Božidar Bjelica,
dipl. inž.

UPUŠTAČI ZA MOTORE JEDNOSMJERNE STRUJE

Za vrijeme puštanja motora jednosmjerne struje u rad javljaju se velike struje koje su štetne i za motor i za ostalu instalaciju. Problem se uspješno rješava poluprovodničkim upuštačima. U radu su data neka, moguća rješenja i rezultati mjerenja na jednom realizovanom upuštaču.

Uvod

Upuštanja motora, direktno povezanog na izvor, mogu izazvati, naročito za slučaj motora nešto većih snaga, negativna dejstva na izvor za napajanje, na sam motor, pa i instalaciju. Polazna struja motora jednosmjerne struje je nekoliko puta veća od nazivne (za neke motore i preko 10 puta), što naročito nepovoljno djeluje na kolektor i četkice i oštećuje ih. U ovom periodu je i zagrijavanje mašine višestruko veće (proporcionalno je sa kvadratom struje), a to se negativno odražava na kvalitet (starenje) izolacije namotaja. Ukoliko je izvor za napajanje akumulatorska baterija, a to je čest slučaj za sredstva NVO, sam proces pokretanja motora za nju predstavlja skoro kratak spoj. Nepotrebno je posebno naglašavati koliko se to negativno odražava na karakteristike i eksploatacioni vijek same baterije. Za vrijeme upuštanja na udaru se nalazi kompletna električna instalacija, a naročito prekidački elementi (kontaktori, prekidači). Pad napona u instalaciji za vrijeme upuštanja mogao bi izazvati posljedice za ostale uređaje koji se napajaju sa iste mreže, odnosno izvora, a posebno su osjetljivi elektronski sklopovi. Ukoliko je riječ o nekom intermitentnom pogonu sa čestim uključenjima, onda je jasno koliko bi sva ova naprezanja uticala na radni vijek poje-

dinih dijelova uređaja i cijelih komponenti, kao i na pouzdanost kompletnog elektromotornog pogona. Kod DC motora sa stalnim magnetima visoka vrijednost struje može dovesti do njihove demagnetizacije, pa je to još jedna moguća, negativna posljedica od upuštanja.

Rješenje pobrojanih problema kvalitetno i pouzdano rješava upuštač sa poluprovodničkim elementima. U okviru ovog uređaja se relativno prosto može uraditi višestruka i efikasna zaštita motora (od preopterećenja, kratkog spoja, pregrijavanja i sl.), a time i ostale instalacije. Sem toga, a u zavisnosti od namjene motora, isti uređaj bi se mogao koristiti i kao regulator brzine obrtanja.

Ranije su se za upuštanje motora, odnosno ograničenje struje u tom periodu, koristili tzv. otpornički upuštači. To su otpornici sačinjeni od nekoliko segmenata, dimenzionisani za kratkotrajni rad, koji su se vezivali na red sa induktom. Proces je počinjao sa ukupnom otpornošću, potom se smanjivao broj segmenata, a na kraju bi se upuštač potpuno isključio.

Čoper spuštač napona kao upuštač

Princip rada čopera spuštača napona je poznat i daće se samo, ukratko,

a)

b)

Sl. 1

a) Principijelna shema čopera sa R, L opterećenjem
b) Vremenski dijagram napona i struje

ono što je zanimljivo sa aspekta upuštanja. Neka se idealni prekidač P na shemi sa sl. 1a periodično otvara i zatvara, sa vremenom uključenosti t_u i isključenosti t_i . Napon na opterećenju će imati oblik pravougaonih impulsa amplitude V kao na sl. 1b, a srednja vrijednost tog napona je:

$$U_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T U dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_u} V dt = \frac{t_u}{T} V. \quad (1)$$

Znači, promjenom vremena t_u i t_i , odnosno, upravljačkih impulsa na prekidaču P može se regulisati napon na opterećenju. Odnos $\delta = t_u/T$ se, obično, zove faktor ispunjenosti. Kad se upravljanje vrši promjenom dužine (širine) vremena uključenosti, a pri tom je period $T = \text{const}$, riječ je o širinsko-impulsnom upravljanju, a ako je trajanje impulsa $t_u = \text{const}$, a mijenja se njihova frekvencija $f = 1/T$, onda je to frekventno-impulsno upravljanje. Nekada se regulisanje vrši kombinovano, promjenom oba ova parametra.

