

KAZALO

1. Splošno o stikalnih pretvornikih.....	2
2. Izbira topologije.....	3
3. Izračun ključnih parametrov zapornega stikalnega napajalnika z galvansko ločitvijo..	5
4. Izračun transformatorja	6
4.1 Določitev števila primarnih ovojev transformatorja s standardno zračno režo.....	9
4.2 Določitev števila primarnih ovojev transformatorja s poljubno zračno režo.....	9
4.3 Število sekundarnih ovojev.....	9
5. Posebna stanja pretvornika.....	11
5.1 Zagon pretvornika	11
5.2 Primer, ko je vhodna napetost nižja od nazivne.....	14
5.3 Delovanje z bremenom, manjšim ali večjim od nazivnega	15
6. Literatura.....	16

1. SPLOŠNO O STIKALNIH NAPAVALNIKI

V času sodobne elektronike si ne moremo zamišljati delovanja nekaterih naprav brez stikalnih pretvornikov, ki jim zagotavljajo energijo. Veliko število različnih napetostnih nivojev, zahteve po vse večjem energetske izkoristku ter velika specifična teža in neprilagodljivost transformatorskih napajalnikov veliki vhodni dinamiki (razmerjem med najvišjo in najnižjo vhodno napetostjo), so glavni vzrok za hiter in obsežen razvoj stikalnih pretvornikov.

Topologija stikalnih pretvornikov kot vmesnikov med enim in drugim napetostnim nivojem napajanj je največkrat odvisna od razmerja med vhodno in izhodno napetostjo ter posebnih zahtev, ki jim mora pretvornik ustrezati. Pri nizkih razmerjih med vhodno in izhodno napetostjo pridejo tako v poštev osnovne vezave pretvornikov brez galvanske ločitve, razen če ni ta posebej zahtevana. Pri višjih razmerjih napetosti pa je skoraj nujna uporaba pretvornikov s transformatorji, ki nam že sami po sebi ponujajo možnost galvanske ločitve.

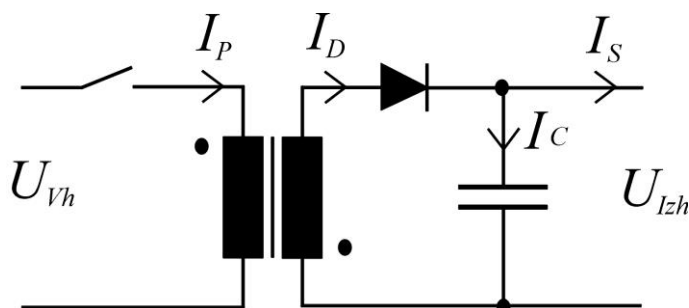
V nadaljevanju so opisane nakatere zanimive razmere stikalnih pretvornikov, ki jih razvija oddelek Razvoj in raziskave podjetja Iskraemeco in so namenjeni vgradnji v elektronske števec. Glavna značilnost teh stikalnih pretvornikov je njihova majhna izhodna moč, ki se giblje med 1 W in 5 W in velik razpon vhodne enosmerne napetosti, ki se giblje med 50 V in 700 V ter vhodno napetostno dinamiko od 4 do 14.

