

Ispitivanje novog rešenja upaljačkog kola za IGBT prekidače

Milan Lukić¹, Predrag Ninković¹

¹ Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija

milan.lukic@ieent.org

Kratak sadržaj: U ovom radu je prikazan protokol za ispitivanje novog rešenja upaljačkog kola za komandovanje IGBT prekidačima baziranog na specijalizovanom integriranom kolu. Prikazan je pregled osnovnih karakteristika namenskih integrisanih kola i priložena je šema razvijenog rešenja sa kratkim opisom rada. Uspostavljena je i sprovedena procedura za ispitivanje njegovih karakteristika i priloženi su snimci koji pokazuju da su karakteristike u skladu sa očekivanim vrednostima. Ovo tehničko rešenje je primenjeno u pretvaraču podizaču napona snage 20kW.

Ključne reči: upaljačko kolo, prekidač, IGBT tranzistor, integrисано кло, UVLO, DESAT

1. Uvod

Proteklih nekoliko decenija je došlo do ubrzanog razvoja energetske elektronike usled intenzivnog rada na poboljšanju karakteristika energetskih prekidača sa ciljem proširivanja opsega primene kao i povećanja efikasnosti. Uporedo sa razvojem prekidača došlo je i do razvoja ostalih pratećih elemenata. Jedan od najvažnijih elemenata je upaljačko kolo za prekidače ili „drajver“ (eng. driver). Dato kolo služi za prihvatanje signala za komandovanje prekidačima koji stiže iz upravljačkog dela, njihovu pripremu, izolovanje i prosleđivanje do prekidača [1]. Pored ove funkcije data kola obično imaju i niz drugih funkcija kao što su: zaštita prekidača od prevelike struje, zaštita od preniskog napona napajanja upaljačkog kola, zaštita od neželjenog uključivanja prekidača i sl.

Danas se često koriste tipska rešenja upaljačkih kola. Postoji veći broj proizvođača koji imaju svoja tipska rešenja veoma dobrih karakteristika, kao što su Semikron, Infineon, ABB, Concept i drugi. Njihova prednost je

pouzdanost, garantovane karakteristike i jednostavnost primene. Mana je pre svega cena kao i fleksibilnost primene za specifične aplikacije. Takođe, tipska rešenja su najčešće dvokanalna, odnosno jedno kolo uključuje oba prekidača u grani tranzistorskog mosta.

Proizvođač uređaja energetske elektronike u fazi projektovanja odlučuje da li će primeniti već postojeće tipsko rešenje uz ulaganje više novca ili će razvijati sopstveno upaljačko kolo. Aplikacija koja je bila postavljena pred nas je razvoj DC/DC pretvarača - podizača napona snage do 5kW, ulazne struje do 50A i izlaznog napona do 400V. Takođe, bilo je potrebno napraviti ceo uređaj (samim tim i upaljačko kolo) sa što manjom cenom a velike pouzdanosti. Za datu aplikaciju se koristi jednokanalno kolo jer se vrši komandovanje jednim prekidačem. Iz tog razloga je odlučeno da se razvije upaljačko kolo za IGBT prekidače.

2. Realizacija upaljačkog kola

Na tržištu postoji veliki broj lako dostupnih i jeftinih integrisanih kola sa većim ili manjim brojem funkcija za upaljačka kola. Na izbor utiče mnogo faktora: potreba za pojedinim funkcijama, cena, kao i drugi faktori kao što su primjenjeni koncept zaštita, napajanja, merenja itd. Neki od najpoznatijih proizvođača integrisanih kola za te namene su: Infineon, Avago, ON Semiconductor, IXYS, STMicroelectronic i drugi. Sva dostupna kola imaju osnovnu funkciju da od upravljačkog kola prihvate, prilagode i prenesu komandni signal ka prekidaču. Postoje integrisana kola sa galvanskom izolacijom ulaz-izlaz a postoje i ona koja nisu izolovana. Pored ovih osnovnih karakteristika koje poseduju, postoji i niz zaštitnih funkcija po kojima se data kola razlikuju.

Neke od unutrašnjih zaštitnih funkcija su:

- Zaštita od preniskog napona napajanja integrisanog kola;
- Zaštita od uključivanja prekidača pri isključenom napajanju – (*Active Shut-down*);

Neke od spoljašnjih zaštitnih funkcija su:

- Zaštita prekidača od rada u kolu kratkog spoja – zaštitom od ulaska u linearni režim (desaturacija) ili merenjem struje prekidača;
- Zaštita od neželjenog dinamičkog uključivanja prekidača – (*Active Miller Clamp*);
- Zaštita gejta prekidača od prevelikog napona pri kratkom spoju – (*Short Circuit Clamping*);

Ostale funkcije koje upaljačko kolo može da ima su:

