

VAKUUMSKA MOČNOSTNA STIKALA

Andrej Pregelj, Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko, Teslova 30, 61111 Ljubljana

VACUUM CIRCUIT BREAKERS

Abstract.

The space without molecules is an excellent heat and electric insulator. The idea to use this vacuum nature in the electric field for developing special switches which would be smaller and more safe has been existing for more than 100 years, but a commercial realization appeared not later than 25 years ago. Nowadays vacuum switch and break elements have already passed their research and developing period. Modern vacuum technologies (leak detection, brazing, high vacuum pumping, use of vacuum degassed materials, etc.) assure the high quality of these pretentious electric components. At the same time the vacuum circuit breakers are a school example of a device operating on vacuum principle.

Izveček.

Prostor brez molekul je odličen toplotni in električni izolator. Ideja, da bi to lastnost vakuumu na električnem področju uporabili za izdelavo stikal, ki bi zato lahko bila manjša in varnejša, je stara že okrog 100 let, vendar je do komercialne realizacije prišlo šele v zadnjih desetletjih. Sedaj so sodobni vakuumski stikalni elementi že prestali glavno razvojno raziskovalno obdobje. S svojo kvaliteto dokazujejo, kako nujne so vakuumске tehnologije za izdelavo visoko zahtevnih elektronskih sestavnih delov in hkrati predstavljajo lep primer tehnične naprave, ki deluje na osnovi lastnosti vakuumu.

1 UVOD

Vakuumska močnostna stikala so električne naprave, ki se v trifazni mreži srednje napetosti (0,4 do 110 kV) uporabljajo za vklapljanje in izklapljanje močnih tokov (tokovi kratkega stika reda velikosti 10000 A). Močno so se uveljavila v zadnjih dveh desetletjih. Druga stikala za omenjeno področje tokov in napetosti uporabljajo kot izolacijski medij za preprečevanje obloka pri izklapljanju naslednja sredstva: zrak, olje, piš stisnjenega zraka in komprimiran plin SF₆. Vakuum je s svojo veliko dielektrično trdnostjo omogočil bistveno zmanjšanje kontaktne reže, s tem pa tudi zmanjšanje giba in celotne stikalne naprave v primerjavi s prej naštetimi. Vakuumsko stikalo je sestavljeno iz hermetično zaprte izolacijske cevi - ampule, v kateri se nahajata dva kontakta. Z zunanje strani je mirujoči kontakt podaljšan v priključek za togo vgradnjo ampule v okvir stikalne naprave, na gibljivem kontaktu pa se nahaja spojka za priklop sprožilnega oz. pomičnega mehanizma.

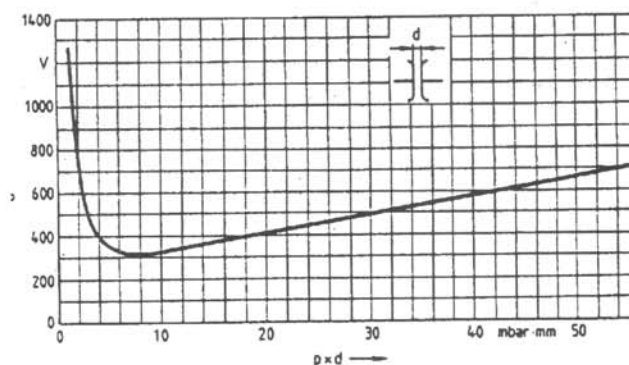
Odlike tovrstnih stikal so:

- kontakti so zaprti v negorljivem ohišju - zmanjšana možnost požara
- hitro odklapanje (navadno ob koncu prve polperiode) - zelo zmanjšan oblok
- manjše dimenzije stikalnega elementa in s tem celotne naprave
- poenostavljen mehanizem zaradi kratkega giba
- kontakti so stalno čisti in neoksidirani - daljša življenjska doba (> 10 let) - povečana varnost osebja
- ni vzdrževanja; ko je potrebno, zamenjamo cel element
- niso hrupna.

Ta sestavek prikazuje stikalo predvsem kot odličen zgled za uporabo vakuumu v tehniki, kot mesto zanimivih dogajanj na površini kontaktov in kot tehnološko zahteven vakuumski element.

