and by increase of drive vibrations. That is why it is important that in new electric machine design phase the demagnetisation problem is studied in detail. The analyses were done by two different software packages: Flux Cedrat and JMag Designer. Location of the partial demagnetization and diminution of machine shaft torque are presented. The changes in induced voltage at terminals of the machine in generator regime due to partial demagnetization are also shown.

1 Uvod

Z razvojem vedno boljših trajnih magnetov in padcem njihove cene so se ti začeli vedno bolj uporabljati v sinhronskih strojih. Zaradi visoke gostote energije trajnih magnetov lahko gradimo lažje stroje z višjo gostoto moči. Električni stroji s trajnimi magneti so lahko izdelani v različnih oblikah. Z njihovo množično uporabo v različnih aplikacijah pa se med obratovanjem lahko pojavi problem delnega razmagnetjenja ali razmagnetjenja trajnih magnetov v celoti [1-6]. Cilj raziskave je modeliranje procesa demagnetizacije magnetov redkih zemelj v električnem stroju s pomočjo dveh numeričnih simulacijskih programov, ki računata na osnovi metode končnih elementov [7,8].

2 Demagnetizacija

Proces demagnetizacije ali razmagnetjenja se v magnetih pojavi zaradi različnih dejavnikov, kot so: povišanje temperature, povratno magnetno polje napajalnih tokov in vibracije med delovanjem stroja.

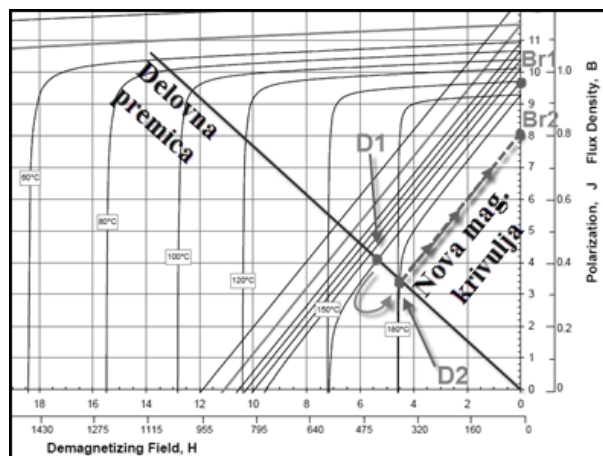
Temperatura v stroju se poviša zaradi izgub v bakru, histerezni izgub, vrtilničnih izgub, preobremenitev in napak v delovanju motorja. Povratno magnetno polje se v strojih pojavi zaradi nasprotne orientacije magnetnega polja magnetov, v primerjavi z vrtilnim magnetnim poljem pri delovanju stroja.

Ob demagnetizaciji se zmanjša energija in remanentna gostota magnetnega pretoka trajnih magnetov. Posledično pa se zmanjšajo tudi vse količine

v električnem stroju povezane z magnetnim poljem trajnih magnetov.

2.1 Razmagnetenje zaradi povišanja temperature

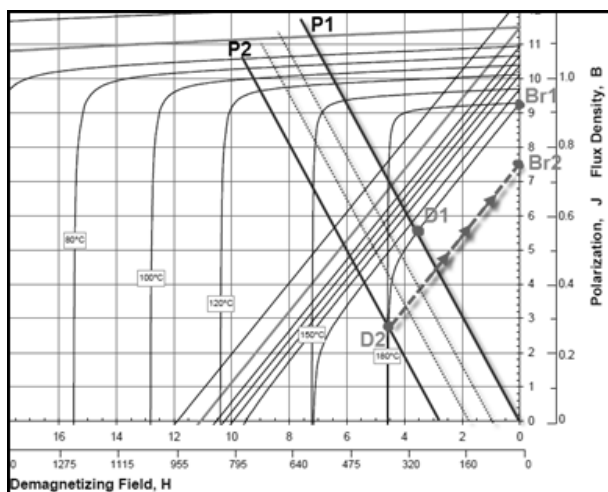
Na sliki 1 vidimo teoretični primer, kjer se delno razmagnetenje pojavi zaradi povišanja temperature. Stroj na začetku obratuje pri temperaturi 150°C v točki D1. Ko se temperatura poviša na 180°C, dobimo novo delovno točko D2. Ta leži na presečišču delovne premice ter magnetne krivulje za delovno temperaturo 180°C, in sicer pod kolenom. Ob zmanjšanju temperature nazaj na 150°C se tako delovna točka ne more vrniti na prvotno krivuljo (za 150°C) ob zmanjšanju temperature, ampak ostane na novi krivulji, definirani z manjšo remanentno gostoto magnetnega pretoka Br2.



