

Mr. Josip Ungarov, dipl. inž.
SOBR "RADE KONČAR" - ZAGREB
OCUR ELEKTROTEHNIČKI INSTITUT
41000 ZAGREB, Baštijanova bb

PRORAČUN STRUJNOG I TOPLINSKOG OPTEREĆENJA PARALELNO VEZANIH DIODA I TIRISTORA
CALCULATION OF CURRENT AND THERMAL LOAD OF DIODES OR THYRISTORS CONNECTED IN
PARALLEL

SAŽETAK

U članku je opisan proračun statičke raspodjele struje, gubitaka i virtualne temperature silicija paralelno spojenih dioda ili tiristora. Uzeti su u obzir različiti uzroci statičke neravnomjernosti raspodjele struje: različitost propusnih karakteristika ventila, temperaturna ovisnost propusnih karakteristika, različitost radnih otpora paralelnih puteva, te različitost uvjeta hlađenja ventila. Proračun se provodi pomoću elektroničkog računala. Navedene su podloge za proračun, te dijagrami toka programa. Na kraju su navedeni i komentirani rezultati proračuna na nekoliko primjera.

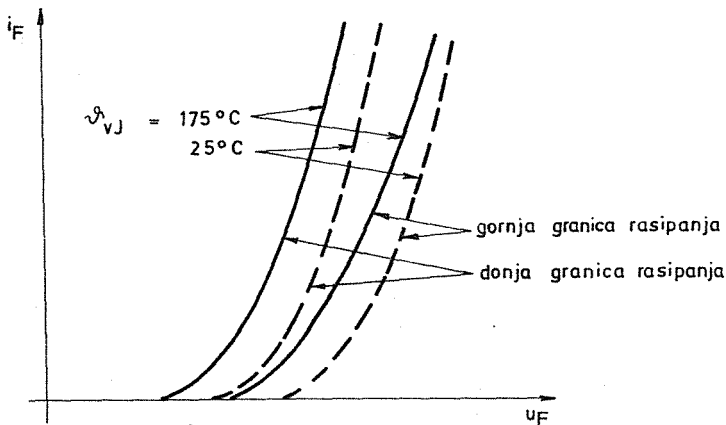
ABSTRACT

The calculation of static current distribution, losses and virtual junction temperature of diodes or thyristors connected in parallel is described. Various reasons for uneven static current distribution are taken into consideration: the differences in on-state valve characteristics, the temperature dependence of on-state valve characteristics, the differences of resistances of parallel ways and the differences in valves cooling conditions. The calculation has been carried out by computer. The calculation principles and program algorithm are described. Some calculation examples are presented and discussed.

1. UVOD

Ako zahtjevi za strujnom opteretivošću dioda i tiristora prekoračuju mogućnost jednog ventila neizbježno je paralelno spajanje dva ili više ventila. Pri tomu je osnovni problem postizanje dovoljno ravnomjerne raspodjele struje između paralelnih ventila u statičkim (period vođenja) i dinamičkim (period uklapanja i komutacije) stanjima [L.1]. Neravnomjernost raspodjele struje između paralelnih ventila može biti uzrokovana različitostima propusnih karakteristika ventila, različitostima uvjeta hlađenja ventila koji djeluju putem temperaturne ovisnosti propusne karakteristike, različitostima omskih i induktivnih otpora paralelnih puteva i kod tiristora različitostima vremena kašnjenja uklapanja. U članku se razmatra raspodjela struje samo u statičkim stanjima uzrokovana različitostima propusnih karakteristika ventila, različitostima uvjeta hlađenja ventila i raz-

ličitostima omskih otpora paralelnih puteva. Opisan je proračun raspodjele struje, gubitaka i virtualne temperature silicija ventila u slogu od paralelno spojenih dioda ili tiristora, opterećenog zadanim pravokutnim valnim oblikom struje. Na osnovu [L.1] za proračun je neophodno poznavati propusne i-u karakteristike ventila s gornjom i donjom granicom rasipanja, slika 1. Ove karakteristike trebaju biti zadane za dvije različite virtualne temperature silicija npr. za graničnu dopuštenu temperaturu silicija i za sobnu temperaturu, na osnovu čega se linearnom interpolacijom može odrediti karakteristika za bilo koju virtualnu temperaturu silicija. Osim toga trebaju biti zadani toplinski otpori silicij-ambijent pojedinih ventila i omski otpori pojedinih paralelnih puteva.