Prekidanje strujnog kruga dovodi do pojave prenapona zbog nagomilane energije u induktivnosti L , pa je paralelno opterećenju ubačena zamajna (nul-) dioda D . U nekom kvazistacionarnom stanju za $\delta = \text{const}$, za vrijeme t_u struja će rasti eksponencijalno, pošto se radi o R, L opterećenju, sa vremenom konstantom $\tau = L/R$. Kad se prekidač otvori, strujni krug se zatvara preko diode D i struja eksponencijalno opada. Za kontinualnost struje je potrebno da je perioda impulsa T dovoljno manja od vremenske konstante kola τ . (Ako induktivnost opterećenja nije dovoljno velika, potrebna je neka dodatna ili da se poveća frekvencija impulsa, tj. T smanji). Dakle, struja osciluje oko neke srednje vrijednosti I_s .

Ukoliko se analizira situacija sa motorom jednosmjerne struje, npr. sa nezavisnom pobudom, to se može uraditi na istoj shemi, gdje su sada L i R induktivnost i otpornost indukta, a sa njima na red je povezana kontraelektromotorna sila E . Polazeći od jednačina stanja za uključen i isključen prekidač, uz uvažavanje već navedenih pretpostavki, a pošto su mehaničke prelazne pojave mnogo sporije od električnih,

nih, može se smatrati da je brzina obrtanja za kvazistacionarno stanje $n = \text{const}$, a zbog toga je i:

$$E = kn\Phi = k_1 n = \text{const}, \quad (2)$$

pa se za srednju vrijednost struje motora u kvazistacionarnom stanju dobija:

$$I_{sr} = \frac{\delta V - E}{R}. \quad (3)$$

Iz izraza se vidi da struja motora zavisi od faktora δ , tj. može se regulisati njegovom promjenom, što je, u ovim razmatranjima, naročito važno za fazu zaletanja. Postupnim povećanjem faktora ispunjenosti kontrolisano se povećava i struja motora i on se, na taj način, mekano startuje.

Uvrštavajući u relaciju (3) vrijednosti za E iz (2), a budući da je $M_{sr} = c\Phi I_{sr} = c_1 I_{sr}$, to je srednja vrijednost brzine obrtanja:

$$n_{sr} = \delta \frac{V}{k_1} - \frac{M_{sr} R}{k_1 c_1} = \delta n_0 - \Delta n. \quad (4)$$

U gornjoj jednačini je n_0 idealna brzina praznog hoda motora priključenog na napon V , a Δn je pad brzine uslijed opterećenja. Jasno je da se i brzina može regulisati faktorom δ , odnosno promjenom srednje vrijednosti izlaznog napona iz čopera.

Moguće varijante upuštača za DC motore

Kod projektovanja elektromotornih pogona u kojima je potrebno regulisati brzinu obrtanja motora, pretvarač i upravljačka elektronika su, obično, realizovani tako da uspješno rješavaju sve probleme povezane za upuštanje motora. Ovo znači da su upuštači, kao zasebni uređaji, potrebni kod motora gdje ne treba regulisati *relevantne veličine pogona* poluprovodničkim pretvaračima ili se njima upravlja na neki drugi način ili, pak, ako se u-

puštač ugrađuje naknadno. Na sl. 2 su data neka principijelna rješenja upuštača za DC motore. Kao prekidač se može koristiti bilo koja prekidačka poluprovodnička komponenta. Tiristori se primenjuju u čoperima niskih radnih učestanosti, do nekoliko stotina Hz i za struje do nekoliko kA. Tranzistori se koriste u čoperima viših radnih učestanosti — do nekoliko kHz i za struje niže od onih kod tiristora, ali mo-

Sl. 2 — Moguće koncepcije čoperskih upuštača

a — upuštač i regulator broja obrtaja b — upuštač bez dodatne zaštite, c — upuštač sa dodatnom zaštitom

dularne izvedbe tranzistora su im se približile. MOSFET tranzistori se koriste za čopere koji rade na vrlo visokim učestanostima — i do nekoliko stotina kHz, ali za struje dosta niže nego snažni tranzistori. U najnovije vrijeme, kao prekidački elementi, su razvijeni tzv. IGBT tiristori koji po struji imaju karakteristike tiristora, a po radnoj učestanosti tranzistora. Na osnovu ranije izloženog jasno je da se bolji kvalitet

regulacije ima na većim učestanostima. Kao prekidački element tranzistor se sve više koristi, pa je tako simbolično predstavljeno i na shemama.

