

1 UVOD

1.1 Zgodovinski razvoj

Močnostna elektronika je tehnična veda, ki se ukvarja z vklopjanjem in izklopjanjem, s krmiljenjem in pretvarjanjem električne energije iz ene v drugo obliko s pomočjo **tokovnih** oziroma **električnih ventilov**. V veliki meri vključuje tudi pripadajoče merilne, krmilne in regulacijske naprave.

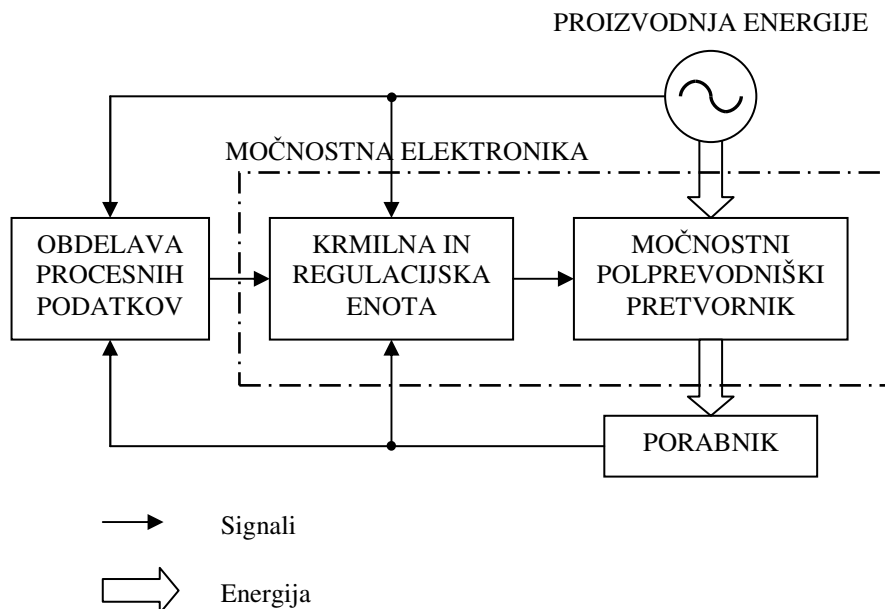
Močnostna elektronika se je razvila iz tako imenovane »usmerniške tehnike«, ki ima dolgoletno tradicijo. Tudi predavanja o tej veji tehnike so se nekoč imenovala »Usmerniki«. V začetku prejšnjega stoletja je bila poglavitna potreba **usmerjati** izmenični tok iz obstoječega enofaznega ali trifaznega omrežja v enosmerni tok za polnjenje akumulatorskih baterij in za napajanje enosmernih porabnikov, npr. cestnih in medmestnih železnic, elektroliz, galvan, enosmernih elektromotorskih pogonov (žage, mlini, industrija itd.). Električni ventili, ki so nastopali kot osnovni gradbeni elementi (gradniki) v teh usmerniških napravah, so bili najprej **mehanski prekinjevalniki** (podobni komutatorjem pri kolektorskih strojih), nato pa **ionski**, zlasti **živosrebrovi ventili**. Šele po letu 1930 so se začeli pojavljati polprevodniški ventili, najprej **bakeroksidulni** in **selenski**, v petdesetih letih pa še **germanijevi** in nato **silicijevi**, ki sedaj prevladujejo. Na področju polprevodniških ventilov je »veliki met« uspel firmi General Electric leta 1958, ko je izdelala prvi krmiljiv silicijev ventil. Imenovala ga je Silicon Controlled Rectifier (SCR), ki ga poznamo pod imenom **tiristor**.

Vse večje potrebe po krmiljenju in pretvarjanju električne energije iz ene v drugo obliko z visokim energetskega izkoristkom, z veliko natančnostjo in hitrostjo, je spodbudilo buren razvoj močnostnih pretvornikov v zadnjih nekaj desetletjih. Ta razvoj so omogočali povsem novi elementi (silicijeve diode, tiristorji, močnostni tranzistorji) pa tudi tehnološki napredek v gradnji elementov in podsestavov za krmilni (upravljalni) del pretvornikov (integrirana polprevodniška vezja, polprevodniška logika, mikroprocesorji in računalniki, kvalitetni merilni dajalniki za napetost, tok, hitrost in pozicijo).