2 VAKUUM KOT ELEKTRIČNI IZOLATOR

Osnova za razlago delovanja vakuumskih stikal je poznano fizikalno dejstvo, da je plin brez ionov izolator. Njegova napetostna prebojna trdnost je podana s tki. Paschenovim zakonom (Paschen 1889), ki ga prikazuje krivulja na sliki 1. Iz nje je razvidno, da na prebojno napetost vplivata tako razdalja med elektrodama (d) kot tudi okoliški tlak oz. vakuum (p). Za vsak plin obstaja minimalna prebojna napetost pri določeni vrednosti produkta " $p \times d$ ". Kadar želimo imeti dobro izolacijo brez nevarnosti za preboj, moramo pri konstruiranju upoštevati nevarnost območja tega minimuma. Pri določeni razdalji in plinu moramo izbrati čim nižje tlake ali pa tiste blizu atmosferskega. Za vakuumska stikala, ki so izdelana kot ampule s stalnim vakuumom, je seveda izbrano področje na levem kraku Paschenove krivulje, kjer so prebojne napetosti najvišje, torej v področju ultra visokega vakuumu.



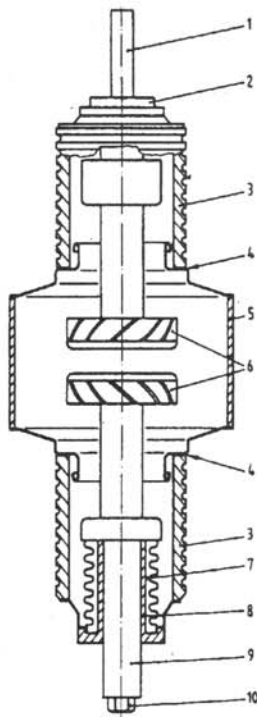
Slika 1. Napetostna prebojna trdnost v odvisnosti od tlaka zraka in razdalje med elektrodama

Kot vsako stikalo tudi vakuumsko opravlja dve funkciji: vklapljanje in izklapljanje. Oblok, ki je najbolj kvarni dogodek za elektrodi in s tem za življenjsko dobo stikala, nastaja zelo izrazito predvsem pri izklapljanju pod napetostjo. Ker vakuum deluje kot močan dušilni medij za oblok, so vakuumska stikala zelo primerna za odklapanje tokov in jih zato pogosto imenujemo odklopniki (circuit breakers). Pomanjkanje plinskih molekul in ionov ob kontaktnih elektrodah namreč onemogoča nastanek obloka, kakršen je navadno na zraku. Majhen oblok, ki se vseeno pojavlja, je odvisen od preostalih plinov v ampuli in od kontaktnega materiala, ki se ob odklopu na površini lokalno stali in upari.

3 ZGRADBA VAKUUMSKIH STIKAL

V visoko evakuiranem hermetično zaprtem cilindričnem ohišju sta aksialno nameščena mirujoči in gibljivi drog s kontaktnima glavama na stičnem mestu. Slika 2 prikazuje ampulo z razmaknjenima kontaktoma in glavnimi sestavnimi deli. Tu naj pripomnimo, da ima novo nevgrajeno stikalo kontakte staknjene, ker zunanji zračni tlak potisne pomični kontakt do mirujočega.

Za odklapljanje rabijo posebne mehanske naprave (stroji), ki primerno hitro razklenijo oba kontakta na točno določeno delovno razdaljo (cca 10 mm) in ki v zaprtem stanju tudi dodatno z vzmetmi tiščijo kontakta skupaj.



Slika 2. Presek vakuumskega stikalnega elementa: 1 električni priključek mirujočega kontakta, 2 stranski pokrov, 3 izolator, 4 trda spajka, 5 plašč ampule, 6 kontakta, 7 kovinski meh, 8 vodilo, 9 el. priključek ampule gibljivega kontakta, 10 spojka za mehanski pogon

Kratek opis glavnih sestavnih delov:

- ohišje sestavljajo keramični ali stekleni valj ter dva stranska pokrova iz specialne zlitine FeNiCo (v tehnologiji spajanja kovin s steklom ali s keramiko znane pod imenom kovar) in iz nerjavnega jekla. To je tehnološko zelo zahteven element, ki hkrati povezuje in nosi vse sestavne dele, rabi kot električni izolator in zagotavlja ohranjanje vakuumu v ampuli; tlak več let ne sme narasti nad 10^{-6} mbar.
- kovinski meh, ki omogoča gibanje pomičnega drogu in hkrati dopolnjuje hermetično ovojnico ohišja, je navadno iz nerjavnega jekla debeline 0,10-0,20 mm
- drogova, ki nosita kontakte sta iz masivnega OFHC bakra

- zasloni, ki ščitijo, da bi kovinske pare ne neparile prevodne plasti na izolacijsko (stekleno oz. keramično) steno ampule, so navadno iz tanke nerjavne pločevine in so na robovih tako zaobljene, da čim bolj onemogočajo električni preboj.
- kontakti so različni tako po obliki kot po materialu in jih bomo omenili še posebej.