- Unutrašnje, hardversko, mrtvo vreme i blokada uključenja oba prekidača istovremeno (kod dvokanalnih kola);

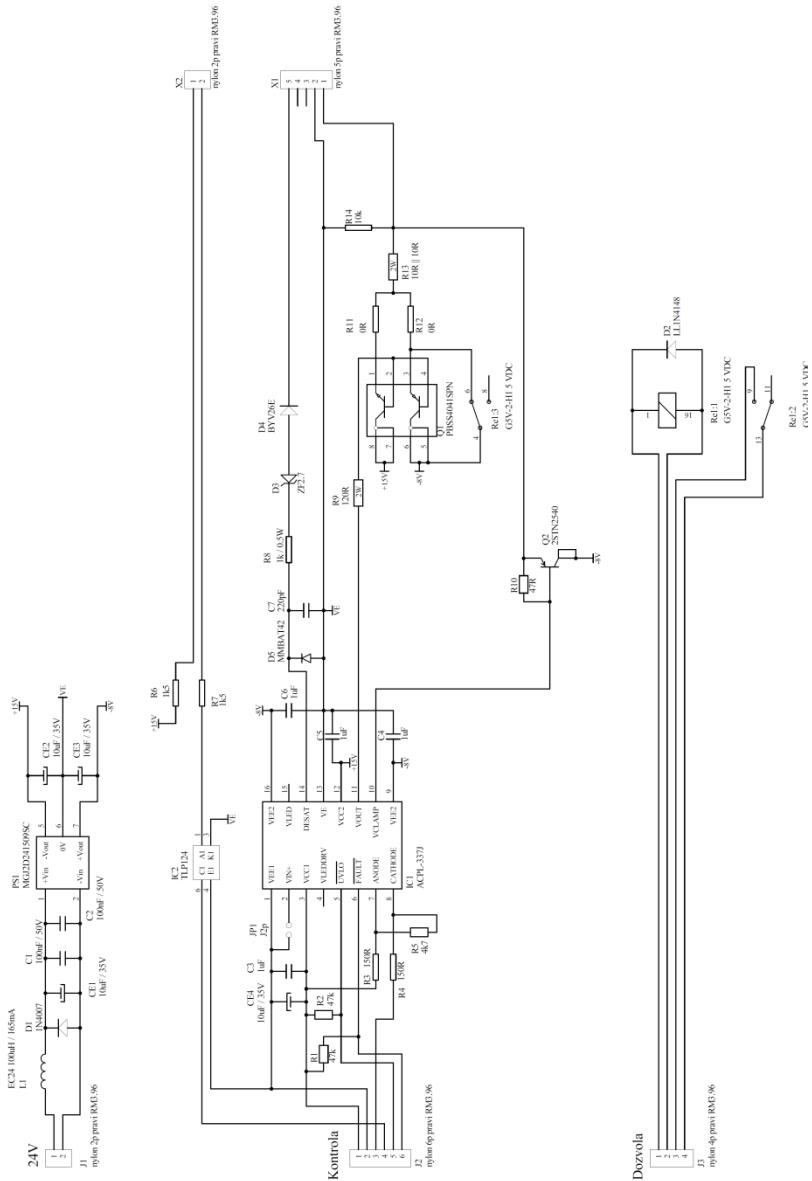
- Bootstrapping kolo (*eng. bootstrap*) za napajanje i ulaznog i izlaznog dela iz istog izvora;
- Pinovi za signalizaciju i kontrolu ispravnog rada (*eng. Ready, Fault, Reset*);

Za našu primenu je bilo potrebno izolovano jednokanalno upaljačko kolo za IGBT prekidač. Zbog prisustva samo jednog IGBT prekidača dovoljno je primeniti jednokanalno upaljačko kolo, sa zaštitom od desaturacije, od preniskog napona napajanja integrisanog kola i zaštita od neželjenog uključivanja. Odabранo je kolo ACPL-337J od proizvođača Avago koje zadovoljava potrebe, jeftino je i široko je prisutno na tržištu. Na slici 1. je prikazana šema projektovanog upaljačkog kola.

Napajanje izlaznog stepena se vrši sa +15V i -8V jednosmernog napona, koji su potrebni za komandovanje IGBT prekidačem. Ono se dobija iz posebnog pretvarača PS1 konverzijom iz napona 24V (ili drugog po izboru projektanta).

Integrисано kolo ACPL-337J obezbeđuje sledeće funkcije: kontrolisano uključenje i isključenje prekidača, Active Miller Clamp, zaštita od desaturacije, galvanska izolacija između ulaznog i izlaznog stepena, kontrola napajanja i dojava ispravnog rada. Na izlazu se koristi pojačavački stepen (*eng. current booster*) koji se koristi da se poveća strujni kapacitet kola pri komandovanju prekidačem. Vršna vrednost struje od 15A pri komutovanju prekidača se u ovom slučaju dobija direktno iz izvora i pripadajućih kondenzatora. Korišćeno integrисано kolo šalje ka upravljačkom kolu signal greške i signal preniskog napona napajanja.