Ker je tako močnostni, kakor tudi krmilni del sodobnih pretvornikov sestavljen iz polprevodniških elementov in ker ti pretvorniki ne rabijo le za usmerjanje, se je ta

tehnična disciplina iz »usmernikov« preimenovala v **močnostno** (ali energetska) **elektroniko** (angl. Power Electronic, nem. Leistungselektronik).

Močnostna elektronika je pomemben vezni člen med proizvodnjo električne energije in med porabniki, kar kaže tudi sl. 1.1. Naprave močnostne elektronike so praviloma vedno sestavljene iz dveh delov: iz **močnostnega dela** (tj. energetskega dela pretvornika) in iz **krmilnega** (regulacijskega) **dela**. Prvi brez drugega ne more obratovati, razen pri zelo enostavnih pretvornikih, ki ne potrebujejo nobenega krmilnega dela (npr. navadni diodni usmerniki). Tako v močnostnem, kakor tudi v krmilnem delu, so poglobitni gradniki monokristalni polprevodniki. V močnostnem delu so to diode, tiristorji in močnostni tranzistorji, v krmilnem in regulacijskem delu pa diode, tranzistorji, integrirana elektronska vezja ter mikroračunalniki. Ker so vsi ti gradniki sorodnega izvora, je kompatibilnost podsestavov, naprav in postrojov velika. To zagotavlja veliko obratovalno zanesljivost.



Slika 1.1: Močnostna elektronika

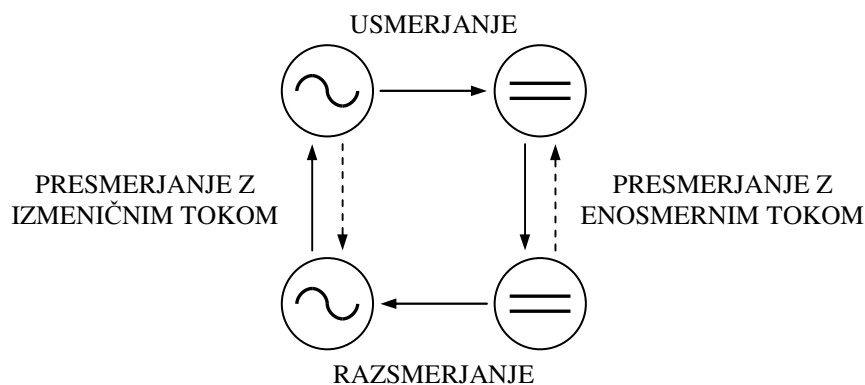
V čem je poglobitna razlika med močnostno in navadno elektroniko? Za razliko od vezij (naprav) navadne elektronike se v močnostni elektroniki pretakajo velike energije in je primarna zahteva, da so zgrajene tako, da imajo kar največji **energetski izkoristek**. V preostali elektroniki (npr. v telekomunikacijah, računalništvu itd.) energetski izkoristek nikoli ni primarno (ali sploh) pomemben.

1.2 Vrste pretvornikov in njihove naloge

Pretvorniki so naprave, ki omogočajo **pretvarjanje in krmiljenje** električne energije ob uporabi električnih tokovnih ventilov. Z njimi je možno krmiliti pretok električne energije med različnimi električnimi sistemi, kot so: aktivna električna omrežja (z lastnimi napetostnimi oziroma energetskimi izvori: generatorji, akumulatorskimi baterijami itd.) pasivna omrežja, porabniki itd.

Pri povezavi sistemov z izmeničnimi toki (napetostmi) in sistemov z enosmernimi toki (napetostmi) obstajajo štiri vrste pretvarjanja električne energije (sl. 1.2):

1. **Usmerjanje**, tj. pretvarjanje izmeničnega toka v enosmernega, pri čemer teče energija vedno samo v **eni** smeri: iz izmeničnega v enosmerni sistem.
2. **Razsmerjanje**, tj. pretvarjanje enosmernega toka v izmeničnega, pri čemer teče energija vedno samo v **eni** smeri: iz enosmernega v izmenični sistem.
3. **Presmerjanje z enosmernim tokom**, tj. pretvarjanje enosmernega toka oz. energije podanih parametrov (napetosti, polaritete) v enosmerni tok z drugimi parametri (napetosti, polaritete). Smer pretakanja energije je načeloma možna v obeh smereh.
4. **Presmerjanje z izmeničnim tokom**, tj. pretvarjanje izmeničnega toka (energije) določene napetosti, frekvence, števila faz in faznega zaporedja v izmenični tok (energijo) z drugačno napetostjo, frekvenco, številom faz in/ali faznega zaporedja. Pretakanja energije je načeloma možno v obeh smereh.