4 DELOVANJE STIKALA

Sklopljeno stanje časovno ni omejeno; preko stične površine se izravnava tlačna sila in preko nje teče ali pa ne teče električni tok. Važno je, da se v daljših obdobjih mirovanja v komori ne poslabša vakuum toliko, da bi pri naslednji uporabi ne bilo več mogoče doseči zadostne prebojne trdnosti. Med razklapljanjem pod tokovno obremenitvijo potekajo mikro pojavi na površini obeh kontaktov približno takole: zaradi zmanjševanja tlačne sile se povečuje električna upornost med stičnima ploskvama; segrevanje na odmikajočih se točkah je tolikšno, da pride do taljenja in uparivanja. Oblak kovinskih par je poleg drugih, v komori prisotnih preostalih, plinov osnova za električni oblok. Le-ta ugasne pri razmikanju, še preden se tok izmenične periode, ki jo prekinjamo, zmanjša na nič. Ta prekinitveni tok naj bi bil zelo majhen (komaj nekaj amperov) zato, da bi obdržali tudi čim nižjo vrednost induktivne napetosti, ki se pojavi v trenutku prekinitve tokokroga. Kakor hitro je oblok zadušen, se morajo zadosti hitro kondenzirati tudi še navzoče delno ionizirane kovinske pare (predvsem na zaslonu in na robovih kontaktov). Le tako je namreč pri ponovnem pojavu napetosti tlak v okolici kontaktov dovolj nizek, da ne pride spet do vžiga obloka. S primernim dimenzioniranjem in pravilno izbiro kontaktnih materialov se na območju obloka doseže napetostna prebojna trdnost v nekaj mikrosekundah. Na sliki prikazano stikalo ima kontaktne obroč s spiralno narezanimi robovi. Ti utori povzročijo vrtničenje obloka, ki se zato iz osrednjega plazemskega koridorja razprši na obrobje diskov. Odgorevanje oz. odparevanje kontakta se tako porazdeli po vsej površini in poraba materiala je močno zmanjšana.

5 KONTAKTNI MATERIAL

Že iz kratkega opisa nastanka in nehanja obloka se da spoznati, da na potek dogajanja med kontaktoma vplivajo mnogi dejavniki. Eden najpomembnejših je prav gotovo kontaktni material sam; za dobro delovanje mora ustrezati naslednjim zahtevam:

- da ne oddaja plinov, mora biti izdelan iz zlitine, pretaljene v vakuumu
- biti mora odporen proti zvarjenju
- biti mora primeren za vzdrževanje obloka
- zagotavljati mora nizek prekinitveni tok
- pri odklapljanju mora biti odgorevanje materiala enakomerno in čim manjše (delno se to doseže tudi z obliko)
- zahteva se visoka električna prevodnost (za omejitvev električnih izgub pri prevajanju v sklopljenem stanju)
- imeti mora dobro toplotno prevodnost

- ohraniti mora gladko površino tudi po razklapljanju pod obremenitvijo
- zahteva se primerna mehanska trdnost, kajti jakost udarcev pri sklapanju je precejšnja

Dolga desetletja še po II.svetovni vojni so morala preteči, da so metalurgi in fiziki razvili materiale, ki vsaj delno zadoščajo zgornjim zahtevam. Večinoma so to zlitine na osnovni CuCr z različnimi dodatki. Zanimivost v zvezi s kontaktnim materialom je naslednja: ob vsakem odklapanju se nastale kovinske pare kondenzirajo na zaslonu in drugih površinah in s procesom getranja črpajo pline iz okolice; stikalo torej ob aktivni uporabi samo izboljšuje svoj vakuum.