Sl. 1. Propusne karakteristike ventila s ucrtanom donjom i gornjom granicom rasipanja za dvije različite virtualne temperature silicija

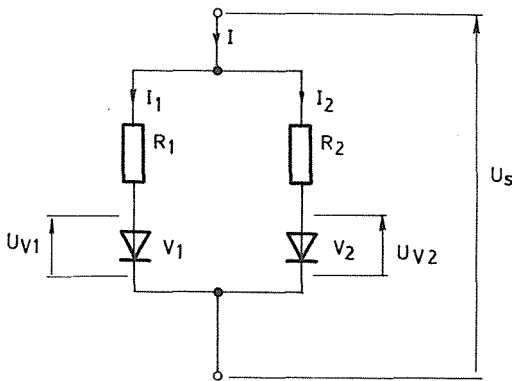
Najnepovoljniji slučaj raspodjele struje nastaje ako u slogu od više paralelno spojenih ventila jedan ventil ima karakteristiku na donjoj granici rasipanja, a svi ostali ventili na gornjoj granici rasipanja. Ventil s karakteristikom na donjoj granici rasipanja preuzima najveću struju. Ako su omski otpori paralelnih puteva različiti, pa se istom ventilu pridruži minimalni omski otpor, raspodjela struje će se još više pogoršati. Ako su toplinski otpori silicij-ambijent pojedinih ventila različiti raspodjela struje će se dalje pogoršavati kad se istom ventilu pridruži maksimalni toplinski otpor u slučaju da je u promatranom strujnom području toplinski koeficijent propusne karakteristike negativan, odnosno minimalni toplinski otpor u slučaju da je u promatranom strujnom području

toplinski koeficijent propusne karakteristike pozitivan.

U članku će se najprije opisati proračun za dva paralelno spojena ventila i pokazati će se kako se proračun može koristiti za N paralelno vezanih ventila. Sam proračun se provodi iterativnim postupkom. Pretpostavi se da je u slogu od dva paralelna ventila kod oba ventila temperatura silicija ista i jednaka graničnoj dopuštenj temperaturi silicija. Iz zadanih propusnih karakteristika ventila i pridruženih u seriju spjernih omskih otpora izračuna se struja pojedinog ventila i zatim gubici pojedinog ventila. Iz zadanih toplinskih otpora i temperature ambijenta izračunavaju se temperature silicija, koje će se sigurno razlikovati od pretpostavljene granične dopuštene temperature. Sada se postupak proračuna poravlja koristeći propusne karakteristike ventila dobivene interpolacijom za izračunate temperature silicija. Iteracija se ponavlja dok se ne postigne željena točnost proračuna. Za proračun će se koristiti elektroničko računalo, koje je znatno olakšava i ubrzava iterativni postupak proračuna.

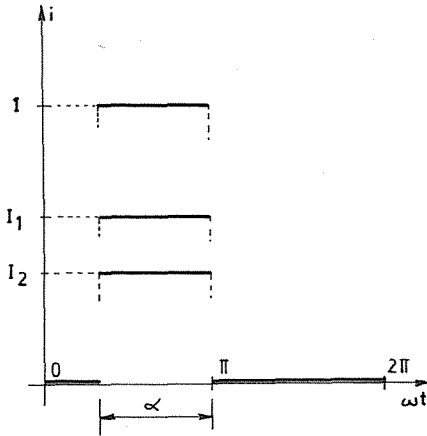
2. MATEMATIČKI MODEL ZA PRORAČUN STRUJNOG I TOPLINSKOG OPTEREĆENJA DVA PARALELNO VEZANA VENTILA

Na slici 2. je prikazana električna shema sloga od dva paralelna ventila. Ventil V_1 ima propusnu karakteristiku na donjoj granici rasipanja, a ventil V_2 ima propusnu karakteristiku na gornjoj granici rasipanja. Omski otpor manjeg iznosa R_1 je spojen u seriju s ventilom V_1 , a otpor većeg iznosa R_2 u seriju s ventilom V_2 . Iz propusne karakteristike ventila za određenu temperaturu silicija i karakteristike u seriju spojenog omskog otpora se odredi u-i karakteristika pojedine paralelne grane, te zatim sumarna u-i karakteristika dvije paralelne grane.