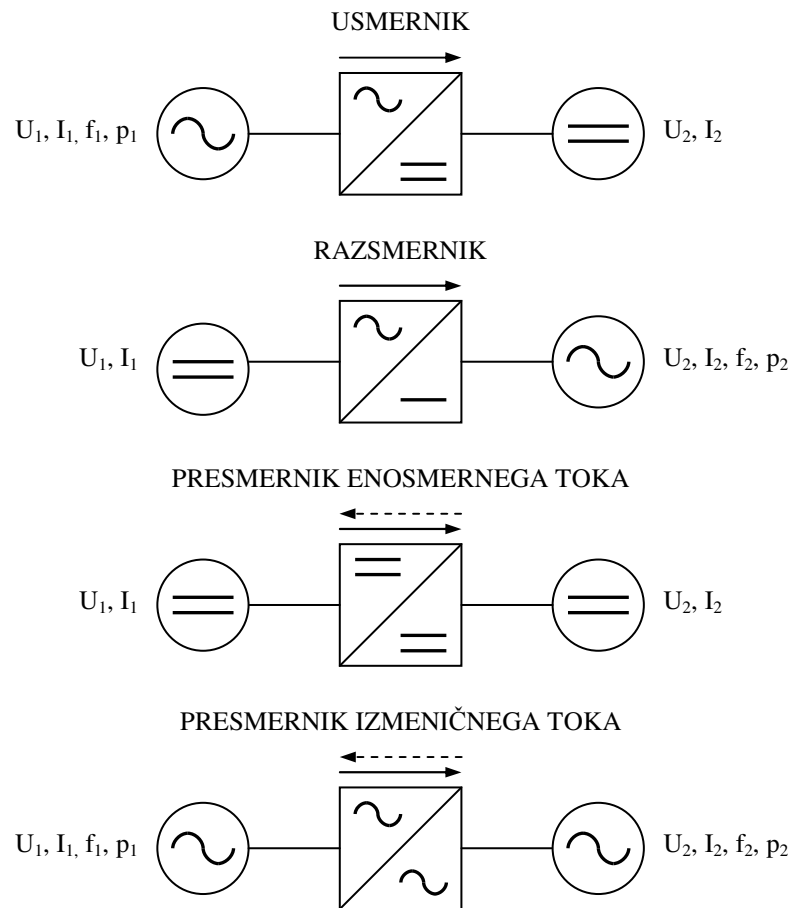


Slika 1.2: Vrste pretvarjanj električne energije

To kaže tudi sl. 1.2, kjer povezujejo pretvorniki le enosmerna in/ali izmenična električna omrežja, vendar so možne tudi povezave med aktivnimi omrežji (takimi z energetskimi izvori) in med pasivnimi omrežji ali navadnimi porabniki, ki nimajo svojega energetskega izvora in so zato brez napetosti, če jih ne napajamo iz pretvornikov (npr. na frekvenčni pretvornik priključen regulirani asinhronski motor).

Ta štiri pretvarjanja električne energije opravljajo ustrezni pretvorniki (sl. 1.3):

1. **Usmerniki** (nem. Gleichrichter, angl. Rectifier).
2. **Razsmerniki** (nem. Wechselrichter, angl. Inverter).
3. **Presmerniki enosmernege toka** (»enosmerni presmerniki«) (nem. Gleichstromumrichter, angl. DC/DC Converter).
4. **Presmerniki izmeničnega toka** (»izmenični presmerniki«) (nem. Wechselstromumrichter, angl. AC/AC Converter).



