

Iskanje in odpravljanje elektromagnetnih motenj pri štirikvadrantnem pogonu

Mitja Nemeč, Andraž Rihar

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: mitja.nemec@fe.uni-lj.si

EMC faults diagnostics and mitigation in four quadrant drive

Abstract. The article presents the EMC issues during the development of four quadrant frequency inverter. The device consists of two converters. A four leg transistor bridge acts as an active rectifier while three leg bridge operates as an inverter. The source of interference caused by common mode currents was firstly incorrectly attributed to du/dt transients. Following thorough analysis, common mode currents through the control electronics were correctly identified and successfully suppressed using common mode choke.

1 Uvod

Naprave močnostne elektronike že v sami naravi svojega delovanja zahtevajo tudi obravnavo elektromagnetne združljivosti (EMC). V kolikor gre za naprave ki gred na trg, so standardi, ki jih morajo naprave na področju EMC izpolnjevati, dobro znani. Pri razvoju prototipov in eksperimentalnih modelov pa je bistveno, da se najprej implementira osnovna funkcionalnost. Tako se področja EMC pogosto sploh ne obravnava, oziroma se mu posvetimo le v kolikor se to izkaže kot potrebno.

V laboratoriju za regulacijsko tehniko in močnostno elektroniko (LRTME) smo se pri nadgradnji eksperimentalnega modela štirikvadrantnega frekvenčnega pretvornika, zaradi pojavljajočih motenj, bili primorani ukvarjati s tem področjem.

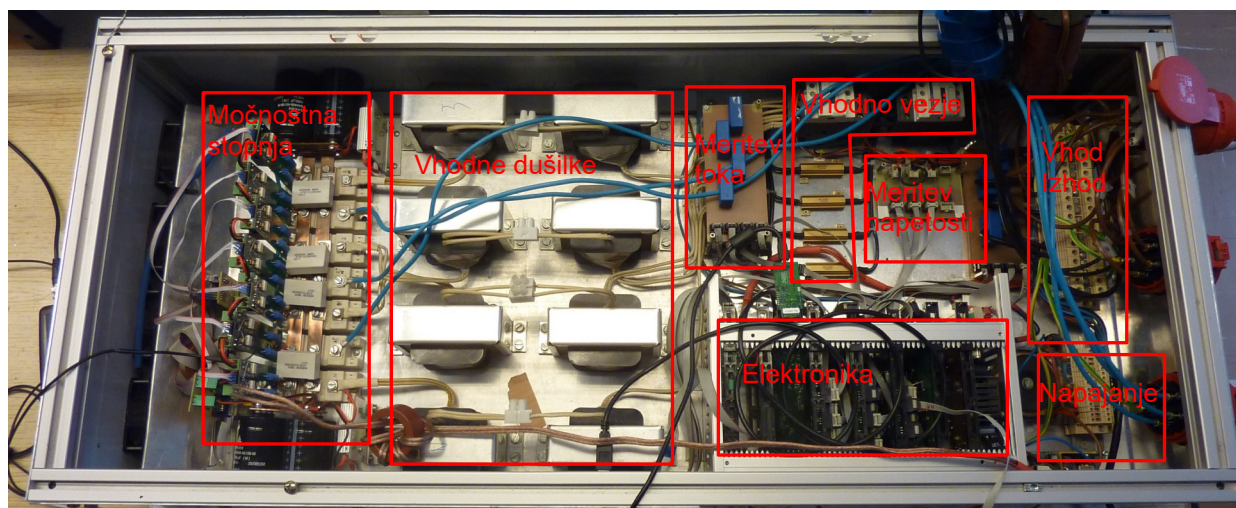
2 Opis sistema

Zgodovina omenjenega štirikvadrantnega frekvenčnega pretvornika se je začela kot aktivni močnostni filter [1]. Pred nadgradnjo je bilo jedro naprave štiri-vejni dvo-nivojski tranzistorski pretvornik. Ob nadgradnji so se dodale še tri tranzistorske veje, ki bi služile kot frekvenčni pretvornik za napajanje električnih strojev, obstoječi štiri-vejni pretvornik pa bi služil kot aktivni usmernik, s katerim bi lahko zagotavljali dvosmerni pretok energije. Naprava je prikazana na sliki 1, kjer lahko vidimo položaje najbolj ključnih komponent.

