

Relejna zaštita motora bez četkica

Matej Kolarik¹, Neven Janko²

¹ mag.ing.el; Istarsko veleučilište, Riva 6, Pula, Hrvatska; mkolarik@iv.hr

² student; Istarsko veleučilište, Riva 6, Pula, Hrvatska; njanko@iv.hr

Sažetak

Sve učestalija upotreba električnih motora traži inovativne i učinkovitije električne motore koji će moći udovoljiti zahtjevima pogona. Za uređaje kojima je potrebna snaga do nekoliko stotina watta kao dobro rješenje služe istosmjerni električni motori bez četkica (engl. brushless). Razvojem jakih permanentnih magneta došlo je do povećanja snage električnih motora bez četkica, čije snage prelaze razinu od nekoliko kilowatta te se počinju upotrebljavati u transportne svrhe kao što su paletari za skladišta, bespilotne letjelice, električni romobili, bicikli i tomu slična prijevozna sredstva. Pogoni motorima bez četkica postali su lako dostupni te je važno osigurati da takvi pogoni budu sigurni za korištenje. U radu su opisani tipovi zaštite „brushless“ motora s aspekta relejne zaštite koja detektira promjene u električnim krugovima te djeluje na isključenje pogona prije trajnog oštećenja mehaničkih dijelova, pregrijavanja ili zapaljenja motora.

Ključne riječi: Relejna zaštita, kratki spoj, BLDC, STFT, ANFIS

1. Uvod

Prema Bačiću (2019), „postoje dvije najčešće definicije istosmjernog motora bez četkica. Jedna od njih govori da je istosmjerni motor bez četkica BLDC (eng. Brushless Direct Current Motor) samo onaj motor koji prima kvadratni signal, dok se motori koji su pokretani sinusnim signalom trebaju zvati sinkronim motorima s trajnim magnetima PMSM (eng. Permanent Magnet Synchronous Motor).“ BLDC motor definiran je kao tip samosinkronog rotacijskog motora kojim upravlja elektronička komutacija, gdje je rotor trajni magnet sa senzorima položaja rotora, a povezani komutacijski krug može biti neovisan ili integriran u motor. U sinkronom motoru, namotaji statora isti su kao u indukcijskom motoru, a spajanjem na trofazno

napajanje stvara se okretno magnetsko polje. Motor se sastoji od trajnih magneta koji su dizajnirani na način da se rotor usklađuje s okretnim magnetskim poljem koje stvara stator. Okretno magnetsko polje tvori se naizmjeničnim protokom struje kroz namotaje na statoru. Strujom kroz namotaje upravljaju sklopke te se pravilnim redoslijedom uključivanja tvori okretno magnetsko polje. U nastavku rada detaljnije je prikazan način rada sklopki. Kod motora je važno pratiti poziciju rotora kako bi okretno magnetsko polje i rotor bili u sinkronizmu. Rotor će se vrtjeti istom brzinom kao i okretno magnetno polje, unatoč varijacijama opterećenja.

Prednost takvog dizajna jest visoka učinkovitost, zbog iskorištavanja maksimalnog momenta motora. Druga prednost je mogućnost preciznog

upravljanja položajem rotora za potrebe pogona u kojem je važan trenutni kut rotora, što se ostvaruje Hallovim senzorom koji daje precizan položaja rotora te jednostavnim upravljanjem inverterom pomoću poluvodičkih elemenata. Prethodno navedeno omogućuje smanjenje potrošnje električne energije te smanjenje pojave topline, što produljuje vijek baterije i motora. Glavni razlog smanjene buke i topline je u tome što motor nema četkica, odnosno nema dodatnog trenja na rotoru i iskrenja pri komutaciji namotaja. Zbog svih navedenih prednosti, ovaj tip motora ima vrlo široku primjenu.

Za široku primjenu motora potrebno je osigurati sustave mehaničke zaštite i elektrotehničke zaštite kako bi se zaštitilo korisnika i okruženje od negativnih posljedica kao što su blokiranje rotirajućeg dijela motora, zapaljenja, eksplozije i sličnih događaja.