U upaljačkom sklopu postoji konektor za priključenje bimetalica kao termičke zaštite prekidača i prosleđivanje do ulaznog stepena sa galvanskom izolacijom. Prisutan je i relez za dozvolu rada upaljača, koji se pobuduje spoljašnjim signalom i tako omogućava komandovanje prekidačem.



Slika 1. Električna šema upaljačkog kola baziranog na integriranom kolu AVAGO
ACPL-337

3. Ispitivanje upaljačkog kola

U nastavku teksta je prikazano ispitivanje svake od važnijih karakteristika korišćenog upaljačkog kola. Data je šema vezivanja pri ispitivanju, snimci i analiza svake karakteristike ponaosob.

3.1 Ispitivanje napajanja i zaštita od preniskog napona napajanja - UVLO (eng. *UnderVoltage LockOut*)

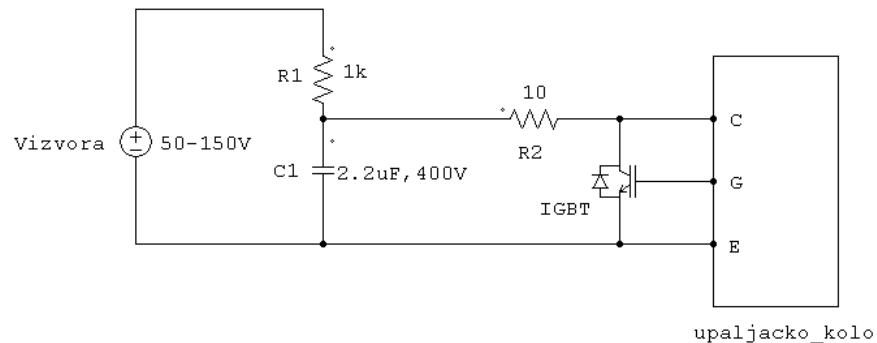
Prvo ispitivanje koje se vrši je ispitivanje napajanja upaljačkog kola, uticaj uključivanja i isključivanja napajanja na rad kola, kao i rad zaštite od preniskog napona napajanja integrisanog kola. Veoma je važno da upaljačko kolo koje se koristi u realnim uslovima, gde je moguć nestanak napajanja, bude pouzdano i da nikada ne izvrši neželjeno komandovanje prekidačem. Pod neželjenim komandovanjem podrazumevamo svako komandovanje za koje ne postoji zahtev iz upravljačke elektronike.

Zaštita od preniskog napona napajanja upaljačke elektronike služi za trenutno isključivanje prekidača pri detektovanom preniskom naponu napajanja integrisanog kola. Ova zaštita je važna jer onemogućava uključivanje prekidača pri malom naponu gejta, što bi dovelo do njegovog pregrevanja [2]. Zaštita funkcioniše na principu histerezisnog komparatora koji napon napajanja poredi sa utvrđenim granicama. Histerezis se koristi da bi zaštita bila imuna na električni šum. Ukoliko napon napajanja u radu postane manji od donje granice, prekidač se isključuje što se signalizira upravljačkoj elektronici preko UVLO pina integrisanog kola. Kada napon napajanja pređe gornju granicu (napajanje se povrati), komandovanje se ponovo prepusti upravljačkoj elektronici. Kod nekih integrisanih kola koji imaju galvansku izolaciju postoje dve odvojene zaštite za oba napona napajanja, dok kod nekih postoji samo za izlaznu stranu, tj. za napajanje ka prekidačima. U našem slučaju postoji zaštita samo za izlazni stepen upaljačkog kola. Takođe, pri pokretanju upaljačke elektronike (uključivanju napajanja) zaštita od preniskog napona napajanja blokira komandovanje prekidačima i tako sprečava pogrešno komandovanje pri preniskom naponu prilikom pokretanja [3].

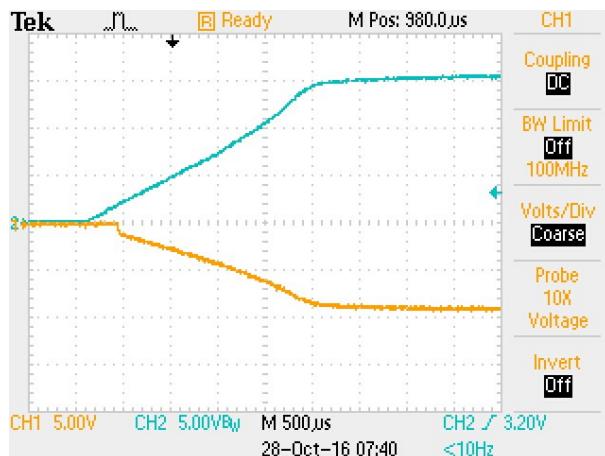
Na slici 2. je prikazana osnovna šema vezivanja upaljačkog kola i IGBT prekidača za potrebe ispitivanja. Kondenzator C_1 je izvor napona koji će se isprazniti u slučaju uključenja IGBT prekidača. Otpor R_2 ograničava struju pražnjenja kondenzatora na razumno vrednost. Otpornik R_1 omogućava početno punjenje i održavanje napona na kondenzatoru tokom eksperimenta (eliminacija samopražnjenja).