2. IZBIRA TOPOLOGIJE

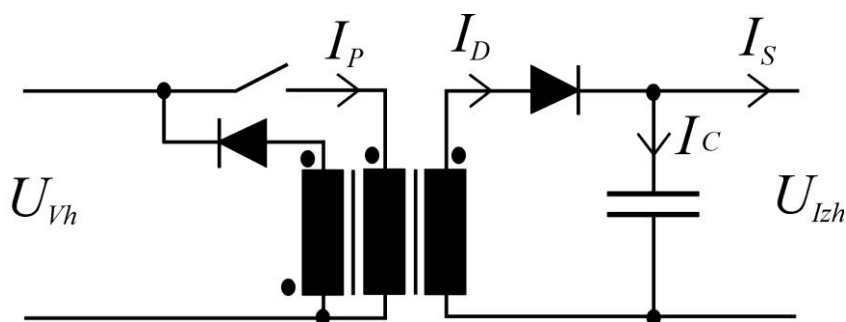
Trenutno najbolj zanimivi pretvorniki z galvansko ločitvijo delujejo v zapornem (flyback) ali prevodnem (forward) načinu delovanja. Zanje je na trgu veliko različnih izvedb regulatorjev od tokovnih do napetostnih kot tudi z vgrajenim stikalnim tranzistorjem ali brez njega. Vse bolj se uveljavljajo tudi resonančni stikalni pretvorniki, ki pa še nimajo tako velikega števila na trgu dostopnih krmilno regulacijskih integriranih vezij zato jih trenutno še zelo redko srečamo.

Zaporni in prevodni pretvorniki imajo dokaj dobro razdeljeno področje uporabe, saj zaporni pretvorniki delujejo pri nižjih vrednostih moči – nekje do 100 W, medtem ko prevodni pretvorniki delujejo pri višjih močeh – nad 100 W. Zakaj pride do take delitve je opisano nekoliko kasneje.

Osnovno shemo zapornega pretvornika vidimo na sliki 1, shemo prevodnega pa na sliki 2:



Slika 1: Osnovna shema zapornega pretvornika



Slika 2: Osnovna shema prevodnega pretvornika

Glavna razlika, ki pripelje do te delitve po moči, je način delovanja. Oba pretvornika prenašata energijo s primarne na sekundarno stran preko vmesne pretvorbe v magnetno energijo, le da zaporni pretvornik energijo v jedro shranjuje, medtem ko jo prevodni preko jedra le prenaša. V času, ko stikalni element prevodnega pretvornika prevaja, se v jedru zaradi toka skozi sekundarno navitje vzpostavi magnetni pretok. Ta magnetni pretok nato v sekundarnem navitju inducira napetost, ki ima tako polariteto, da preko diode požene sekundarni tok, s katerim kompenzira magnetni pretok vzpostavljen zaradi primarnega toka. In še ena velika posebnost prevodnih pretvornikov. Ob izklopu stikalnega elementa je v jedru še vedno prisoten nek magnetni pretok, ki inducira v obeh navitjih inducirano napetost

nasprotnega predznaka zaradi težnje po zveznosti magnetnega pretoka. Primarni tokokrog je razklenjen, zato v njem tok ne more teči, v sekundarnem tokokrogu pa dioda ne dovoljuje toka pri tej inducirani napetosti. Prav iz teh dveh razlogov je nujno dodatno navitje na transformatorju, ki omogoči razmagnetenje jedra in s tem preprečuje prevelike inducirane napetosti na ostalih dveh navitjih.

Nekoliko drugačne pa so razmere pri zapornem pretvorniku. V času, ko je stikalni element vključen, tok skozi primarno navitje enakomerno narašča. Z enako tendenco naraščanja pa narašča tudi magnetni pretok v jedru. V času, ko se magnetni pretok v jedru povečuje se v sekundarnem navitju inducira napetost, ki pa je take polaritete, da preko sekundarne diode ne more pognati sekundarnega toka. Po določenem vklopnem času stikalni element izključimo. V temu trenutku se v obeh navitjih inducira napetost, ki hoče pognati v navitjih tak tok, da bi bil magnetni pretok zvezen. Ker je primarni tokokrog razklenjen, v njem ne more teči tok. Na sekundarni strani pa dioda omogoča toku prosto pot. V času, ko je tranzistor izključen, se tako vrši pretvorba magnetne energije, shranjene v jedru, preko sekundarnega navitja na sekundarno stran. Proces prenosa energije traja vse, dokler magnetni pretok v jedru ne pade na vrednost 0, kar tudi pomeni, da ta tip transformatorja ne rabi dodatnega razmagnetilnega navitja, v kolikor pa pretvornik deluje v zveznem načinu pa dodatnega navitja prav tako ne potrebujemo saj magnetni pretok nikoli ne pa de na vrednost 0.