2. Kvarovi na električnim motorima

Poznato je da električni motori koriste izmjenični napon ili istosmjerni napon kako bi se protjecanjem struje kroz magnetno polje rezultirala silom na rotirajućem dijelu motora. Korištenjem električne energije dovodi se do opasnosti od zapaljenja motora uslijed visoke temperature te kratkih spojeva, što rezultira visokim strujama, velikim silama unutar motora te iskrenjem. Prema preglednome radu Nandi i sur. (2005) navode kako su se u povijesti proizvođači i korisnici oslanjali na jednostavnije zaštite kao što su nadstrujne, nadnaponske ili zemljospojne električne zaštite. Razvojem tehnologije došlo je i do kvalitetnijih metoda dijagnostike kvarova. U svojoj knjizi Vas (1993) navodi klasifikaciju glavnih grešaka na električnim pogonima:

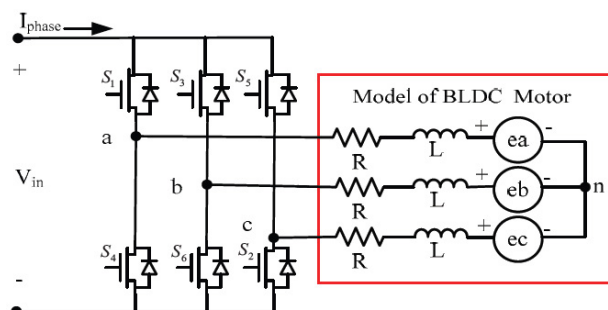
1. Kvarovi statora pri kojem dolazi do prekidanja ili kratkospajanja faznih namotaja,
2. Nepravilan spoj namotaja na statoru,
3. Puknuće ili napuknuće osovine rotora,
4. Nepravilan promjenjivi zračni raspored,
5. Savijeno vratilo pri kojem dolazi do mehaničkih oštećenja statora odnosno ribanja,
6. Kratki spoj namotaja na rotoru,
7. Kvar ležajeva i prijenosnih mehanizama.

Za detektiranje navedenih kvarova osmišljene su raznovrsne metode koje su navedene u radu Nandi i sur. (2005) te su najznačajnije:

1. Nadzor elektromagnetnog polja,
2. Mjerenje temperature pojedinih dijelova motora,
3. Nadzor radio-frekvencijskih emisija,
4. Nadzor buke i vibracija,
5. Kemijska analiza,
6. Analiza motorno-strujne karakteristike (MCSA)
7. Modeli, umjetna inteligencija i tehnike bazirane na neurološko mrežnim tehnikama.

Prije nego što je predstavljena problematika električnih kvarova u strujnim krugovima „brushless“ motora, potrebno je opisati princip rada. Na slici 1 je prikazan model „brushless“ motora koji ima tri statorska namotaja u spoju zvijezde za stvaranje magnetnog polja.

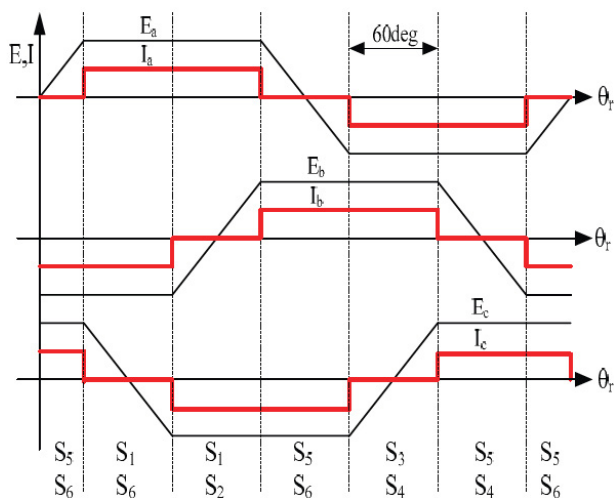
Slika 1. Model „brushless“ motora s upravljivim pogonskim sklopom



Izvor: Feyzi i sur. 2011.

U donjem dijelu Slike 2 prikazan je raspored uključivanja pojedinih sklopki koje tvore strujni krug kroz namotaje statora te u svakom trenutku prolazi struja kroz dva namotaja. Prikazanim rasporedom rada sklopki stvara se okretno magnetno polje. Oblik napona i struje je pravokutnog odnosno trapeznog oblika zbog istosmjernog izvora napona te ograničenosti sklopki da uobličuju napon. Zbog isprekidanog toka struja dolazi do neujednačenog momenta na izlazu osovine za razliku od motora sa sinusnim valnim oblikom.

Slika 2. Oblik napona i struje kroz namotaje na statoru



Feyzi i sur. 2011.