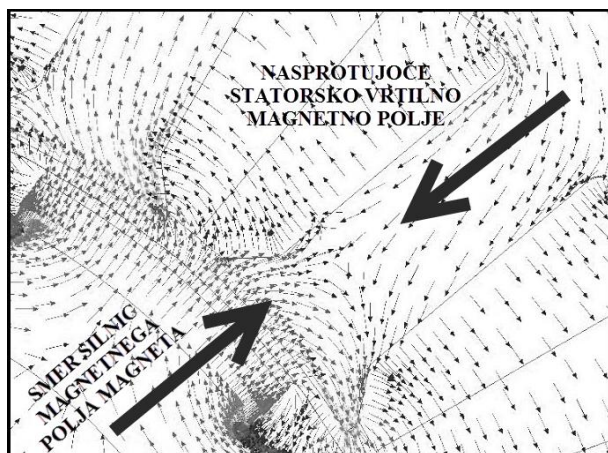
Slika 1. Razmagnetenje zaradi povišanja temperature s 150°C na 180°C

2.2 Razmagnetenje zaradi povratnega magnetnega polja

Delovna točka lahko pod kolenom zleze tudi zaradi visokih napajalnih tokov, katerih posledica je močno povratno magnetno polje, ki nasprotuje magnetnemu polju magneta (slika 3). Pri tem je zanimivo to, da je za pojav ireverzibilne demagnetizacije dovolj le hipen pulz povišanega toka, na primer kratek stik. Po tem trenutku se nam delovna premica P1, na sliki 2, horizontalno premakne v levo (na sliki 2 delovna premica P2). S tem dobimo novo delovno točko D2, ki je prečkala območje kolena. Ob odstranitvi polja opazimo zmanjšanje remanentne gostote iz Br1 na Br2.



Slika 2. Demagnetizacija zaradi povratnega magnetnega polja oz. povišanja toka



Slika 3. Nasprotujoče magnetno polje

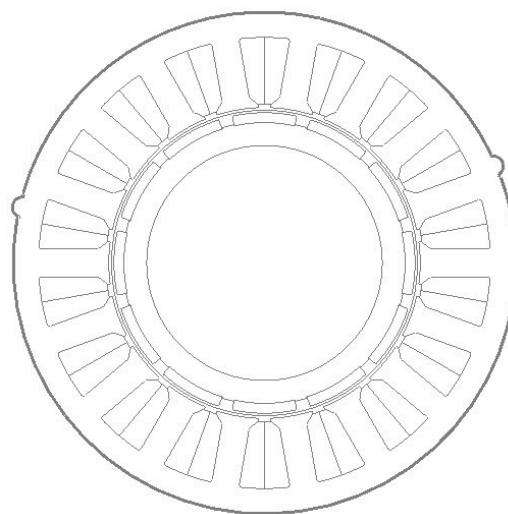
3 Modeliranje razmagnetjenja

Za modeliranje smo uporabili dva numerična simulacijska programa, ki delujeta na osnovi metode končnih elementov. To sta japonski JMag Designer in francoski Flux Cedrat. Modelirana stroja sta sinhronska generatorja z magneti N33-UH, ki sta prikazana na slikah 4 in 7.

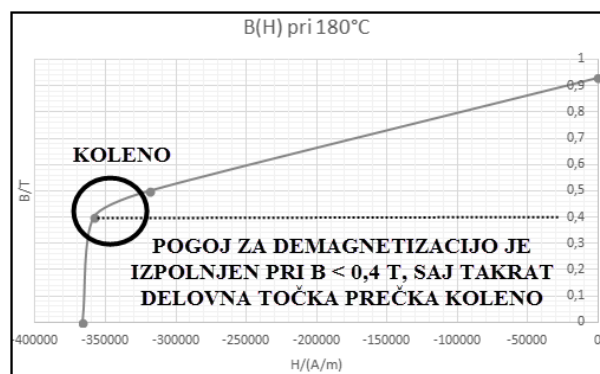
3.1 Modeliranje s Flux Cedrat

Pri simulaciji s Flux Cedrat smo uporabili geometrijski model sinhronskega generatorja, ki je prikazan na sliki 4.

Karakteristika magneta uporabljena pri modeliranju v Flux Cedrat, je na sliki 5. Po točkah smo definirali $B(H)$ krivuljo za 180°C, saj je to maksimalna dopustna temperatura, podana s strani projektanta stroja.