Glavna razlika je torej v načinu posredovanja energije, ki se pri prevodnem pretvorniku vrši v času vklopljenega stikala in brez njenega vmesnega shranjevanja, pri zapornem pa se posredovanje energije vrši z njenim vmesnim shranjevanjem. Iz tega razloga ima jedro transformatorja zapornega pretvornika veliko večji volumen kakor transformator prevodnega pretvornika. In prav iz tega dejstva izvira delitev, ki je bila opisana pri izbiri topologije.

Pri izbiri tipa pretvornika za vgradnjo v elektronski števec električne energije je poleg osnovnih lastnosti, ki so bile navedene, pomemben tudi prostor, ki ga tak pretvornik zasede na tiskanem vezju, njegova zanesljivost in življenjska doba, zaradi velikega pritiska konkurence pa še njegova cena. Pri nizkih močeh, za katere je pretvornik namenjen, nimamo skoraj nobene izbire in je tako bolj določen kakor izbran zaporni pretvornik. Kot regulacijski princip je bila izbrana tokovna regulacija, ki zagotavlja cenenost in pri majhnih močeh veliko zanesljivost in robustnost.

Nadaljevanje je posvečeno osnovnim izračunom, ki so potrebni za določitev ključnih elementov pretvornika. Najbolj izstopa izračun elektromagnetnih lastnosti transformatorja in dogajanj v njem tekom njegovega delovanja. To področje je zelo malokrat opisano in še to z velikimi poenostavitvami, ki niso vedno najprimernejše.

3. IZRAČUN KLJUČNIH PARAMETROV ZAPORNEGA STIKALNEGA NAPAVALNIKA Z GALVANSKO LOČITVIJO

Najpomembnejši nazivni podatki stikalnega napajalnika so navadno podani s strani porabnika in omrežja in so naslednji:

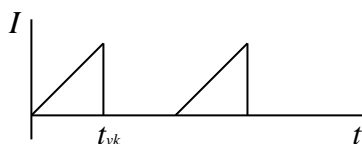
- nazivna izhodna moč P_{izh} in s tem nazivni tok I_S in napetost U_S ,
- najnižja vhodna napetost $U_{min,vh}$ pri kateri mora pretvornik še brez vplivov na izhodno napetost zagotavljati na izhodu nazivno izhodno moč P_{izh} .

To sta dva ključna podatka pretvornika, vsi ostali niso pogojeni direktno s porabnikom ali napajalnim omrežjem. Prav tako pa tudi zadostujeta za izračun ključnih močnostnih elementov pretvornika, in sicer usmernika, transformatorja, stikalnega tranzistorja in merilnega upora. Ključen podatek pri določanju moči teh elementov je največji efektivni tok, ki teče skozi pri najmanjši napetosti na vhodu in ga lahko določimo:

$$I_{ef} = \frac{P_{izh}}{U_{min,vh} \cdot \eta} \quad (1)$$

Pri čemer je η predvideni izkoristek pretvornika.

Zaradi stikalnega načina delovanja in izbranega zapornega tipa pretvornika lahko določimo tudi temensko (peak) vrednost toka, ki teče skozi stikalni tranzistor, transformator in merilni upor ob predpostavljenem največjem vklopnem razmerju D . Pri tem izhajamo iz slike 3 in poenostavljeno rečemo, da je induktivnost popolnoma neodvisna od toka, ki je zato linearno naraščajoč in na sekundarni strani linearno padajoč.