„Brushless“ motori robusniji su od istosmjernog motora s četkicama zato što nema armaturne namotaje koje je potrebno hladiti i na kojima može doći do kratkog spoja. Uz prethodno navedeno ne može doći do iskrenja, pretjeranog grijanja ili kratkog spoja na četkicama i komutatoru te nema potrebe za održavanjem četkica i komutatora. Stoga je za „brushless“ motore potrebno promatrati samo pogonski sklop sa sklopkama i namotaje na statoru koji tvore okretno magnetno polje.

2.1. Kratki spoj pogonskog sklopa

Na Slici 1 s lijeve strane prikazan je pogonski sklop koji se sastoji od šest upravljivih tranzistora. Važno je osigurati da ne dođe do istovremenog uključivanja sklopke S_1 - S_4 , S_2 - S_5 ili S_3 - S_6 , što bi dovelo do kratkog spoja istosmjernog napona izvora. Mogući scenariji su da dođe do kvara na upravljačkom sklopku ili da sklopka ne uspije isključiti protok struje. Prilikom kratkog spoja sklopa ne može isključiti tok struje zbog velike količine energije koja struji kroz sklopku i ne može prekinuti kratki spoj i velika je vjerojatnost da sklopke budu uništene. Za zaštitu od kratkog spoja potrebno je ugraditi istosmjerni dvopolni automatski minijaturni

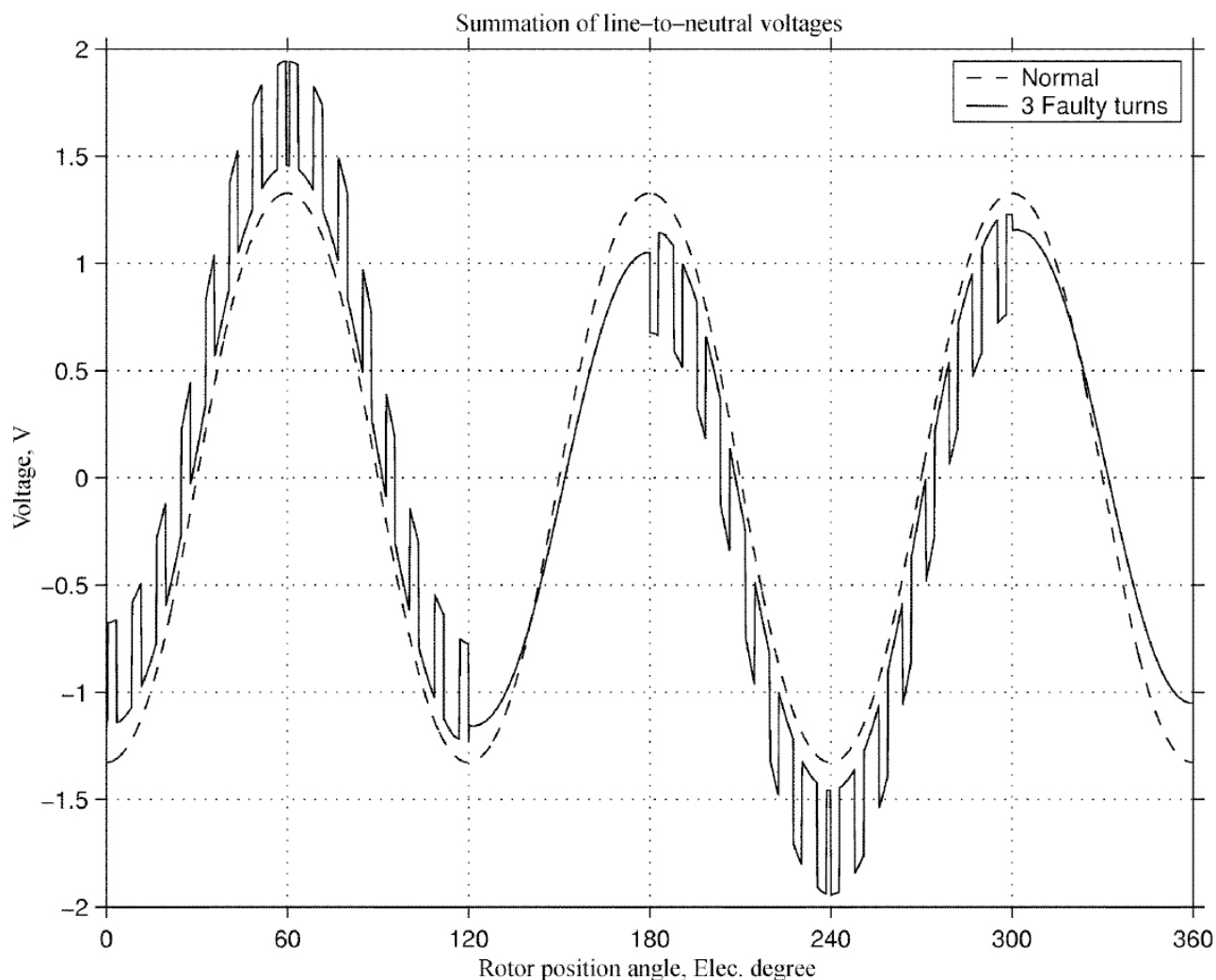
prekidač između istosmjernog izvora odnosno baterije i pogonskog sklopa. Za uređaje veće snage preporučuje se ugradnja numeričkog višefunkcijskog releja s mogućnošću aktiviranja nadstrujnih zaštita, mjerenja temperature i konfiguriranje uvjetovanih uklopa i isklopa, na način da djeluje na upravljivi glavni prekidač.