Cilj eksperimenta je da se utvrdi da tranzistor bez komande za uključenje ostaje isključen pri uspostavljanju i gubitku komandnih napona. Osciloskopom je meren napon između gejta i emitera prekidača. Utvrđeno je da u svim slučajevima nije došlo do neželjenog uključenja prekidača. Na slici 3. je

prikazan jedan od snimaka ovog dela ispitivanja. Plavi trag je napon napajanja +15V u toku uključenja, a žuti trag je napon gejt-emiter. Vidi se da se po uključenju napajanja napon gejt-emiter odmah usmerava ka -8V i samim tim je upaljačka elektronika blokirala neželjeno uključenje prekidača.

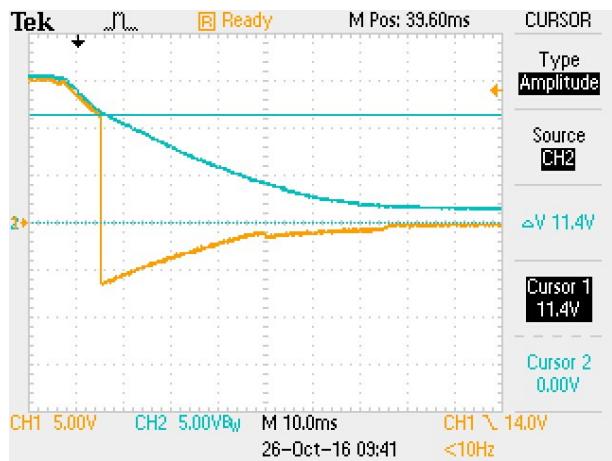


Slika 2. Električna šema za ispitivanje upaljačkog kola IGBT-a



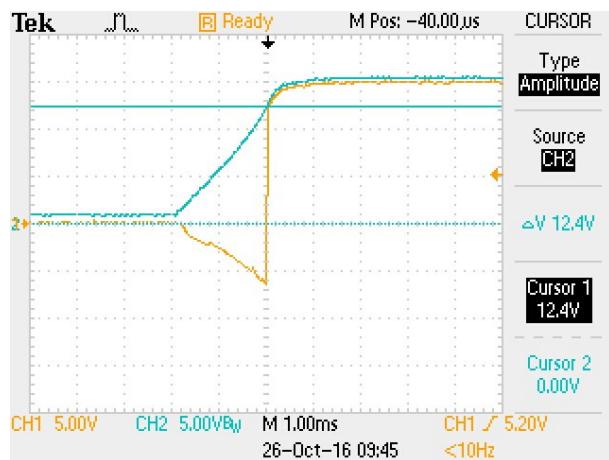
Slika 3. Napon gejt-emiter pri uključivanju napona napajanja +15V/-8V

Sledeće je ispitivanje rada kola za zaštitu od preniskog napona napajanja upaljačke elektronike. Integrисано коло које користимо AVAGO ACPL-337J има ову заштиту само за напајање +15 и -8V [4]. Снимани су напони гејта прекидача и +15V. Прво smo испитали рад при укиданju напајања излазног ступена (+15V и -8V), а онда и при његовом повратку. На слици 4. је приказан снимак мерења величина при наглом нестanku напајања излазног ступена.



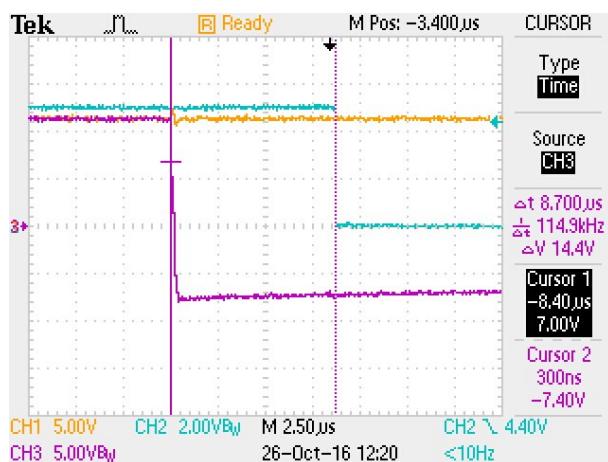
Slika 4. Snimak rada UVLO funkcije pri nestanku napajanja

Plava linija je napon +15V izlaznog stepena, a žuta linija je napon gejtemiter prekidača koji ima komandu za uključenje. Kada je napajanje isključeno počelo je njegovo eksponencijalno smanjivanje. Prekidač je ostao uključen sve do prorade zaštite od preniskog napona koja je odreagovala pri približno 11,4 V što se slaže sa kataloškim vrednostima za integrисано коло [4]. Na slici 5. je prikazan grafik za slučaj kada se napon napajanja vratio na nominalnu vrednost.