Sl. 2. Električna shema sloga od dva paralelna ventila

Slika 3. prikazuje valni oblik struje sloga i struje pojedinih ventila.



Sl. 3. Valni oblik struje sloga i struje pojedinih ventila

Na osnovu zadane ukupne struje I iz sumarne $u-i$ karakteristike od dvije paralelne grane se odredi napon na paralelnim granama U_s . Iz karakteristika pojedinih paralelnih grana za napon U_s se odrede struje I_1 i I_2 i zatim iz karakteristika ventila naponi U_{V1} i U_{V2} .

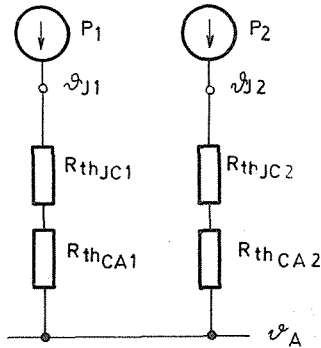
Slika 4. prikazuje ekvivalentnu toplinsku shemu. S P su označeni gubici u ventilu, koji se računaju kao:

$$P_i = I_i \cdot U_{Vi} \cdot \frac{\alpha}{2\pi} + P_{di} \quad (1)$$

Značenje ostalih oznaka je

- I_i - struja i -tog ventila ($i = 1, 2$.)
- U_{Vi} - pad napona i -tog ventila pri struji I_i
- α - kut vođenja
- P_{di} - dodatni gubici i -tog ventila (zaporni, gubici uklapanja itd.)
- ϑ_{ji} - virtualna temperatura silicija i -tog ventila
- $(R_{thJC} + R_{thCA})_i$ - toplinski otpor silicij-ambijent i -tog ventila

Ventilu V_1 treba pridružiti veću vrijednost toplinskog otpora silicij-ambijent, ako je u promatranom strujnom području toplinski koeficijent propusne karakteristike negativan.



Sl. 4. Ekvivalentna toplinska shema sloga od dva paralelna ventila

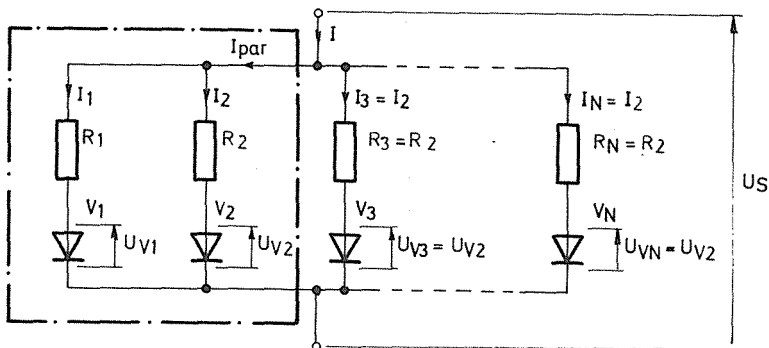
Iz gubitaka te zadanih toplinskih otpora i temperature ambijenta računa se temperatura silicija pojedinog ventila

$$\vartheta_{ji} = (R_{thJC} + R_{thCA})_i P_i + A \quad (2)$$

Ukoliko se izračunate temperature silicija razlikuju od onih s kojima je proračun započeo, proračun se ponavlja s novizračunatim temperaturama silicija, dok odstupanja početnih temperatura silicija od izračunatih ne budu neznatna.