Slika 3: Približen potek primarnega toka pri najnižji vhodni napetosti

Efektivna vrednost toka je določena tudi z obliko signala, ki je izrazito žagaste oblike, zato lahko zapišemo njegovo efektivno vrednost

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_{vk}} \left(\frac{I_{peak}}{t_{vk}} t \right)^2 dt} = \sqrt{\frac{I_{peak}^2 t_{vk}}{3T}} \quad (2)$$

Ob upoštevanju razmerja t_{vk}/T , ki je enak vklopnemu razmerju D lahko zgornji izraz poenostavimo

$$I_{ef} = I_{peak} \cdot \sqrt{\frac{D}{3}}, D = \frac{t_{vk}}{T} = t_{vk} \cdot f, \quad (3)$$

V praktičnem načrtovanju stikalnih pretvornikov zelo velikokrat delamo napako, ko namesto efektivne vrednosti uporabljamo kar srednjo vrednost signala oziroma $\frac{1}{4}$ vrednosti I_{peak} .

Če izenačimo izraza 1 in 3, dobimo največjo vrednost toka v odvisnosti od izhodne moči, vhodne napetosti, izkoristka in vklopnega razmerja

$$I_{peak} \cdot \sqrt{\frac{D}{3}} = \frac{P_{izh}}{U_{min\,vh} \cdot \eta} \Rightarrow I_{peak} = \frac{P_{izh}}{U_{min\,vh} \cdot \eta} \cdot \sqrt{\frac{3}{D}} \quad (4)$$

V primeru uporabe tokovne PWM regulacije je eden ključnih elementov regulacijske zanke merilni upor, na katerem merjeni tok povzroča padec napetosti, ki ga uporabimo kot povratno informacijo. Navadno govorimo o neki največji napetosti, ki v vsakem primeru povzroči izklop močnostnega stikala. Glede na to vrednost lahko izrazimo upornost merilnega upora

$$R_M = \frac{U_{Mreg}}{I_{peak}}, \quad (5)$$

Ob upoštevanju enačbe za tok (4) sledi

$$R_M = \frac{U_{Mreg} \cdot U_{min\,vh} \cdot \eta}{P_{izh}} \cdot \sqrt{\frac{D}{3}} \quad (6)$$

4. IZRAČUN TRANSFORMATORJA

Ključni podatki pri izračunu transformatorja so zahtevana prenešana moč, frekvenca delovanja in najmanjša vhodna napetost. Frekvenco delovanja je potrebno izbrati glede na možnosti, ki nam jih ponujajo elektronski elementi in glede na specifične zahteve naprave.

Višanje frekvence ima veliko dobrih lastnosti, saj je z višjo frekvenco prenešana moč na enoto teže pretvornika večja, vendar pa se povečajo stikalne izgube in povečajo zahteve po kvalitetnejših in s tem dražjih polprevodnikih. Največkrat sta tako na tehtnico postavljeni teža pretvornika in njegova cena.

Za zaporni pretvornik lahko rečemo, da se prenos energije iz primarne na sekundarno stran, vrši v energijskih paketih, ki prehajajo preko transformatorja s stikalno frekvenco delovanja. Zato lahko pišemo naslednjo relacijo med frekvenco delovanja f , prenešeno močjo P_{sek} in enoto enega energijskega paketa W_{imp}

$$W_{imp} = \frac{P_{sek}}{f} \quad (7)$$

Pri tem je P_{sek} moč, ki se prenaša preko jedra in je z močjo P_{izh} povezana preko izkoristka.

Ker se energija enega impulza shrani v obliki magnetne energije v jedru transformatorja, lahko zapišemo povezavo z njegovo induktivnostjo, vendar ne smemo pozabiti, da se to zgodi samo v času, ko je stikalni element vklopljen

$$W_{imp} = \frac{L_{prim} \cdot I_{peak}^2}{2} \quad (8)$$

Ob upoštevanju enačbe 7 in 8 in ugotovitve o času, ki je na voljo, da se energija shrani v jedru, lahko izrazimo najmanjšo potrebno induktivnost primarnega navitja transformatorja