Slika 1.3: Vrste pretvornikov

Razen opisanih štirih poglavitnih vrst pretvornikov obstajajo še druge vrste naprav močnostne elektronike, kot so:

5. **Stikala** za vklopjanje in izklopjanje enosmernih ali izmeničnih tokokrogov.
6. **Naprave za proizvodnjo jalove energije, aktivni filtri** itd.

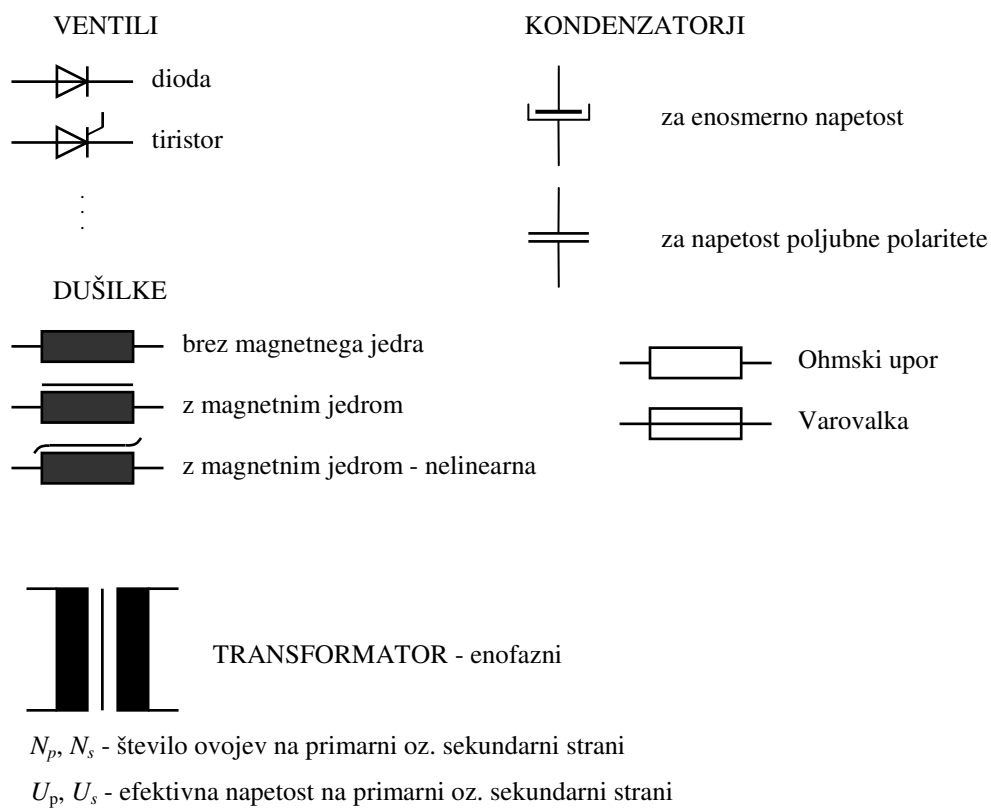
1.3 Gradniki

1.3.1 Vrste

Naprave energetske elektronike so sestavljene iz različnih elementov ali gradnikov. Poglavitni med njimi so (sl. 1.4):

1. Električni tokovni ventili
2. Transformatorji (Tr)
3. Dušilke (induktivnost L)
4. Kondenzatorji (kapacitivnost C)
5. Upori (upornost R)
6. Varovalke (Va),

ter še nekateri drugi, kot npr. prenapetostni odvodniki, napetostno odvisni upori, nelinearne dušilke itd.



Slika 1.4: Različni gradniki

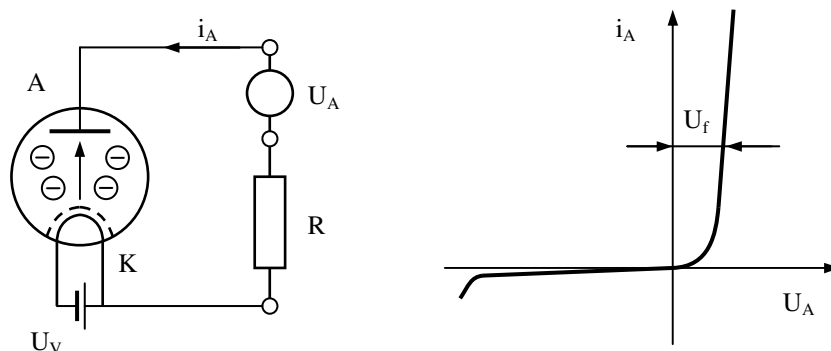
1.3.2 Ventili

Predno so se pojavili sodobni polprevodniški ventili, so gradili pretvornike z

- vakuuskimi,
- ionskimi in
- selenskimi ventili.