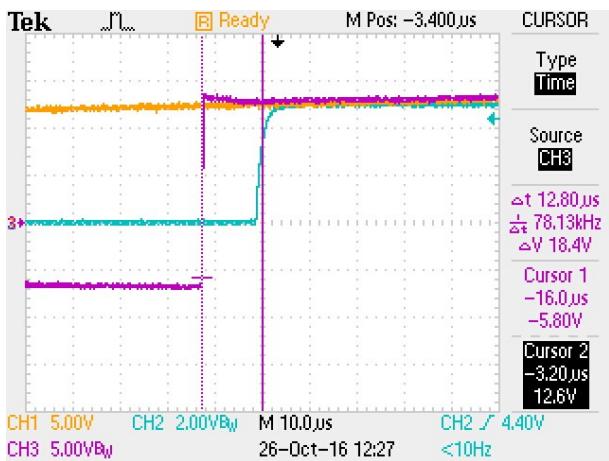


Slika 5. Snimak rada UVLO funkcije pri povratku napajanja

Pošto je sve vreme bio dat nalog za uključenje prekidača, čim je napon dosegao dovoljnu vrednost zaštita od preniskog napona se resetovala i dopustila uključenje prekidača. To se desilo pri približno 12,4V što se slaže sa kataloškim vrednostima. Razlika od 1V, što je histerezis komparatora, postoji zbog zaštite od električnog šuma. Na slikama 6 i 7. su prikazani isti grafici kao i na slikama 4 i 5. uz dodatak signala sa pina UVLO na integriranom kolu. Dati pin služi da signalizira upravljačkoj elektronici da je došlo do odrade zaštite od preniskog napona napajanja. Pošto je ovaj izlaz negiran, kada proradi zaštita njegov izlaz je logičko 0 (0 V), a inače je napon napajanja (+5V). Na slikama je ovaj signal plave boje, napon napajanja je žute boje a napon gejt-emiter je ljubičaste boje. Sa slike 6. vidimo da se pri odradi zaštite prvo isključuje prekidač pa onda signalizira preko pina UVLO. Razmak između ove dve akcije je oko 8,5 μ s što je i očekivano. Pri podizanju napona prvo se uključi prekidač (ako postoji nalog) a onda se signalizira sa kašnjanjem od oko 12,5 μ s (slika 7.).



Slika 6. Snimak signalizacije preko UVLO pina pri nestanku napajanja

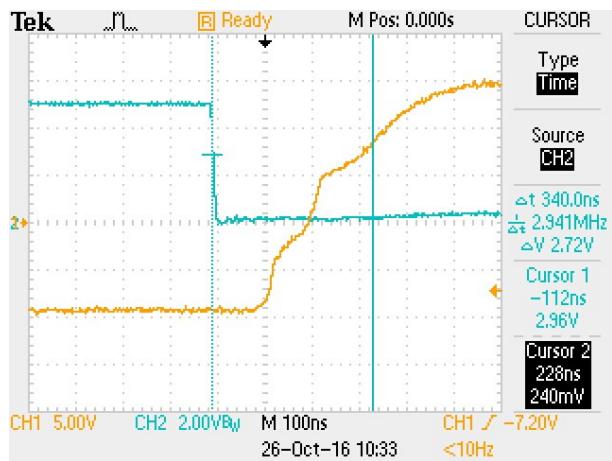


Slika 7. Snimak signalizacije preko \overline{UVLO} pina pri povratku napajanja

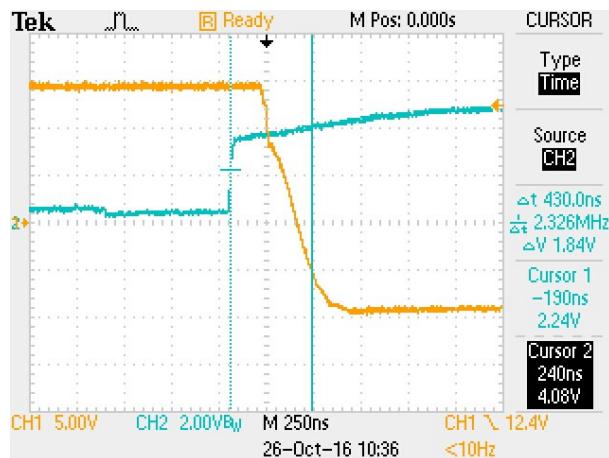
Ovim eksperimentom i njegovim rezultatima je potvrđen ispravan rad zaštite.