Čoper na shemi *a* sa sl. 2 radi kao spuštač napona. Kad se upravljačkoj elektronici da signal za start motora, tranzistor se pobuđuje impulsima malog koeficijenta ispune δ . U početnom trenutku je $n=0$, pa je zbog (2) i $E=0$, bez obzira na način pobuđivanja, tj. vrstu mašine (treba poštovati pravilo, gdje je to moguće, da se u rad pušta pobuđen motor). U ovom, početnom periodu, struja bi bila izuzetno velika da je motor direktno povezan na izvor, tj. pun napon. Shodno relaciji (1), odnosno (3), ima se mala vrijednost struje, jer je i faktor δ mali. Postupnim povećanjem ovog faktora raste i struja kroz motor, a, prema izrazu (4), i brzina obrtanja. Dakle, motor se postupno zaleće, tj. ostvaren je i meki start i ograničenje polazne struje. Vrijednost struje se kontroliše pomoću strujnog monitora SM (to može biti bilo koja komponenta ili sklop namijenjen mjerenju struje: LEM, šant i sl.) i stalno se poredi sa zadatom graničnom vrijednošću za polaznu struju, I_{gr1} . Faktor ispunjenosti se mijenja u zavisnosti od razlike ove dvije struje i, normalno, ne dopušta se prekoračenje struje preko granične vrijednosti, odnosno, δ se povećava sve dok se motor ne zaleti. Zbog problema komutacije u motoru I_{gr1} , prema [4], ne treba da je veća od $2I_n$, gde je I_n nominalna struja motora, a tačan iznos zavisi i od uslova u kojima motor radi, tj. od momenta opterećenja pri zaletanju. Kad je faktor ispune dostigao maksimalnu vrijednost (teorijski $\delta=1$), odnosno, motor došao na pun napon, proces upuštanja je završen i poluprovodnička komponenta u kolu napajanja se, zbog eliminacije gubitaka na njoj, može premostiti odgovarajućim kontaktorom, kao što je to predviđeno na shemama *b* i *c* na sl. 2. I nekim drugim kriterijumima se može utvrditi kad je uspješno startovanje završeno. Ovakvim upuštanjem, sa ograničavanjem

struje, povećano je vrijeme zaleta, jer je motoru potrebno predati odgovarajuću energiju za taj prelazni proces, ali su, uz već pomenute prednosti, smanjeni i gubici zaletanja.

Istim čoperom je moguće regulisati i brzinu obrtanja. Shodno tome dio elektronskih kola, pogotovo mjerno-regulacionih, radi u drugačijem režimu, odnosno, pod drugačijim kriterijumima u odnosu na režim pokretanja. Zbog lakšeg razmatranja analizira se kao da je potrebno obrtanje osovine motora u samo jednom smjeru i ne tretira se način pobuđivanja motora. Prema (4), za neku vrijednost faktora ispune se ima određena brzina obrtanja, a struja bi se uspostavljala prema datom opterećenju. Željena vrijednost brzine bi se mogla zadavati kao naponski signal, npr. pomoću potenciometra ili na neki drugi način. Ukoliko se zadovoljavajuća tačnost brzine ne bi mogla postići na ovaj način, tj. u otvorenoj petlji, onda je potrebno ići sa povratnom granom po brzini. Signal sa strujnog monitora se vodi u kolo za zaštitu od preopterećenja i poredi se sa nekom graničnom vrijednošću I_{gr2} ($I_{gr2} < I_{gr1}$). Može se realizovati i zaštita od kratkog spoja dodavanjem odgovarajućeg mjernoregulacionog kola. Takođe se može, ugradnjom temperaturnih davača (Θ_1 , Θ_2) u motor i na hladnjak tranzistora snage, izvršiti i njihova termička zaštita. Za slučaj napajanja iz akumulatorske baterije poželjno bi bilo realizovati i podnaponsku zaštitu, odnosno zaštitu od dubokog pražnjenja baterije. Kola za zaštitu se realizuju da kod njihovog aktiviranja smanjuju struju smanjenjem δ ili skroz ukidaju pobudu tranzistoru ($\delta=0$) i blokiraju ga. Praktične realizacije mogu biti takve da u određenim situacijama automatski povećavaju ili smanjuju granične vrijednosti struje. Način reagovanja zaštite, svakako, zavisi i od važnosti pogona u kome motor radi, tj. od procesa koji se obavlja.

Kao što je već rečeno, ako je potrebno projektovati samo uređaj za u-

puštanje motora, to će se koristiti rješenja principski data na shemama b i c na sl. 2. Ukoliko motor radi na prirodnoj karakteristici i ne postoji zahtjev za dodatnom zaštitom, postupiće se kao u slučaju b: poslije završenog zaletanja motor se preko kontaktora direktno povezuje na izvor. Ako se osim postupnog upuštanja želi uraditi i neka dodatna zaštita (npr. od preopterećenja ili sl.), tad će se usvojiti koncept sa sheme c. Po završenom startu premošćuje se samo poluprovodnički prekidački element i motor spaja direktno na izvor. Uslijed prekoračenja dozvoljene struje ili aktiviranja neke druge zaštite, motor se isključuje sa mreže prekidanjem pobude kontaktora kojim je izvršeno premoštenje.