Vsi ti ventili so v primerjavi s sodobnimi silicijevimi diodami in tiristorji bistveno slabši, kar zadeva padec napetosti v prevodni smeri in izkoristke, zanesljivost in hitrost delovanja, gabaritne mere in težo, mehansko robustnost, življensko dobo, itd.

Sl. 1.5 kaže shematično **vakuusko diodo**. V zaprti stekleni posodi (»elektronski cevi«) z zelo nizkim zračnim tlakom se nahajata anoda A in katoda K. Katoda je električno ogrevana z zunanjo pomožno napetostjo U_V , da žari in tako oddaja v okolico elektrone. Le-te lahko anoda, če je glede na katodo pozitivna, privlači. Elektroni, ki letijo od katode proti anodi, pomenijo električni tok i_A , katerega smer pa je po dogovoru risana v nasprotni smeri pretakanja elektronov. Narisana dioda ima lastnost »usmerjevalke«: zunanja izmenična (anodna) napetost U_A bo lahko poganjala tok v tokokrogu K-A- U_A -R-K le v eni (narisani!) smeri in to v časovnih intervalih, ko je anoda A bolj pozitivna od katode K. V intervalih, ko je anoda bolj negativna od katode, pa tok ne bo tekkel (sl. 1.5b).

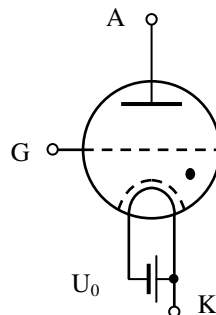


Slika 1.5: Vakuuski ventil z vročo katodo – dioda: (a) shema, (b) statična i/u -karakteristika

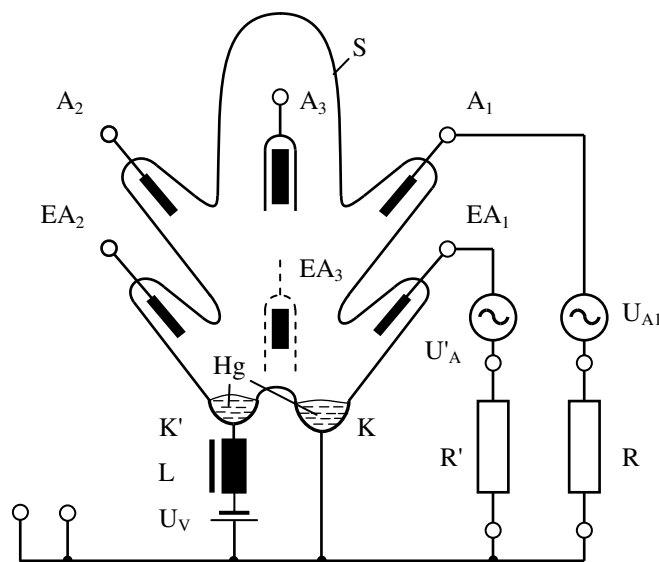
Zaradi relativno majhne emisijske sposobnosti vročih katod so dopuščale vakuumske diode le relativno majhne toke (velikostnega razreda 0,5 A), imele pa so tudi velik padec napetosti v prevodni smeri U_F (okrog 100 V). V tem pogledu so bili boljši ionski ventili. Polnjeni so bili ali z žlahtnimi plini (argon, ksenon) ali z živosrebreno paro pri nizkem tlaku. Katoda pa je bila ali ogrevana (žarilna) ali v obliki živosrebrega »jezerca«. Pri preletu od katode na anodo so elektroni zadevali ob prisotne plinske molekule in jih ionizirali. Tako so nastali dodatni nosilci elektrenine. Pojav ionizacije je plazovit. Zato govorimo o plazmi ali »vžigu«. To plazmo ali »vžig« ventila pa je bilo možno preprečiti (kljub pozitivno polarizirani diodi), če je bila med katodo in anodo

nameščena negativno polarizirana »mrežica«. Tako so iz navadnih diodnih nastali triodni (z anodo, katodo in krmilno mrežico-angl. gate G) oziroma krmiljivi ventili. Neugodno je bilo le to, da je krmilna elektroda G, ko je ventil že začel prevajati električni tok, izgubila svojo krmilno lastnost in z njo ni bilo več mogoče izklopiti prevajajočega ventila (podobno, kot je to sedaj pri tiristorjih).