3. MATEMATIČKI MODEL ZA PRORAČUN STRUJNOG I TOPLINSKOG OPTEREĆENJA N-PARALELNO VEZANIH VENTILA

Električnu shemu sloga od N-paralelno vezanih ventila prikazuje slika 5. Model opisan u točki 2. za proračun opterećenja dva paralelna ventila se može primijeniti i u ovom slučaju uz slijedeće pretpostavke koje osiguravaju konzervativnost proračuna. Ventil V_1 ima propusnu karakteristiku na donjoj granici rasipanja. Njemu se pridruži minimalni serijski omski otpor, koji se u slogu može pojaviti. Ventil V_2 ima propusnu karakteristiku na gornjoj granici rasipanja. Njemu se pridruži maksimalni serijski omski otpor, koji se u slogu može pojaviti. O pridruživanju toplinskih otpora vrijedi isto što je rečeno u točki 2. Za paralelne grane 3, ..., N parametri su isti kao za granu 2.



Sl. 5. Električna shema sloga od N-paralelno vezanih ventila

Ukupna struja sloga se može izraziti preko struje prvih dva paralelna ventila:

$$I = I_1 + (N - 1) I_2 \quad (3)$$

Struja para od ventila V_1 i V_2 je jednaka:

$$I_{\text{par}} = I_1 + I_2 \quad (4)$$

U paru se može definirati nesimetrija raspodjele struje kao:

$$k = \frac{2I_1}{I_{\text{par}}} - 1 \quad (5)$$

$$k = 1 - \frac{2I_2}{I_{\text{par}}} \quad (6)$$

Struje grana u paru se onda daću izraziti kao:

$$I_1 = (1 + k) \frac{I_{\text{par}}}{2} \quad (7)$$

$$I_2 = (1 - k) \frac{I_{\text{par}}}{2} \quad (8)$$

Supstitucijom (7) i (8) u (3) se može izračunati I_{par} :

$$I_{\text{par}} = \frac{2I}{N - (N-2)k} \quad (9)$$

Krištenjem jednadžbe (9) se može riješiti slog od N-paralelnih ventila korištenjem modela za dva paralelna ventila na slijedeći način. Pretpostavi se neka nesimetrija raspodjele struje k i iz zadane ukupne struje I se po (9) izračuna struja para. S tom strujom se pomoću modela za dva paralelna ventila izračunaju struje I_1 i I_2 te nesimetrija k . Izrač. nesimetrija će se vjerojatno razlikovati od pretpostavljene. Proračun se ponavlja s novoizračunatom nesimetrijom, dok se ne dobije zanemarivo odstupanje početne i izračunate nesimetrije.

4. PROGRAM ZA PRORAČUN

Osnovni algoritam programa za elektroničko računalo za izračunavanje raspodjele struja, gubitaka i temperatura silicija dva paralelno spojena ventila je jednostavan. Program započinje učitavanjem ulaznih podataka za amplitudu ukupne struje, kut vođenja, dodatne gubitke ventila, omske otpore u seriji s ventilima, toplinske otpore, temperaturu ambijenta, te dvije virtualne temperature silicija ψ_{Jkmax} i ψ_{Jkmin} za koje su zadane propusne karakteristike ventila. Zatim se učitavaju propusne karakteristike ventila, koje se zadaju numerički kao uredene petorke brojeva ($i_F, u_{11}, u_{12}, u_{21}, u_{22}$) gdje su:

- i_F - propusna struja
- u_{11} - propusni napon ventila na gornjoj granici rasipanja za virtualnu temperaturu silicija ψ_{Jkmin} pri struji i_F
- u_{12} - propusni napon ventila na donjoj granici rasipanja za virtualnu temperaturu silicija ψ_{Jkmin} pri struji i_F
- u_{21} - propusni napon ventila na gornjoj granici rasipanja za virtualnu temperaturu silicija ψ_{Jkmax} pri struji i_F
- u_{22} - propusni napon ventila na donjoj granici rasipanja za virtualnu temperaturu silicija ψ_{Jkmax} pri struji i_F