Slika 4. Geometrijski model sinhronskega generatorja, ki je bil uporabljen pri modeliranju s Flux Cedrat.

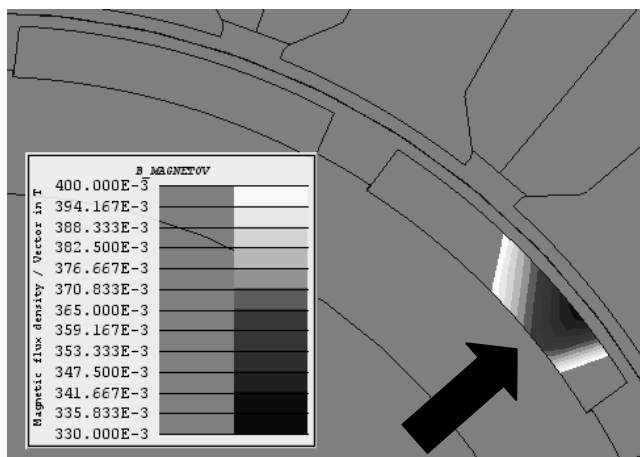


Slika 5. B-H karakteristika magneta, ki je bil uporabljen pri modeliranju s Flux Cedrat

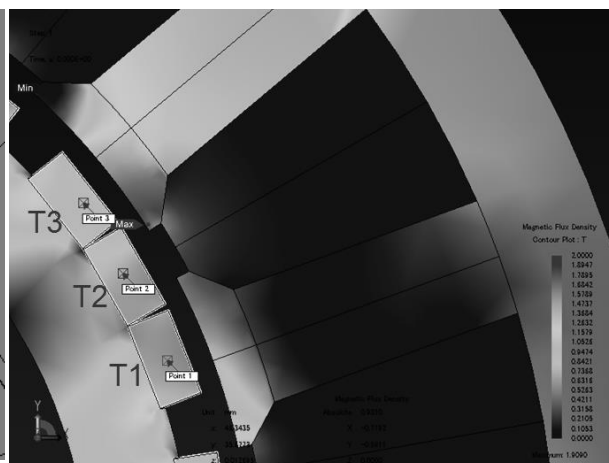
Stroj je bil napajan s trifaznim tokovnim virom 120A temenske vrednosti. Tokovni vir je bil uporabljen zato, ker na ta način lahko spreminjamo magnetno polje v stroju. Tok je bil vsiljen na tak način, da sta bila tok in inducirana napetost v fazi. Torej vodenje brez slabljenja polja.

Pogoj za demagnetizacijo je izpolnjen, ko delovno točko pripeljemo pod območje kolena, oziroma če je gostota magnetnega pretoka B pod vrednostjo 0,4 T (slika 5). Na sliki 6 je videti, da je označeni del magneta v področju pod kolenom. To pomeni, da bi se ta del delno razmagnetil.

Razlog za delno razmagnetjenje lahko pripišemo visoki temperaturi, ki poslabša karakteristiko magneta, in vrtilnemu magnetnemu polju v stroju, ki nasprotuje polju magneta. Vse to potisne delovno točko v prikazanem delu magneta pod kolenom (slika 5).



Slika 6. Prikaz dela magneta, ki bi se delno demagnetiziral.



Slika 7. Geometrijski model sinhronskega generatorja, ki je bil uporabljen pri modeliranju z JMag Designer

Simulacijo v Flux-u smo v tej točki zaključili, saj ima program možnost le zaznavanja področja, kjer bi se magnet delno razmagnetil, a se v simulaciji dejansko ne zgodi. Program torej ne omogoča simulacije drugačne usmerjenosti magnetnih domen v magnetu in s tem dodatne analize sprememb lastnosti obravnavanega stroja. Namen simuliranja s tem programom je bil predvsem primerjava rezultatov dveh različnih simulacijskih programov in s tem sklepanje o pravilnosti pridobljenih rezultatov do stopnje zaznave demagnetizacije.

V Flux-u bi lahko simulirali demagnetizacijo, če bi magnet razdelili na več manjših pod-področij in bi tem, ki so se razmagnetila, po končani analizi določili novo $B(H)$ karakteristiko. Nato bi opravili novo analizo z delno razmagnetnim magnetom in primerjali spremembe z rezultati prejšnjih analiz.