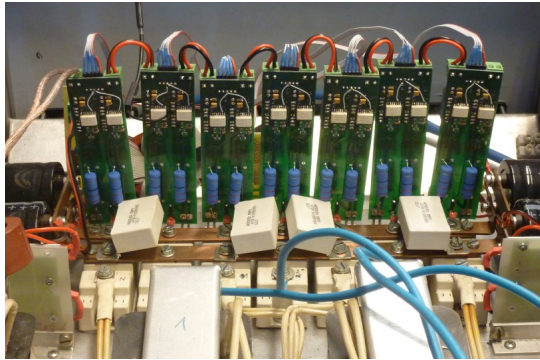
Naprava je grajena za direktni priklop na 400 V trifazno omrežje z možnostjo tri-žilnega (brez nevtralnega vodnika) ali štirižilnega obratovanja. Za meritev toka so uporabljeni zaprtzoančni Hallovi senzorji LA 55P, meritev napetosti pa je izvedena preko uporovnih napetostnih delilnikov in instrumentacijskih ojačevalnikov. Digitalizacijo opravljajo trije šestkanalni, 16 bitni AD pretvorniki ADS8556. Glavna procesna enota pa je mikrokontroler TMS320F28346 s taktom 300 MHz. Preostali parametri so navedeni v tabeli 1.

Tabela 1. Nazivni parametri naprave

Parameter	Vrednost
Omrežna napetost	400 V
Omrežni tok	40 A
Napetost enosmernega tokokroga	650 - 850 V
Izhodna napetost	400 V
Izhodni tok	40 A
Preklopna frekvenca	20 kHz



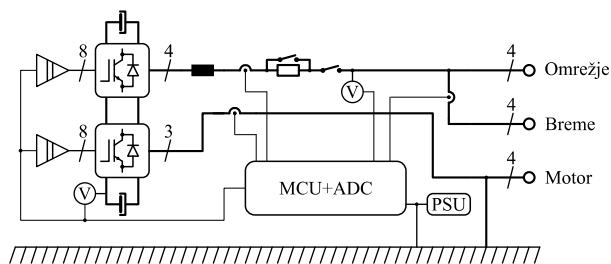
Slika 1: Fotografija pretvornika



Slika 2: Močnostna stopnja s prožilnimi vezji

Močnostna stopnja temelji na IGBT tranzistorjskih modulih SKM75GB12, ki imajo nazivno napetost 1200 V in nazivni tok 75 A. V enem modulu se nahajata dva tranzistorja, ki skupaj tvorita eno tranzistorjsko vejo. Na tiskanem vezju, ki je pritrjeno neposredno na posamezen tranzistorjski modul, se nahajata dve galvanjsko ločeni prožilni vezji (slika 2). Prožilna vezja so grajena okoli integriranega optično ločenega prožilnega vezja ACPL331J in galvanjsko ločenega DC/DC pretvornika.

Blokovna shema pretvornika je prikazana na sliki 3.



Slika 3: Blokovna shema pretvornika

3 Kronološki potek

Ko je bila naprava fizično nadgrajena smo pričeli s pripravo programa in preizkušanjem posameznih funkcionalnosti. V začetku je bilo implementirano in preizkušeno delovanje aktivnega usmernika pri znižani omrežni napetosti. Ko je to delovalo smo omrežno napetost povečevali, dokler nismo uspešno potrdili delovanja pri nazivni omrežni napetosti. Ker nismo imeli bremen smo delovanje pri povečani tokovni obremenitvi preizkusili tako, da je aktivni usmernik obratoval z jalovim tok in tudi to obratovanje je potekalo brez večjih težav.

Ko je bilo delovanje aktivnega usmernika preverjeno, smo pričeli s pripravo pisanja programa in preizkušanjem izhodnega pretvornika. Le to je v začetku potekalo pri znižani napetosti omrežja in enosmernega tokokroga.