2.2. Kratki spoj namotaja na statoru

U svojem radu Awadallah i sur.(2005) navode da je 30-40% svih kvarova električnih motora nastalo zbog kratkog spoja statorskih namotaja. Pri kratkom spoju namotaja statora dolazi do visokih struja koje pretjerano zagrijavaju motor i oslabljuju ostale dijelove izolacije te kvar može prerasti u veći kratki spoj. Za detekciju kvarova i nepravilnosti predlaže se nadziranje oblika struje iz istosmjernog izvora. Nadzorom valnog oblika struje i napona može se dijagnosticirati štetnost kvara i alarmirati korisnika ili trenutno isključiti pogon. Na Slici 3 isprekidanom je linijom prikazan oblik napona u ispravnome stanju dok je punom linijom prikazan napon pri stanju kvara. Razvidno je da naponski oblik ima velikih izobličenja, ali motor bi funkcionirao u ovakvom stanju kvara, zato što napon nije pao na nulu zbog manjeg broja namotaja, preciznije rečeno, tri namotaja koji su u kratkom spoju. Pri kvaru na namotajima dolazi do nesimetričnog oblika napona i naglih promjena, što rezultira neujednačenim momentom i opterećenjem rotora.

Za manje kvarove motor može ostati u pogonu ako je rad motora iznimno važan, ali je potrebno alarmirati operatora i započeti ciklus zaustavljanja. Prema radu Awadallah i sur. (2005.) sustavi za dijagnostiku kvara koji se koriste su diskretna Fourierova transformacija DFT i brza Fourierova transformacija STFT (eng. Short Time Fourier Transform) koje nadziru oblik faznog napona i indiciraju na postojanje kvara. Nakon indikacije kvara, koriste se drugi prilagodljivi neuro-fuzzy sustavi za smetnje – ANFIS (eng. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems) koji utvrđuju kvar, broj namota u kratkom spoju i fazu na kojoj je kvar.

Slika 3. Primjer izobličenja napona pri kratkom spoju 3 namota u jednoj fazi



Izvor: Awadallah i sur. 2005.

2.3. Nadstrujne i nadnaponske zaštite pogona „brushless“ motora

Osim prethodno iznesenih potencijalnih kvarova, potrebno je zaštititi pogon od velikih i dugotrajnih struja, za što se koristi nadstrujna zaštita. Pogon obuhvaća napajanje, upravljanje, pogonski sklop i „brushless“ motor. Pri pokretanju motora s velikim opterećenjem može doći do velikih iznosa struja što zagrijava cijeli pogon pa je potrebno pratiti iznose struja i vrijeme trajanja. Prema tehničkim uputama ABB-a (2022.) nadstrujnu zaštitu moguće je ostvariti s istim uređajem kao i za kratkospojnu zaštitu, ali je potrebno odrediti zasebni stupanj zaštite koja će reagirati pri manjim iznosima struje od kratkog spoja te s većim vremenom koje može biti u rasponu od više sekundi, dok se za kratki

spoj kvar mora isključiti unutar vremena od jedne sekunde.

U slučaju kada motor na svojem rotoru dobiva energiju od vanjskog mehanizma i nastoji ubrzati, tada pokušava preći u generatorski režim rada, što znači da se unutar pogona pojavljuju brzi prenaponi na koje je potrebno djelovati brzim vremenom. Napon u pogonu može značajno porasti u nekoliko milisekundi. Ako se ne odvede energija uzrokovana generatorskim režimom rada, doći će do probijanja izolacije, sklopki ili kondenzatora u strujnome krugu. Za odvođenje energije koristi se zaseban međukrug u kojem se između plus i minus pola napajanja pogonskog sklopa ugrađuje kočni otpornik i poseban tranzistor koji će moći brzo reagirati u slučaju povećanja napona. Mehanički sustavi pomoćnih releja sa zavojnicom i

kontaktima spori su za potrebe odvođenja energija gdje je njihova vrijednost reagiranja približno 40 ms, što je nedovoljno za ovaj sustav. Vremensko zatezanje tranzistora u međukrugu prema Wangu (2019) iznosi 5ms, kako ne bi došlo do učestale prorade tranzistora i zagrijavanja kočnog otpornika pri svakome kratkotrajnom prenaponu.