Na sl. 1.6, ki kaže simbol **plinske triode – tiratrona**, vidimo tudi principiarno zgradbo. Vrisana pika označuje, da imamo opraviti z ionskim ventilom. Ogrevana katoda emitira elektrone, ki pri svojem preletu proti anodi plazovito ionizirajo plinske molekule. Povzročijo torej plazmo ali »vžig«, seveda ob pogoju, da sta anoda A in krmilna elektroda G pozitivni. Tiratrone so v preteklosti zelo veliko uporabljali. Omogočali so toke do približno 20 A in zaporne napetosti do približno 10 kV. Notranji padec napetosti med prevajanjem je bil približno 20 V.



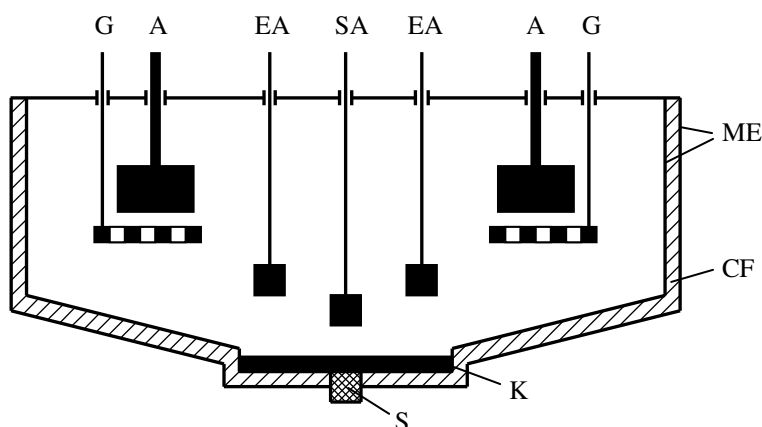
Slika 1.6: Simbol plinske triode – tiratrona



Slika 1.7: Trianodni nekrmljivi živosrebrov ventil

Veliko večjo emisijo elektronov od vročih katod omogoča električni oblok. To izkoriščajo **živosrebri ventili**. Sl. 1.7 kaže principiarno zgradbo takega ventila. V posebej oblikovani stekleni posodi z zelo nizkim parnim tlakom se na dnu nahajata dve

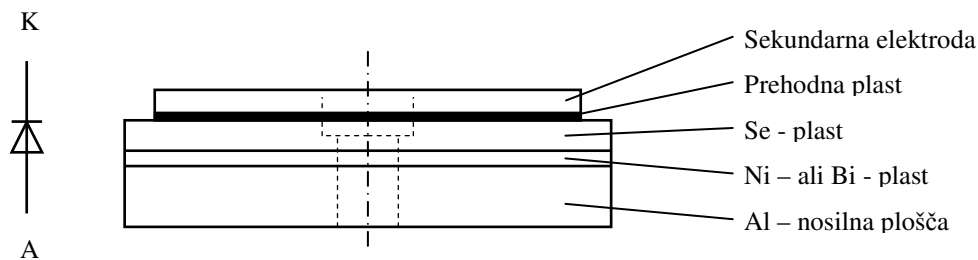
»jezerci« iz živega srebra, v posodo pa so zataljene še tri anode (A_1 , A_2 in A_3). Če priklopimo med obe katodi K in K^I neko pomožno napetost U_V ter nato najprej posodo nagnemo in spet zravnamo, se bosta »jezerci« najprej združili in nato spet razdružili in tedaj bo pri trganju tokoroga med »jezercema« nastal električni oblok, ki bo zelo intenzivno oddajal v okolico elektrone. Ena od trenutno pozitivnih anod bo te elektrone pospešila proti sebi in prišlo bo do že opisane plazovite ionizacije, tj. do »vžiga« ventila. Tok bo tekkel v tokokrogu $K-A-R-K$. Na katodi K se pojavi zelo svetla »katodna lisa«, ki zelo intenzivno oddaja elektrone, mnogo bolj, kot jih lahko ogrevana katoda (do 10^4 A/cm²). Mimo tega pa se takšna katoda tudi sama regenerira, saj se uparjeni delci, tj. molekule Hg, na hladnih stenah posode ponovno utekočinijo in padajo nazaj v jezerce. Ionizirane plinske molekule HG sodelujejo pri prevajanju električnega toka znotraj posode. Anoda je lahko samo ena ali pa jih je vgrajenih tudi več za večfazno delovanje ventila (npr. za enofazno, dvofazno, trifazno itd. usmerjanje). V posodi se nahajajo še tri pomožne anode (EA_1 , EA_2 , EA_3) s svojimi pomožnimi anodnimi napetostmi (U_{A1} , U_{A2} , U_{A3}). Njihova naloga je vzdrževati nek minimalni tok praznega teka tedaj, ko odklopimo fazna bremena in bi zato prenehala vsakršna katodna emisija (katodna lisa bi ugasnila) in bi bilo potrebno ventil vsakič ponovno vžigati.