3.1 Prvi simptomi

Prvi simptomi motenj so se pokazali, ko smo pričeli zviševati omrežno napetost in napetost enosmernega tokokroga. Ko je bila napetost enosmernega tokokroga višja od 150 V, se je sprožila zaščita prožilnih vezij. Proženje zaščite je bilo sporadično, vendar višja kot je bila napetost enosmernega tokokroga, hitreje se je sprožila zaščita. Ker smo ista prožilna vezja kot tudi iste

močnostne module uporabljali pri aktivnem usmerniku in tam dodobra preverili njihovo delovanje (pri bistveno višji napetosti enosmernega tokokroga) smo hitro ovrgli sum, da bi bilo kaj narobe s samo močnostno stopnjo.

3.2 Prva razlaga in ukrepi

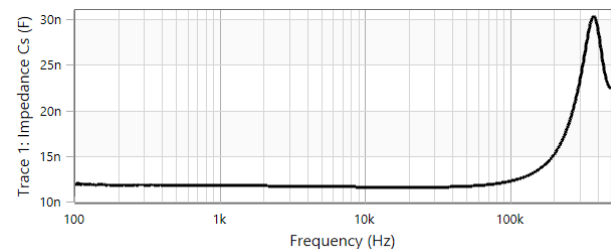
Prva razlaga za to je bila, da velika strmina du/dt , ki je prisotna na izhodih posameznih tranzistorjskih vej inducira motnje na signalnih povezavah. Ker je signal s katerim prožilno vezje proži napako tipa *odprti kolektor* (open collector), je signal v normalnem obratovalnem stanju bolj dovzeten za inducirane motnje.

Razlago zakaj se ta motnja ni izražala, ko smo preizkušali vhodni pretvornik smo poiskali v tem, da so izhodi posamezne tranzistorjske veje vhodnega pretvornika z zelo kratkimi povezavami priključeni na omrežne dušilke. Tako so visoke strmine du/dt omejene na majhen prostor. Pri izhodnem pretvorniku pa te povezave potekajo čez celotno dolžino naprave in tako širijo motnje po vsem sistemu.

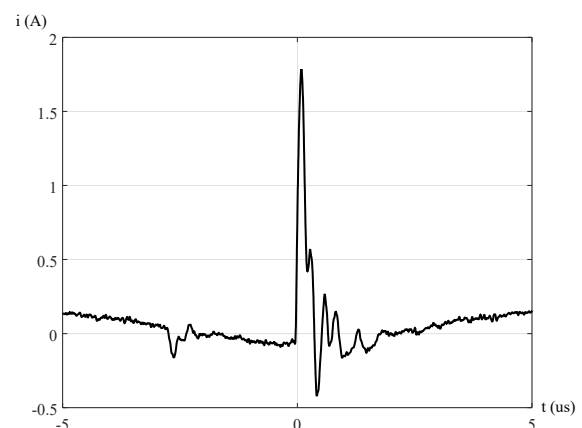
Da bi to omejili smo povezave izhodnega pretvornika proti motorju v celoti izvedli z oklopljenim kablom. Ker oklop ni imel niti najmanjšega vpliva na zmanjšanje motenj se je ta razlaga izkazala za napačno, mi pa smo morali iskati razloge za napačno delovanje naprave drugje.

3.3 Druga razlaga

Naslednji vzrok za omenjeno delovanje smo poiskali v sofaznih tokovih. Zaradi kapacitivnega sklopa navitij električnega stroja proti ohišju (slika 4) ob preklopu tranzistorjev stečejo veliki sofazni tokovi (slika 5).