3. Zaključak

Brushless motori zajedno sa cjelokupnim pogonima robusni su sustavi. Zbog široke primjene i velikog broja radnih sati, gotovo na svakome pogonu doći će do kvarova. Važno je imati sustave za dijagnostiku kvara i sustave za isključivanje kvara. Prema prethodno navedenim prijedlozima, kvalitetna rješenja su sustavi s diskretnom Fourierovom transformacijom DFT, brzom Fourierovom transformacijom STFT za brzu indikaciju postojanja kvara te sustav ANFIS koji detaljno utvrđuje kvar, broj namota u kratkom spoju i fazu u kvaru. Uz napredne sustave dijagnostike tu su jednostavni sustavi za isključenje motora i sklopnog pogona pri pojavi kratkih spojeva i preopterećenja koja su indirektno praćena numeričkim relejem koji mjeri struju i djeluje na prekidač pogona. Za nadnaponske zaštite koristi se istosmjerni međukrug koji se aktivira u nekoliko milisekundi putem posebnog tranzistora te se električna energija prenapona troši na kočnome otporniku. „Brushless“ motori imaju velik potencijal za razvoj i još svestraniju primjenu nakon pronalazjenja jačih magneta. Jedna od najvećih prepreka do prije nekoliko godina bila je slabost permanentnih magneta. Nakon spajanja legure neodimijum-željezo-bor permanentni magneti postaju značajno jači te se prema radu Purwadia i sur. (2013) počinju koristiti za manja vozila snage do 10 kW. Pri većim snagama motora trebat će se koristiti više dijagnostičkih sustava kako bi se spriječili štetni događaji.

Popis literature i izvora

- ABB Grupa (2022.), *Relion Protection and Control 620 Series Technical Manual*. Revizija H, izdanje 4.2.2022.
- Awadallah, M. A. i Morcos, M. M. (2005.) *Diagnosis of Stator Short Circuits in Brushless DC Motors by Monitoring Phase Voltages*. *IEEE Transactions On Energy Conversion*. DOI: 10.1109/TEC.2004.841524.
- Bačić, I. (2019). *Upravljački sklop za BLDC motor, Završni rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek*.
- Feysi, M. R., Ebadpour, M., Mozaffari Niapour, S. A. KH. (2011). *A New Single Current Strategy for High-Performance Brushless DC Motor Drives*. *IEEE CCECE*., DOI: 10.1109/CCECE.2011.6030485.
- Nandi, S., Toliyat, H. A., Li, X. (2005). *Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors*. DOI: 10.1109/TEC.2005.847955.
- Purwadi, A., Dozeno, J., Heryana, N. (2013). *Testing Performance of 10 kW BLDC Motor and LiFePO4 Battery on ITB-1 Electric Car Prototype*. *The 4th International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI 2013)*. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.12.296.
- Vas, P. (1993). *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*. Oxford, U.K.: Clarendon. ISBN-13: 978-0198593751.
- Wang, W. i Wang, J. (2019). *Dynamic Response Enhancement and Fault Protection of Boost Converter-Fed Brushless DC Motor in Aerospace Applications*. *Journal of Applied Sciences*. DOI: 10.3390/app9102113.

Abstract

The increasing use of electric motors requires innovative and more efficient electric motors that would be able to meet the requirements of the drive. For devices that require power up to several hundred watts, brushless DC electric motors are a good solution. The development of strong permanent magnets has led to an increase in the power of brushless electric motors whose power exceeds few kilowatts and which started to be used for transport purposes such as storage pallets, drones, electric scooters, bicycles and similar vehicles. Brushless motor drives have become very available and it is important to ensure that such drives are safe to use. The paper describes the types of brushless motor protection from the aspect of relay protection that detects changes in electrical circuits and forces to shut down the drive before permanent damage to mechanical parts, overheating or ignition of the motor.

Keywords: Relay protection, short circuit, BLDC, STFT, ANFIS