Sl. 3 — Vremenski dijagram napona i struje kod direktnog upuštanja

Rezultati kod realizovanog upuštača

DC motor sa složenom pobudom snage 1.5 kW ima nominalni napon

24 V i nominalnu struju 90 A (napaja se iz akumulatorske baterije). Sa radnim mehanizmom je povezan centrifugalnom spojnicom, tako da proces zaletanja počinje u praznom hodu, a kod postizanja brzine bliske nazivnoj opterećuje se sa 40 do 50% od nominalnog momenta. Izvršeno je nekoliko mjerenja kod direktnog upuštanja motora, tj. bez upuštača. Maksimalna vrijednost struje je iznosila oko 800 A, pad napona oko 7 V, a vrijeme zaletanja je oko 0.4 sekunde. Na sl. 3 je dat jedan karakterističan snimak. Sasvim je jasno da su ovolika struja i pad napona zahtijevali da se razvije odgovarajući upuštač. Pošto nisu postojali dodatni zahtjevi za zaštitu, to je realizovan upuštač koncepcije b (sl. 2), a principijelna blok shema je data na sl. 4.

Tranzistorom snage u kolu napajanja motora se upravlja širinsko-impulsnim modulatorom (ŠIM) frekvencije oko $f=1$ kHz. Sam tranzistor je modul sa tranzistorima u Darlingtonovom spoju i sa zamajnom diodom, a kolom za prigušenje (*snubber*) se štiti od prenapona. Signal za uključenje motora (START) istovremeno startuje ŠIM i vremensko kolo (T_k). Impulsima iz modulatora se pobuđuje tranzistor, tj. on periodično vodi i ne vodi. Postupnim povećanjem vremena vođenja se povećava i srednja struja i napon motora (vidi sl. 5 i sl. 6). Strujni monitor je ovdje obični šant i pomoću njega i kola za praćenje — mjerenje struje (PS) se, kao što je već rečeno, ograničava struja; u ovom slučaju na maksimalnu moguću vrijednost od 200 A (približno $2I_n$). Ostavljena je mogućnost da se granična struja pomoću potencijometra može podešavati u određenom opsegu ispod ove vrijednosti. Kada se dostigne maksimalna vrijednost faktora ispunjenosti δ , odnosno, kad impulsi dostignu maksimalnu širinu, što se registruje u kolu za praćenje impulsa (PI), ovo kolo istovremeno daje komandni signal za uključenje kontaktora i signal za isključenje vremenskog kola. Kontaktor pre-spaja tranzistorski modul i šant i di-

Sl. 4 — Principijelna blok šema realizovanog upuštača

rektno povezuje motor na akumulatorsku bateriju, a kolo T_k stopira rad modulatora. Za 4 do 5 sekundi završeno je upuštanje motora, što se vidi sa vremenskih dijagrama struje i napona motora na sl. 5 i 6. Proces bi se mogao izvršiti i u kraćem vremenskom periodu, ali zbog specifičnih uslova u kojima radi pogon, ostavljena je dovoljna rezerva. Vremenska konstanta kola T_k je 10 sec. Ukoliko za to vrijeme ne dođe do uspješnog starta motora, ovo kolo isključuje ŠIM kolo i trajno, odnosno do slijedećeg signala za uključenje moto-

ra, odvaja ga od akumulatora. Logika vezana za ponovni start, kao i ostala, normalno, može biti realizovana i drugačije, što, svakako, zavisi od konkretnog slučaja. Ukoliko dođe do bilo kakvog kvara na pločici upuštača, ona se vadi i signal START se proslijeđuje na kontaktor, tj. motor se direktno upušta. Pločica na kojoj su smještene sva elektronska kola upuštača je dimenzija 130x90 mm.