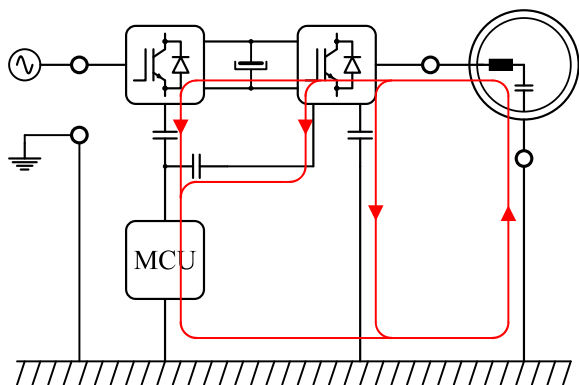


Slika 4: Kapacitivnost navitij stroja proti ohišju



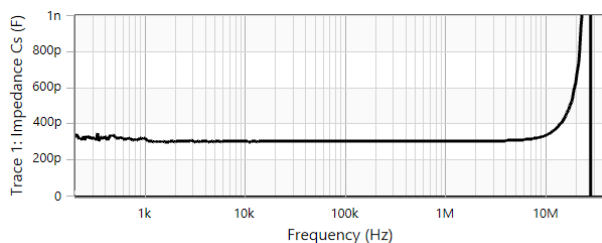
Slika 5: Sofazni tok v električni stroj pri preklopu

Z dodatnimi meritvami celotnega sistema smo ugotovili, da sofazni ne tečejo le med strojem in močnostno stopnjo temveč po celotnem sistemu (slika 6).



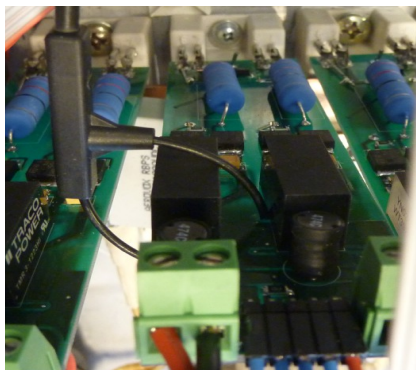
Slika 6: Potek sofaznih tokov

Sofazni tokovi, ki tečejo med električnim strojem in pretvornikom so bili pričakovani. Le ti tečejo od pretvornika proti stroju, nato preko ozemljitvenega vodnika nazaj v pretvornik in po ohišju oz. hladilnem rebro preko kapacitivnega sklopa med hladilnikom in močnostnimi moduli nazaj v pretvornik. Kapacitivnost posameznega modula proti ohišju je približno 300 pF (slika 7).

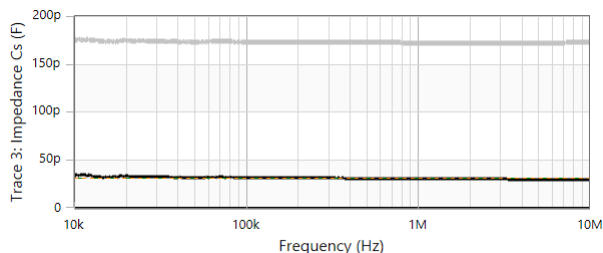


Slika 7: Kapacitivnost močnostnega modula proti ohišju

Presenetili pa so nas predvsem tokovi, ki tečejo med močnostno stopnjo preko prožilnih vezij proti mikrokmilniku in na ozemljitev. Z meritvami preko posameznega prožilnega vezja (slika 8) in z meritvijo kapacitivnosti med primarjem in sekundarjem DC/DC pretvornika (slika. 9), smo ugotovili, da le-ti tečejo predvsem preko DC/DC pretvornika, saj je kapacitivni sklop optično ločenega prožilnega vezja za dva velikostna razreda manjši. Zaradi tega smo se odločili za zamenjavo DC/DC pretvornikov z modelom, ki ima bistveno nižjo kapacitivno sklopitev. Ker je sofazni tok od prožilnih vezji proti elektroniki, tekkel po kablu skupaj s signalom s katerim je prožilno vezje prenašalo status napake, je tako lahko prišlo do proženja napake.