3.2 Ispitivanje prenosne karakteristike

U sledećem eksperimentu je potrebno ispitati da li i sa kolikim kašnjenjem dolazi do prenosa komande za uključenje prekidača od ulaza na izlaz (gejt prekidača). Komanda za uključenje prekidača se izdaje dovođenjem pina **CATHODE** integrisanog kola na nulti potencijal ulaznog komandnog napona (negativna logika). Komanda za isključenje se izdaje odvajanjem datog ulaza od nultog potencijala (*floating input*). Prenos komande se utvrđuje posmatranjem napona gejt-emiter. Na slici 8. je prikazan odziv izlaza (žuti trag) pri izdatoj komandi za uključenje (plavi trag). Vidi se da je vreme propagacije signala oko 340ns. Pri isključivanju prekidača (slika 9.) kašnjenje takođe iznosi oko 340ns. Kašnjenje je prouzrokovano propagacijom signala kroz integrisano kolo ali i kroz pojačavački tranzistor na izlazu.



Slika 8. Snimak prenosne karakteristike ulaz-izlaz pri uključenju prekidača

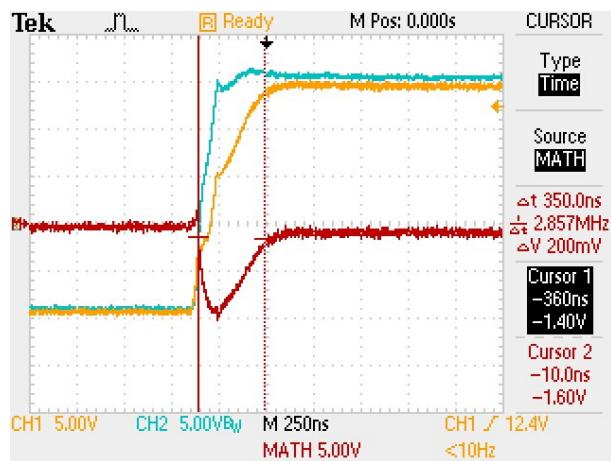


Slika 9. Snimak prenosne karakteristike ulaz-izlaz pri isključenju prekidača

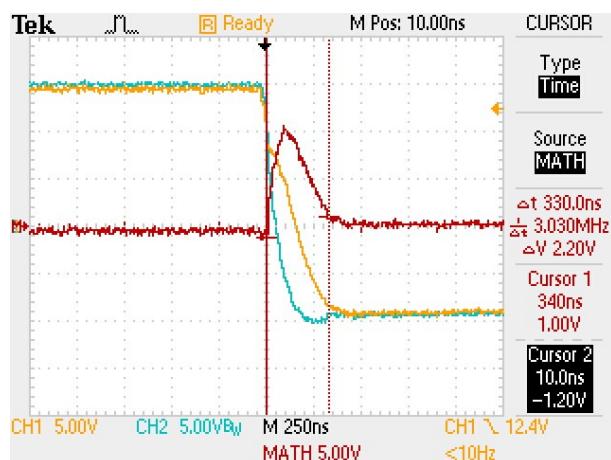
3.3 Ispitivanje izlazne karakteristike

Sledeća važna karakteristika je struja gejta pri uključenju i isključenju prekidača. Ona je impulsnog oblika, kratkog trajanja i velike vršne vrednosti koja je određena vrednošću otpora u kolu gejta. Na slikama 10 i 11 su prikazani naponi sa obe strane otpornika R_{13} otpornosti 5Ω (plavi i žuti trag), a njihova razlika je prikazana kao crveni trag. Na obe slike je smer struje gejta od prekidača ka upaljačkom kolu. Vidi se da je u oba slučaja vršna vrednost razlike napona oko 10V što odgovara struji od 2A. Prelazni

proces traje oko 330ns u oba slučaja. Talasni oblik je zadovoljavajući i u skladu sa očekivanjima.