3.2 Modeliranje z JMag Designer

Drugi program, ki je bil uporabljen pri modeliranju demagnetizacije, je JMag Designer. Izbran je bil zato, ker ima v svoji podatkovni bazi karakteristike magnetov za različne temperature in ima vgrajeno analizo demagnetizacije. To pomeni, da v simulaciji program samodejno prevzame magnetno karakteristiko za določeno temperaturo in rezultate analize shrani ter omogoča njihovo ponovno uporabo pri nadaljnji analizi.

Program je sposoben med analizo zaznati tudi prehod delovne točke preko kolena in samodejno določiti nove $B(H)$ karakteristike vsakemu od elementov na katere je razdeljen magnet po metodi končnih elementov. Tako lahko simuliramo spremenjene obratovalne lastnosti zaradi pojava demagnetizacije.

Uporabili smo geometrijo stroja, ki je prikazana na sliki 7. Model se razlikuje od prejšnjega po tem, da so poli magnetov razdeljeni na tri manjše dele. To je bilo podano s strani proizvajalca, zaradi zmanjšanja vrtničnih tokov. Na sliki 7 je tudi prikazana porazdelitev gostote magnetnega pretoka v obravnavani delovni točki stroja in merilne točke uporabljene v nadaljni analizi.

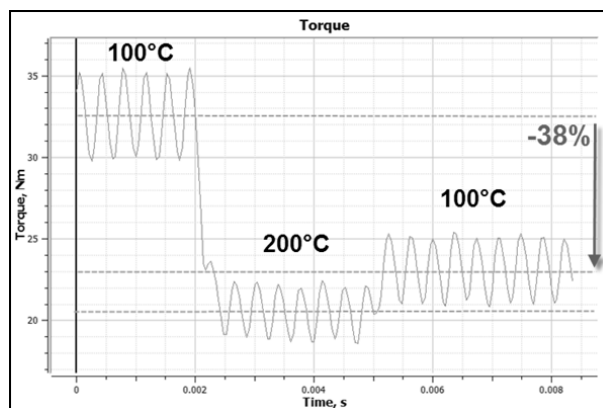
Magnet uporabljen pri analizi je bil NMX-33UH proizvajalca Hitachi Metals, ki je v JMagovi bazi materialov. V programu JMag pa lahko definiramo tudi svoje karakteristike za različne temperature.

3.3 Analiza s povišano temperaturo

V analizi smo temperaturo v stroju spreminjali s 100°C na 200°C in nazaj na 100°C . Stroj je bil napajen s trifaznim tokovnim virom 120A temenske vrednosti. Napajalni tok je bil v fazi z inducirano napetostjo, kar pomeni, da je bil stroj zopet v režimu brez slabljenja polja.

Analiza pri omenjenih razmerah je pokazala, da se gostota magnetnega pretoka v magnetu močno zmanjša.

Magnetom se zaradi demagnetizacije zmanjša remanentna gostota magnetnega pretoka, posledično pa tudi navor stroja, kar je prikazano na sliki 8. Po ponovni spremembi temperature na 100°C se navor trajno zniža za približno 38 %. Najnižjo vrednost pa doseže v času najvišje temperature (v simulaciji pri 200°C).

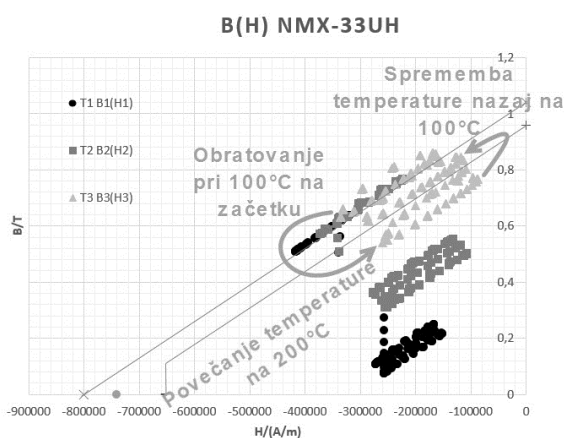


Slika 8. Zmanjšanje navora zaradi demagnetizacije.