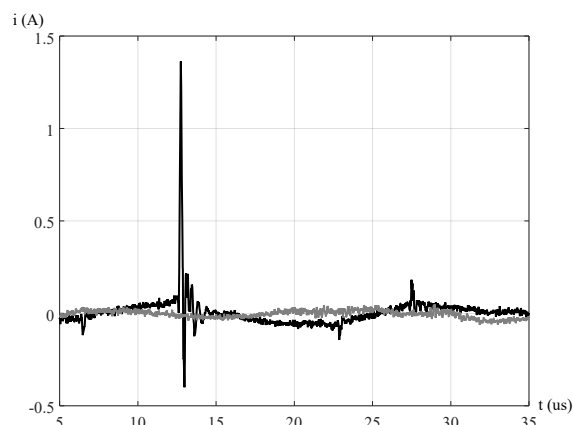


Slika 8: Meritev sofaznega toka preko prožilnega vezja



Slika 9: Kapacitivnost med primarjem in sekundarjem DC/DC pretvornika (siva TMR3-1223, črna TMR3-1223HI)

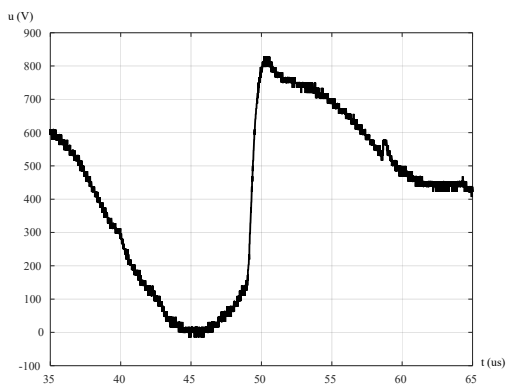
Z zamenjavo DC/DC pretvornikov in z dodanimi sofaznimi dušilkami med elektroniko in prožilnimi vezji smo sofazni tok med prožilnimi vezji in elektroniko zadovoljivo zmanjšali (slika 10) in tudi odpravili razlog za pojav napake.



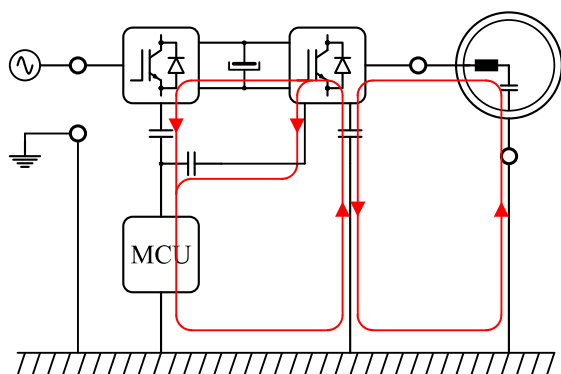
Slika 10: Sofazni tok med prožilnimi vezji in elektroniko pred (črna) in po uvedbi zaščitnih ukrepov (siva)

3.4 Tretja razlaga

Povečanje sofazne impedance med močnostno stopnjo in elektroniko ni imelo nikakršnega vpliva na zmanjšanje sofaznih tokov med močnostno stopnjo in električnim strojem. V nadaljevanju smo se zato nekoliko bolj poglobili v razloge za nastanek sofaznih tokov in z dodatnimi meritvami smo prišli do naslednjega sklepa. Ob preklopu močnostne stopnje med močnostno stopnjo in električnim strojem steče sofazni tok. Ker je kapacitivnost med navitji stroja in ohišjem bistveno večja kot kapacitivnost med močnostno stopnjo in ohišjem, sofazni tokovi bistveno bolj spremenijo sofazno napetost med močnostno stopnjo in ozemljitvijo, kot pa napetost med navitji in ohišjem stroja. Tako se napetost med enosmernim tokokrogom in ozemljitvijo ob vsakem preklopu bistveno spremeni (slika 11). Ta sprememba potenciala povzroči, da stečejo tudi sofazni tokovi med močnostno stopnjo in elektroniko (slika 12).