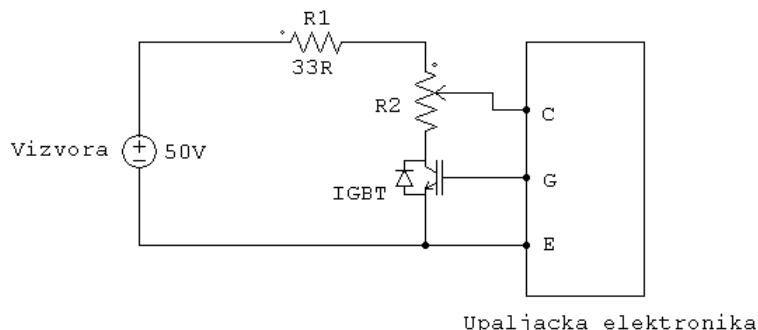
Slika 10. Snimak izlazne struje – struje gejta indirektno preko napona pri uključivanju IGBTa



Slika 11. Snimak izlazne struje – struje gejta indirektno preko napona pri isključivanju IGBTa

3.4 Ispitivanje zaštite od prevelike struje detekcijom desaturacije prekidača

Jedna od najvažnijih zaštita koje su implementirane na velikom broju integrisanih kola za upaljačku elektroniku, kao i na kolu koje koristimo u ovom radu, jeste zaštita od prevelike struje kroz prekidač. Pri struji kratkog spoja, koja može biti nekoliko puta veća od nominalne struje prekidača, dolazi do porasta napona kolektor-emiter (desaturacija). Praćenjem napona kolektor-emiter se vrši posredna zaštita od prekostruje. Kada taj napon pređe graničnu vrednost (7V za AVAGO ACPL-337J) integrisano kolo isključuje prekidač i preko FAULT pina daje informaciju upravljačkoj elektronici o odradi zaštite [4]. Istovremeno, isključenje prekidača se vrši usporeno, da ne bi došlo do velikih promena struje (di/dt) i pojave nedozvoljenog prenapona između kolektora i emitera. Slika 12. prikazuje osnovnu šemu vezivanja pri ispitivanju ove zaštitne funkcije. Prekidač ima nalog za uključenje, struja malog intenziteta se uspostavlja kroz kolo, a na ulaz za praćenje desaturacije je doveden izvod sa klizača potenciometra R_2 . Simuliranje desaturacije je izvedeno promenom pozicije klizača od minimalnog ka maksimalnom (podešavanje simuliranog napona kolektora).



Slika 12. Šema vezivanja pri ispitivanju zaštite od prevelike struje

Sa slike 1. se vidi da je na red sa DESAT pinom postavljen otpornik R_8 od $1\text{k}\Omega$, jedna zener dioda D_3 i dioda D_4 . Na kartici koja je ispitivana je postavljen otpornik i dioda D_4 . Ovo je urađeno da bi se smanjio prag delovanja zaštite od prevelike struje (za vrednost pada napona na diodi i otporniku). Ovim izmenama se očekuje prag delovanja pri naponu kolektor-emiter od oko 5,6V.

Na slici 13. je prikazan snimak delovanja zaštite. Žuti trag je napon na gejtu prekidača, plavi trag je signal na pinu FAULT kojim čip obaveštava ostatak sistema o odradi zaštite, a ljubičasti trag je napon kolektor-emiter. Pomeranjem klizača i dostizanjem simuliranog napona kolektora oko 5,6V je

došlo do odrade zaštite i usporenog gašenja prekidača. Prelazni proces traje oko $2,5\mu s$ što je značajno sporije od regularnog gašenja.

U nekim aplikacijama je implementirana zaštita od prevelike struje prekidača kao odvojen sistem koji je nezavisan od integrisanog kola upaljačke elektronike. U tom slučaju se blokiranje zaštite od desaturacije, ukoliko više nije potrebna, vrši postavljanjem DESAT pina na 0V (VE) pomoću kratkospojnika. U korišćenoj šemi to nije slučaj jer je bila potreba za datom zaštitom.



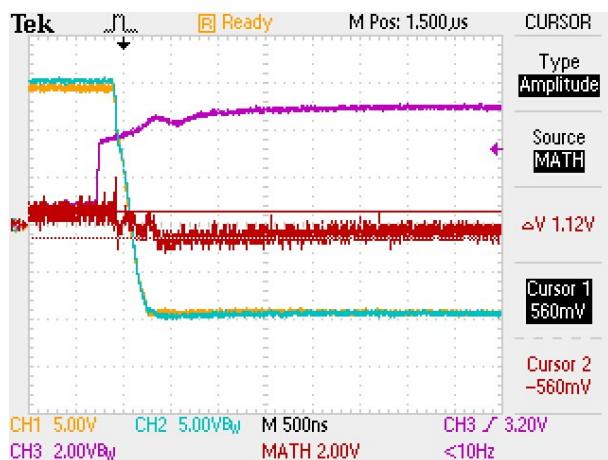
Slika 13. Snimak delovanja zaštite od prevelike struje