Definira se početni uvjet da su virtualne temperature silicija oba ventila iste i jednake temperaturi ψ_{Jkmax} . Zatim započinje iterativna petlja s blokom u kojem se linearnom interpolacijom karakteristika ventila na donjoj granici rasipanja za temperature ψ_{Jkmin} i ψ_{Jkmax} formira numeričko polje propusne karakteristike ventila V_1 za temperaturu ψ_{J1} . Na isti način se formira i polje propusne karakteristike ventila V_2 za temperaturu ψ_{J2} . Zatim se približavanjem pada napona na serijskom otporniku formiraju polja karakteristika paralelnih grana 1 i 2. Zbrajanjem struja paralelnih grana uz isti napon se formira numeričko polje ukupne karakteristike paralele. Za zadanu ukupnu struju I se linearnom interpolacijom između dvije najbliže točke u polju karakteristike paralele odredi napon:

paralele U_s . Zatim se iz poznatog napona paralele U_s istim postupkom određuje struje grana I_1 i I_2 , te naponi ventila U_{V1} i U_{V2} . Slijedi proračun disipacije ventila i temperatura silicija prema (1) i (2). Zatim se ispituje da li se izračunata temperatura silicija razlikuje od one s kojom je iteracija započeta više od zadane vrijednosti ε , za koju se pokazalo da se dovoljna točnost postiže uz $\varepsilon = 0,02$ °C. Ukoliko je razlika veća iteracija se ponavlja s novoizračunatim temperaturama silicija kao početnim. Ukoliko je točnost postignuta vrši se ispis rezultata i program završava.

5. PRIMJERI PRORAČUNA

Korištenje programa će se pokazati na neklik primjera proračuna raspodjele struje, propusnih gutitaka i virtualne temperature silicija čviju paralelno spojenih dioda Asea YSD 9-01, strujne klase K32. Dioda V_1 ima propusnu karakteristiku na donjoj granici rasipanja, a dioda V_2 na gornjoj granici rasipanja. Paralelni spoj je opterećen pravokutnim impulsima struje tjemere vrijednosti 3000 A i širine 180 ° el. Toplinski otpori i omski otpori u seriji sa svakim ventilom su međusobno jednaki. Razmatra se utjecaj toplinskog otpora i omskog serijskog otpora na raspodjelu struje. Ostali podaci za proračun i rezultati proračuna su dani u tablici 1. U prvoj koloni su podaci proračuna uz toplinski otpor kućište-ambijent od 0,05 K/W i serijske otpore jednake nuli. Vidi se da ventil V_1 vodi 1700 A, a ventil V_2 1300 A. Odstupanje od idealne raspodjele od 1500 A po svakom ventilu iznosi 13,3 %. Iz tablice se još vidi da struja ventila V_1 u prvoj iteraciji I_{1T} , u kojoj su temperature silicija oba ventila uzete jednake, iznosi 1661 A što odgovara odstupanju od idealne razdiobe od 10,7 %. Povećanje nesimetrije raspodjele struje od 10,7 na 13,3 % treba pripisati negativnom toplinskom koeficijentu propusne karakteristike. U koloni 2 su podaci proračuna za isti slučaj s razlikom što je u seriju sa svakom diodom dodan omski otpor od 0,0001 Ω . Ovoliku vrijednost omskog otpora ima približno brzi osigurač za zaštitu dioda. Vidi se da je nesimetrija raspodjele struje skoro prepolovljena i iznosi 7,4 %. U koloni 3 su podaci proračuna kao u koloni 1 ali uz povećan toplinski otpor kućište-ambijent od 0,05 K/W na 0,08 K/W. Vidi se da je nesimetrija raspodjele struje porasla od 13,3 na 14,3 %. Razlog je veća razlika temperatura silicija pojedinih dioda, zbog većeg toplinskog otpora, koja djeluje preko negativnog toplinskog koeficijenta propusne karakteristike. U koloni 4 su podaci proračuna kao u koloni 3 uz serijski omski otpor od 0,0001 Ω . Nesimetrija raspodjele struje je 7,73 % što je znatno manje nego u koloni 3 i nešto više nego u koloni 2. U koloni 5 su podaci proračuna koji pokazuju kako

se nesimetrija raspodjele struje može znatno smanjiti na svega 3,93 % povećanjem serijskog otpora na $0,0003 \Omega$. To međutim vjerojatno nema praktičnog značaja zbog znatnih gubitaka u tom serijskom otporu.