Slika 1.8: Trianodni krmiljivi živosrebrni ventil z dvostensko kovinsko posodo: A-glavni anodi, EA-pomožni anodi, G-krmilni elektrodi, K-živosrebrna katoda, S-vžigni sistem, SA-vžigna elektroda, ME-dvostensko kovinsko ohišje, CF-hladilna tekočina

Podobno kot tiratroni so lahko tudi živosrebrovi ventili opremljeni še s krmilno elektrodo G , ki ima isto funkcijo kot pri tiratronih. Tako dobimo **krmiljive živosrebrove ventile**. Nadaljnja delitev živosrebrovih ventilov je še glede na posode (steklenukovinska), glede na vakuum (stalen ali sproti vzdrževan s posebno vakuumsko črpalko), glede na hlajenje posode (naravno-pospešeno in zračno-tekočinsko) ter glede na način zaganjanja: mimo že opisanega načina z nagibanjem posode obstajajo še nekateri drugi (elektromehanski in električni vžig, itd.). Zato so posamezne firme dale svojim ventilom z različnim načinom vžiganja tudi svoja imena, npr. ignitron, ekscitron, itd. Živosrebrove ventile so gradili za toke do več deset kA in za napetosti do več deset kV. Notranji padci napetosti pri prevajanju so bili okrog 20 V. Do pojava tiristorjev so živosrebrovi ventili obvladovali sceno v območju srednjih in velikih moči. Sl. 1.8 kaže shematični trianodni krmiljiv živosrebrni ventil s kovinsko posodo.

Polprevodniški ventili so se razvijali postopoma. Najprej sta se pojavila **bakeroksidulni** in **selenski**, sledili pa so jima **germanijevi** in na koncu **silicijevi ventili**. V preteklosti je bil zlasti pomemben selenski ventil. Njegovo zgradbo kaže sl. 1.9. Velikost nazivnega prevodnega toka je odvisna od velikosti, tj. od površine plošče. Gostota znaša nekaj 100 mA/cm^2 . Zaporna napetost je okrog 20 V/ploščo , napetostni padec pri prevajanju pa približno $1,2 \text{ V}$. Večje toke in večje napetosti je bilo možno doseči z neproblematično vzporedno oz. zaporedno vezavo več elementov (plošč). Dobra stran selenskih ventilov je bila njihova odpornost na udarne (transientne) prenapetosti, slabost pa precejšnja temperaturna odvisnost nekaterih električnih parametrov (pri temperaturah nad 70°C) in vpliv staranja (pri daljši neuporabi je bilo treba selenske ploščice predhodno formirati nekaj ur tako, da so bile obremenjene z znižano napetostjo in tokom).



Slika 1.9: Principielna zgradba selenskega ventila (plošče)

Sodobni ventili so **silicijeve diode**, **tiristorji** in **močnostni tranzistorji**.