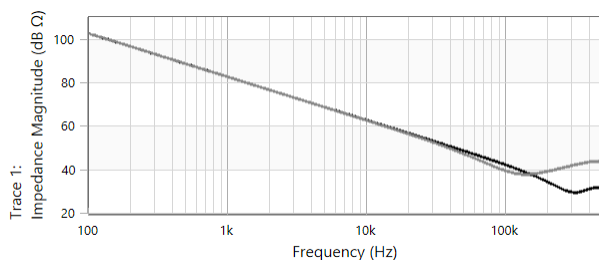


Slika 11: Sofazna napetost enosmernega tokokroga

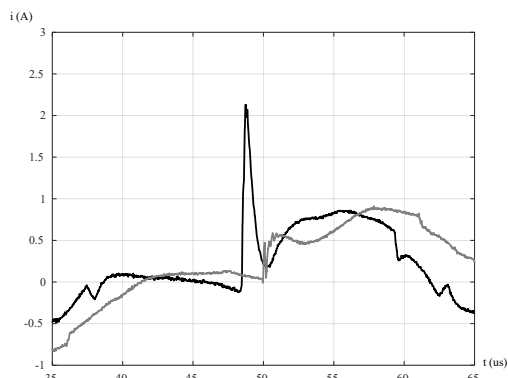


Slika 12: Alternativni pogled na potek sofaznih tokov

Z vstavitvijo sofazne dušilke med močnostno stopnjo in električni stroj povečamo impedanco predvsem v področju višjih frekvenc (slika 13) in s tem drastično zmanjšamo sofazni tok (slika 14). Vendar pa je pri dimenzioniranju sofazne dušilke treba biti pozoren tudi na izgube v njej, saj je v našem primeru prišlo do pregrevanja (slika 15)



Slika 13: Impedanca stroja proti ohišju z (siva) in brez (črna) sofaznih induktivnosti



Slika 14: Sofazni tok električnega stroja brez (črna) in z vstavljenno sofazno dušilko (siva)



Slika 15: Pregrevanje toroidnih jeder sofazne dušilke

4 Postranske ugotovitve

Tekom raziskav, ki so se primarno ukvarjale z EMC na omenjeni napravi, smo prišli tudi do nekaterih s tem nepovezanih ugotovitev.

Razvoj naprave je potekal po majhnih korakih, posamezni razvojni cikli pa so bili kronološko med seboj precej oddaljeni/razmaknjeni. zato bi morala biti dokumentacija bistveno boljša, podrobnejša in obširnejša.

Za poglobljene študije sofaznih tokov bi bilo zelo praktično, v kolikor bi hitrost preklopov močnostnih tranzistorjev nastavljali s programsko opremo in ne preko strojne opreme (vrednosti uporov v vratih tranzistorja).

Na spreminjanje sofazne napetosti enosmernega tokokroga bi lahko posumili že bistveno bolj zgodaj. Zaradi nezanesljive meritve sofaznih tokov v okolici enosmernega tokokroga smo namreč napak sklepali, da so izenačevalni upori na kondenzatorjih enosmernega tokokroga prav tako kapacitivno povezani z ohišjem, kar pa kasnejša meritev ni potrdila.

Induktivnost sofazne dušilke ni edini parameter, ki določa njeno učinkovitost. Pri frekvencah, s katerimi smo imeli opravka, je bistven vpliv imel tudi material jedra dušilke (ferit oz. vitroperm).

5 Zaključek

Čeprav naprava sedaj zadovoljivo služi svojemu namenu, delo na njej na področju EMC še ni končano. V prvi fazi bo treba pravilno načrtovati in vstaviti sofazni filter v smeri proti električnemu stroju.

V nadaljevanju bi veljalo tudi raziskati, kako na sofazne tokove vplivajo hitrosti preklopov, kar je zanimivo predvsem v luči vpeljave sodobnih polprevodniških tehnologij (SiC, GaN), kjer so hitrosti preklopov še bistveno višje.

Zahvala

Delo je bilo sofinancirano iz programa ARRS »Pretvorniki električne energije in regulirani pogonik« P2-0258 (B).

Literatura

- [1] M. Nemeč, "Prediktivne metode pri reguliranih trifaznih pretvorniških sistemih: doktorska disertacija / Mitja Nemeč," Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 2008.