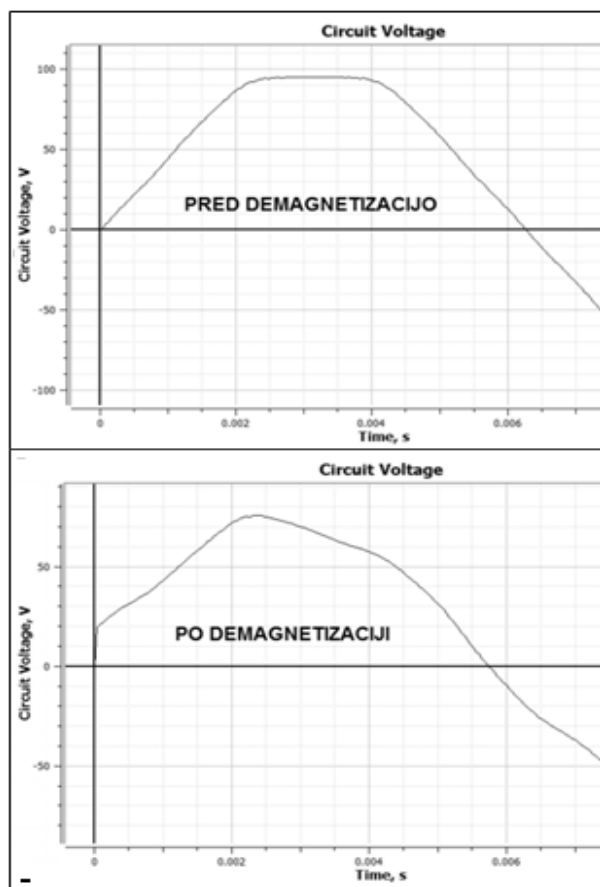
Slika 9 s najtemnejšimi krogi prikazuje položaj merilne točke T1 v trajnem magnetu (slika 7). Razložili smo že, da pride v tem delu magneta do močnega slabljenja gostote magnetnega pretoka ob povišanju temperature in posledično pride do irreverzibilne demagnetizacije. Po povišanju temperature v stroju na 200°C in zmanjšanju nazaj na 100°C , se delovna točka ne more vrniti nazaj na prvotno $B(H)$ karakteristiko za 100°C . Dobimo novo karakteristiko, kot smo to razložili na sliki 1.

Poleg padca navora lahko spremembo opazujemo tudi, ko imamo stroj v generatorskem načinu. Posledice se kažejo v spremenjeni obliki inducirane napetosti

(slika 10). Na tak način lahko tudi praktično preverimo, ali so bili magneti v našem stroju delno razmagneteni.



Slika 9. B(H) krivulje in gibanje merilne točke v senzorju T1 (slika 7).



Slika 8. Inducirana napetost pri delovanju v generatorskem režimu pred in po demagnetizaciji.

Dodatni indikator ireverzibilne demagnetizacije je samodržni navor. Po demagnetizaciji se zmanjša, zaradi manjše energije magnetov.

4 Zaključek

Pred začetkom analize demagnetizacije smo potrdili ujemanje rezultatov obeh simulacijskih programov z nazivnimi podatki, podanimi s strani konstrukterja obravnavanega stroja. Pokazalo se je dobro ujemanje, kar potrjuje kvaliteto uporabljenih programskih paketov. Pri modeliranju demagnetizacije v Flux-u smo omejeni le na zaznavo demagnetizacije, saj program nima vgrajene računske metode za ireverzibilno demagnetizacijo in uporabo rezultatov demagnetizacije pri nadaljnjih simulacijah.

S programom JMag pa smo nadaljnjo analizo lahko izpeljali, saj ima program vgrajeno metodo za upoštevanje demagnetizacije trajnih magnetov. Rezultati simulacije so v obeh programih podali podobno sliko lokacije največjega razmagnetjenja. Z nadaljnjo analizo je bilo v JMag-u ugotovljeno, kako bi se spremenil navor stroja in inducirana napetost na sponkah stroja v generatorskem režimu.

Literatura

- [1] Peter Jereb, Damijan Miljavec: Vezna teorija električnih strojev, FE, Ljubljana, 2008
- [2] Damijan Miljavec, Peter Jereb: Električni stroji - temeljna znanja, Ljubljana, 2005
- [3] Ivan Zagradišnik, Bojan Slemnik: Električni rotacijski stroji, FERi, Maribor, 2001
- [4] Gieras Jacek F., Wing Mitchell: Permanent magnet motor technology : design and applications, New York, 2002
- [5] Yonghui Liao Analysis of fault conditions in permanent-magnet in-wheel motors, Stockholm, Sweden 2011, <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:470634/FULLTEXT01.pdf>
- [6] Sami Ruoho: Modeling Demagnetization of Sintered NdFeB Magnet Material in Time-Discretized Finite Element Analysis, DOCTORAL DISSERTATIONS 1/2011, <http://lib.tkk.fi/Diss/2011/isbn9789526040011/isbn9789526040011.pdf>
- [7] <http://www.cedrat.com/en/software/flux.html>
- [8] <http://www.jmag-international.com/>