Data su dva karakteristična snimka puštanja u rad motora pomoću upuštača: sl. 5 — motor se opterećuje za

vrijeme zaletanja, tj. centrifugalna spojica prenosi moment opterećenja dosta prije dostizanja nazivne brzine obrtanja; sl. 6 — motor se opterećuje pri kraju zaletanja. U oba slučaja se vidi da je, za razliku od sl. 3, struja zaletanja motora ispod limitirane (po-
dešena je na oko 120 A) i mnogo je manja od 800 A i da nema nikakvih uočljivih padova napona, kao što je to slučaj kod direktnog upuštanja. Struja motora I_M je u oba mjerenja snimana preko NF filtra da bi se izbjegla zašumljenost (sličnog je oblika kao ona na sl. 1b, ali zgusnuta i u usponu). Na sl. 5 napon motora U_M je sniman bez filtra. Vidi se da tranzistor stalno prelazi iz stanja potpune provodnosti u stanje

potpune neprovodnosti i obrnuto, tj. na motoru se ima napon akumulatorske baterije U_{ab} u vremenu uključenosti (kad tranzistor vodi), odnosno $U_M=0$, tj. $U_M=U_D$ za vrijeme isključenosti (tranzistor zakočen — ne vodi, a dioda vodi). Na sl. 6 se lijepo vidi srednja vrijednost ovog napona, jer je tu sniman preko NF filtra. Frekvencija impulsa sa snimka na sl. 5 se ne može očitati, jer je snimano sa dosta velikom vremenskom konstantom, a i brzina plotera, kojim je vršeno snimanje, je manja od frekvencije impulsa. U početku, kad je δ malo, tj. vrijeme isključenosti veliko, na snimku se vide i negativne vrijednosti napona na motoru. To je, u stvari, napon na zamajnoj dio-

Sl. 5 — Vremenski dijagram napona i struje kad se koristi upuštač (U_M sniman bez NF filtra)

Sl. 6 — Vremenski dijagram napona i struje kad se koristi upuštač (U_M sniman sa NF filtrom)

di (U_D) dok ona vodi. U tački T_a , kad δ dostigne maksimalnu vrijednost, tranzistoru se stalno daje pobuda, tj. potpuno je provodan i napon motora tu ima jedan skok. U tom trenutku se javlja i strujni pik. Nadalje je napon U_M kontinualan i od napona napajanja U_{ab} je manji za pad napona na tranzistoru i pad napona u napojnim vodovima (Pad napona na tranzistoru, odnosno, napon zasićenja kolektor-emitor za struju od 150 A, prema kataloškim podacima je $V_{CEsat}=2V$). Kontaktor ne prespaja modul trenutno, između ostalog i zbog raznih kašnjenja, a kad se to desi, u trenutku T_b , U_M ima još jedan skok (za V_{CEsat}), koga prati i strujni pik i proces upuštanja pomoću čopera je tad završen.

Zaključak

Poluprovodnički upuštači na bazi čopera vrlo uspješno rješavaju sve probleme vezane za puštanje motora jednosmjerne struje u rad. U okviru ovog uređaja se može, prema predloženim konfiguracijama, dosta jednostavno realizovati i neka dodatna zaštita: od preopterećenja, kratkog spoja, termička, podnaponska itd. Sem toga, stvaraju uslove za bezbjedan rad, u fazi zaletanja, ostalim potrošačima vezanim na isti izvor. Motoru i ostalim elementima pogona (prekidačke komponente, akumulatori...) se produžava radni vijek i smanjuju troškovi održavanja. Upuštači kod motora sa permanentnim mag-

netima onemogućavaju demagnetizaciju za vrijeme starta. Dobra osobina ovih upuštača je što se jedan te isti može koristiti za dosta širok dijapazon struja i snaga, a uz izmjene energetske komponenti (tranzistorski modul, kontaktor, šant) i minimalna podešavanja ili izmjene u elektronskim kolima se može koristiti za bilo koji motor. Na

ovaj način se povećava stepen unifikacije i smanjuju troškovi razvoja.

Dakle, tehnički je opravdano, ali i poželjno, ugraditi upuštače za DC motore nešto većih snaga, gdje problemi pri zaletanju nisu riješeni na odgovarajući način. Kod sredstava NVO to su npr. pogonski motori hidrauličnih servosistema za pokretanje kupola, cijevi artiljerijskih oruđa i sl.

Literatura:

- [1] G. K. Dubey, POWER SEMICONDUCTORS CONTROLLED DRIVES, Prentice-Hall, New Jersey, 1989.
- [2] M. Adžić, Tranzistorski čoper za regulaciju broja obrtaja jednosmernog motora za elektroviljuškar, Zbornik VII savjetovanja Energetska elektronika, Beograd, 1988.

- [3] T. Brodić, ENERGETSKA ELEKTRONIKA, Svjetlost, Sarajevo, 1988.
- [4] B. Mitraković, MAŠINE ZA JEDNOSMERNU STRUJU, Službeni list, Beograd, 1981.
- [5] MITSUBISHI SEMICONDUCTORS — POWER MODUL, 1986.