6 TEHNOLOŠKE ZANIMIVOSTI

Zahteve, ki jih postavlja funkcija stikala (hermetičnost, trdnost, izolativnost, kvaliteta kontaktov, tlak $< 10^{-5}$ Pa, veliko število preklopov...) so resen problem za razvijalca in za tehnologa. Zato so za izdelavo vakuumskih stikal potrebni mnogi specialni postopki, prijemi in izkušnje, ki so v običajni tehniki manj znani. Naj jih na kratko omenimo:

- Pri spojih izolator-kovina keramika vse bolj izpodriva steklo. Vzrok temu je mogočen razvoj glinične keramike in različnih past za njeno metalizacijo v zadnjih desetletjih. Izdelovalci stikal kupujejo keramične že metalizirane cevi pri specializiranih firmah; spajkanje na kovarske pokrove izvedejo sami v vakuumskih pečeh.
- Spajkanje Cu drogov na meh. oz. na pokrov iz nerjavnega jekla se tudi tu izvede v vakuumski peči, in sicer s spajko z nižjim tališčem, potem ko je bil na drog na podoben način že prispajkan kontakt s spajko z višjim tališčem.
- Sestavni deli se po mehanski izdelavi razmastijo v primernih topilih in z uporabo ultrazvoka, nato posušijo in shranijo v zaprtih suhih posodah.
- Varjenje kovarja na prokron se izvede s TIG postopkom na prirejenih vrtilnih napravah, pogosto še v dodatni zaščitni atmosferi argona ali dušika.
- Delno spojeni sklopi se kontrolirajo na tesnost zato, da se ne bi nadaljevala draga izdelava z nekvalitetnimi deli.
- Za evakuiranje mora ampula imeti prispajkan črpalni pecelj; navadno je to cevka premera 8 do 10 mm iz OFHC bakra na eni od stranskih pokrovnih plošč.
- Izčrpavanje se izvede na UVV črpalnem sistemu, ki ima možnost segrevanja ampule. Priključeno stikalo se ogreva med izčrpavanjem na 400-500°C (odvisno od uporabljenih materialov); hkrati se meri tlak ter kontrolira residualna atmosfera; na koncu se še enkrat preveri tesnost.

- Ampula se zapre in loči od črpalnega sistema tako, da se s posebnimi kleščami prešči pna vezna Cu-cevka, ki postane s tem hermetično zaprta na obe strani (mrzli zvar).

7 SKLEP

Prednosti vakuumskega prekinjevanja so znanstveniki poznali že v prejšnjem stoletju. Prva poskusna stikala za majhne moči so naredili Švedi leta 1921 in Američani 1923. V letih 1930-40 so v ZDA začeli izdelovati vakuumska stikala za omrežno napetost in celo za več kV, a le za tokove nekaj A. Tehnično niso bila dovršena, predvsem zaradi puščanja zvarov, sproščanja plinov iz kontaktnega materiala in zaradi zvarjanja kontaktov. Z napredkom in novimi spoznanji na področju fizike plazme, metalurgije in tehnike izdelave so začeli v letih 1950-60 proizvajati prva komercialna stikala. Po letu 1970 so pričeli vakuumski stikalni elementi konkurirati in na nekaterih področjih celo izpodrivati druge stikalne principe. Šele v zadnjih desetletjih so bili namreč v svetu dovolj dobro rešeni problemi, ki so za kvalitetno izdelavo bistveni. To so: izdelava kontaktne zlitine z optimalnimi preklopnimi lastnostmi, ekstremna hermetičnost spojev in priprava materialov, ki ne vsebujejo plinov.

Vakuumska stikala so na prvi pogled dokaj enostaven element, saj so sestavljena le iz približno 15 glavnih sestavnih delov, ki so nekateri med njimi še celo enaki, vendar je iz tega kratkega opisa razvidno, da kljub temu pomenijo konstrukcijsko in tehnološko velik zalogaj za vsakega proizvajalca.

8 LITERATURA

- /1/ S. Harča, Ž. Idžotic: O metodologiji razvoja nove serije sklopnih blokova sa vakuumskim prekidačima, Končar - Stručne informacije 3-4/88
- /2/ Poročila IEVT o razvoju vakuumskih stikal 1977-82
- /3/ Pupp Hartmann: Vakuumtechnik, Carl Hanser Verlag, München, Wien 1991
- /4/ Prospekti različnih proizvajalcev.
- /5/ T. Sokalija i saradnici: Vakuumski sklopni elementi, Bilten JUVAK 24, 1990
- /6/ R.E. Voshall et. coll.: Experiments on vacuum interrupters in high voltage 72 kV circuits IEEE, 1978, New York
- /7/ J.F. Hamman, H. Kippenberg, H. Hassler and H. Schreiner: Abreiss Stromverhalten von Vakuumlichtbogen unter besonderer Berücksichtigung des Werkstoff- und Struktureinflusses der Elektroden, Siemens Forsch. und Entw. Ber. Bd.9/1980-4
- /8/ S. Sakuma, Y. Kashimoto: New Type Vacuum Interrupters; Series No 56 - 1979 No. 2