3.5 Ispitivanje zaštite od neželjenog uključivanja prekidača – Active Miller Clamp

Pri isključivanju prekidača, usled pojave velike strmine napona (dv/dt) kolektora, kroz Milerovu kapacitivnost kolektor-gejt spoja se javlja struja koja može u nekim slučajevima neželjeno uključiti prekidač. To bi dovelo do kratkog spoja na mostu kojim se upravlja. Da bi se to sprečilo ugrađena je zaštita koja prati napon gejta. Kada se prekidač isključuje i napon gejta padne ispod nekog nivoa (2V iznad negativnog napona napajanja izlaznog stepena), V_{clamp} pin aktivira kratko spajanje gejta na negativni napon (-8V) pomoću tranzistora koji preuzima struju Milerovog kapaciteta i tako sprečava neželjeno uključivanje prekidača. Pri nalogu za uključenje prekidača V_{clamp} pin prelazi u stanje velike impedanse i ne utiče na kontrolu napona gejta. Na slici 1. je prikazan dodatni pnp tranzistor u kolu zaštite koji se koristi kao strujni pojačavač pri dejstvu ove funkcije. Na slici 14. je prikazan napon V_{clamp} pina (plavi trag), napon gejta (žuti trag), nalog za komandovanje prekidačem (ljubičasti trag), kao i napon baza-emiter pnp tranzistora (crveni trag). Vidi se

da pri naponu gejta bliskom -8V dolazi do pojave negativnog napona (približno 1,2V) baze pnp tranzistora. Ovo se dešava jer V_{clamp} pin pri naponu gejta manjem od -6V uključi unutrašnji MOS tranzistor koji preko pnp tranzistora dovodi napon gejta na -8V. Ovo potvrđuje da je ova zaštita aktivirana i sprečava uključenje sve do sledeće komande za uključenje prekidača.

Kada ne postoji potreba za ovom zaštitnom funkcijom njeno blokiranje se vrši spajanjem V_{clamp} pina sa VEE2 naponom, što je u našem slučaju -8V. To se radi pomoću kratkospojnika, pri čemu se raskida veza baza pnp tranzistora – gejt prekidača a na emiter tranzistora se dovodi VEE2 (-8V). U ovom slučaju to nije urađeno jer postoji potreba za datom zaštitom.



Slika 14. Snimak delovanja Active Miller Clamp-a

4. Zaključak

U ovom radu je prikazano ispitivanje novog upaljačkog kola IGBT prekidača razvijenog u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla“. Ovo tehničko rešenje je realizovano od strane domaćih inženjera specijalista za energetsku elektroniku zbog potrebe za raspolaganjem jednim pouzdanim i ekonomičnim rešenjem u novorazvijenim uređajima. Razvijeni upaljač je baziran na specijalizovanom integrisanom kolu sa većim brojem ugrađenih funkcija.

U nedostatku standardne procedure za ispitivanje upaljačkih kola definisan je niz radnji sa ciljem verifikacije funkcija neophodnih za sigurno upravljanje IGBT prekidačem. Provereno je ponašanje upaljača pri poremećaju u napajanju, pri prenosu komandnog signala, ponašanje izlaznog stepena pri komandovanju, delovanje zaštite od desaturacije kao i delovanje zaštite od neželjenog uključenja pri gašenju prekidača.

Rezultati ispitivanja pokazuju da je ponašanje novog upaljačkog kola u skladu sa očekivanim vrednostima te da je novo rešenje uporedivo sa tipskim rešenjima koja se mogu naći na tržištu i da se može koristiti kao njihova zamena u novim uređajima. Prva primena je realizovana na pretvaraču podizaču napona snage 20kW.

Zahvalnica

Rad je nastao u okviru projekta TR33020, „Povećanje energetske efikasnosti hidroelektrana i termoelektrana Elektroprivrede Srbije razvojem tehnologije i uređaja energetske elektronike za regulaciju i automatizaciju“, koji je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Literatura

- [1] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Application, and Design*, John Wiley & Sons, 2003.
- [2] Application Note AND9072/D – ON Semiconductor, Effect of Gate-Emitter Voltage on Turn on Losses and Short Circuit Capability.
- [3] Application Note 5324 – AVAGO, Desaturation Fault Detection.
- [4] Datasheet ACPL-337J - AVAGO
- [5] Application Note 5314 – AVAGO, Active Miller Clamp.

Abstract. This paper presents a novel single-channel IGBT driver circuit together with a procedure for testing and verification. It is based on a specialized integrated circuit with complete range of protective functions. Experiments are performed to test and verify its behaviour. Experimental results are presented in the form of oscilloscope recordings. It is concluded that the new driver circuit is compatible with modern IGBT transistors and power converter demands and that it can be applied in new designs. It is a part of new 20kW industrial-grade boost converter.

Keywords: driver circuit, power switch, IGBT transistor, integrated circuit, undervoltage lockout, desaturation

Testing and verification of a novel single-channel IGBT driver circuit

Milan Lukić, Predrag Ninković

Rad primljen u uredništvo: 04.11.2016. godine.

Rad prihvaćen: 05.12.2016. godine.