U koloni 6 su rezultati proračuna ako se vežu u paralelu dvije diode s međusobno istim propusnim karakteristikama, koje se nalaze na gornjoj granici rasipanja. Raspodjela struje je dakako idealna, tj. nesimetrija iznosi 0 %. Virtuelna temperatura silicija je manja nego kod diode V_1 u kolonama 1 i 2, međutim je nešto veća nego u koloni 5. U prva dva slučaja je jasno da su zbog idealne raspodjele struje gubici, pa s tim i temperatura silicija manji. U trećem slučaju, iako plovodič V_1 vodi manju struju nego u slučaju u koloni 5, on ima veći pad napona, toliko da su mu gubici veći, jer mu je propusna

dioda YSD 9-01, K32 $R_{thJC} = 0,046 \text{ K/W}$, $I = 3000 \text{ A}$, $\alpha = 180^\circ$, $\vartheta_A = 60^\circ\text{C}$						
	1	2	3	4	5	6
$R_{thCA} \text{ (K/W)}$	0,05	0,05	0,08	0,08	0,05	0,05
$R_1 = R_2 \text{ (}\Omega\text{)}$	0,	0,0001	0,	0,0001	0,0003	-
$I_1 \text{ (A)}$	1700	1611	1715	1616	1559	1500
$I_2 \text{ (A)}$	1300	1389	1285	1384	1441	1500
$P_1 \text{ (W)}$	879	826	874	816	794	797
$P_2 \text{ (W)}$	673	727	656	715	760	797
$\vartheta_{J1} \text{ (}^\circ\text{C)}$	144,4	139,3	170,2	162,8	136,3	136,5
$\vartheta_{J2} \text{ (}^\circ\text{C)}$	124,6	129,8	142,6	150,1	132,9	136,5
$2I_1/I \text{ (\%)}$	13,3	7,4	14,3	7,73	3,93	0,
$I_{1I} \text{ (A)}$	1661	1602	1661	1602	1559	1500
$2I_{1I}/I \text{ (\%)}$	10,7	6,8	10,7	6,8	3,93	0,

Tablica 1. Podaci proračuna raspodjele struje, propusnih gubitaka i virtuelne temperature silicija dviju paralelno spojenih dioda

karakteristika na gornjoj granici rasipanja. Ovaj primjer ilustrira kako se u slučaju kada je osigurana dobra raspodjela struja pomoću dodatnih komponenti (omskog otpora) virtualna temperatura silicija ne mora povećati, ako se vežu u paralelu dva poluvodiča, jedan s donjom a drugi s gornjom graničnom propusnom karakteristikom, u odnosu na slučaj da imamo dva poluvodiča s istim propusnim karakteristikama jednakim gornjoj graničnoj karakteristici.

6. ZAKLJUČAK

U članku je opisan proračun statičke raspodjele struje, gubitaka i virtualne temperature silicija više paralelno spojenih dioda ili tiristora opterećenih pravokutnim valnim oblikom struje zadane tjemene vrijednosti i širine. Razmatra se raspodjela struje samo u statičkim stanjima uzrokovana različitostima propusnih karakteristika ventila, različitostima uvjeta hlađenja ventila, koji djeluju putem temperaturne ovisnosti propusne karakteristike, te različitostima omških otpora paralelnih puteva. Opisan je matematički model sklopa od dva paralelno vezana ventila i program za proračun pomoću elektroničkog računala. Također je opisan matematički model sklopa od N-paralelno vezanih ventila, koji se bazira na modelu za dva paralelno vezana ventila. Na kraju je na nekoliko primjera ilustriran proračun opterećenja dva paralelno vezana ventila i utjecaj pojedinih parametara sklopa na raspodjelu struje i virtualnu temperaturu silicija.

LITERATURA

- [1] Z. Benčić, Z. Plerković, Energetska elektronika, I dio - Poluvodički ventili, Školska knjiga, Zagreb 1978.