$$L_{prim} = \frac{2 \cdot P_{sek}}{f \cdot I_{peak}^2} \quad (9)$$

Če upoštevamo še energetski izkoristek prenešene moči

$$L_{prim} = \frac{2 \cdot P_{izh}}{f \cdot I_{peak}^2 \cdot \eta} \quad (10)$$

Izračun števila ovojev od te točke dalje lahko poteka na dva načina, ki sta odvisna od izbire magnetnih jeder. Prva možnost se nanaša na izbiro jedra s standardno zračno režo (kakršno nam ponujajo proizvajalci), druga pa dopušča izbiro jedra, ki mu zračno režo določimo sami. V prvem primeru se je tako treba naslanjati na serijske izdelke, pri drugi pa jih je potrebno izdelati po naročilu. V obeh načinih računanja pa je treba najprej izračunati najmanjšo zračno režo, ki mora biti zagotovljena, da magnetno jedro ne pade v nasičenje. Pri tem izhajamo iz izraza za magnetno upornost (12) in induktivnost (11)

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{l_m} \quad (11)$$

$$R_m = \frac{l_m}{\mu \cdot A} \quad (12)$$

Kar nas po njuni združitvi pripelje do izraza

$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (13)$$

Če v izrazu 13 upoštevamo magnetno upornost zraka in feromagnetnega jedra dobimo

$$L = \frac{N^2}{R_{mZ} + R_{mF}} \quad (14)$$

Kar nas po upoštevanju izrazov 11 in 12 pripelje do

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{l_{mZ} + \frac{l_{mF}}{\mu_F}} \quad (15)$$

Glavno oviro v izrazu 15 predstavlja število ovojev N , zato se jih znebimo preko izraza za induktivnost

$$I \cdot N = H_F \cdot l_F + H_Z \cdot l_Z \quad (16)$$

Kar po upoštevanju odnosov med B in H in upoštevanju približka, da je magnetna gostota B enaka v zračni reži in jedru, po preureditvi privede do

$$I \cdot N = \frac{B \cdot l_Z}{\mu_0} + \frac{B \cdot l_F}{\mu_0 \cdot \mu_F} \quad (17)$$

Če sedaj število ovojev, določeno z izrazom 17 vnesemo v izraz za induktivnost 15 dobimo induktivnost odvisno od jedra in toka, ki teče skozi navitje

$$L = \frac{A \cdot B^2}{\mu_0 \cdot I^2} \left(l_Z + \frac{l_F}{\mu_F} \right) \quad (18)$$

$$\frac{I^2 \cdot L}{A \cdot B} = \frac{B \cdot l_Z}{\mu_0} + \frac{B \cdot l_F}{\mu_0 \cdot \mu_F} \quad (19)$$

Izraz 19 opisuje magnetne napetosti v magnetnem sistemu. Prvi del predstavlja vir magnetne napetosti, to je navitje z induktivnostjo L , ki s tokom I v jedru preseka A povzroča magnetno gostoto B . Drugi del opisuje magnetno upornost zračne reže, tretji pa magnetno upornost jedra.

Iz izraza (19) lahko izrazimo najmanjšo dolžino zračne reže, ki pri izbranem jedru in električnih parametrih še zagotavlja, da jedro ne bo prešlo v nasičenje

$$l_Z = \frac{\mu_0 \cdot I^2 \cdot L}{A \cdot B^2} - \frac{l_F}{\mu_F} \quad (20)$$

Pri tako izračunani zračni reži je potrebno preveriti še njeno dolžino glede na dolžino magnetne poti v jedru. Zaželeno je, da je pot magnetne silnice v magnetnem jedru vsaj 100 krat daljša od poti v zračni reži. Na ta način se vsaj deloma izognemo prevelikemu stresanju, ki bi se pojavilo zaradi prevelike zračne reže. Samo stresanje v primeru nekaterih dušilk sicer ni tako pomembno kot v primeru transformatorja, kjer vsako stresanje pomeni direktno zmanjšanje izkoristka.

V kolikor je razmerje zračne reže in magnetne poti v jedru premajhno, je potrebno izbrati naslednje večje jedro. Iz enačbe (20) je razvidno, kateri podatki jedra najbolj vplivajo na zmanjšanje dolžine zračne reže, s tem pa tudi na zahtevano razmerje.

4.1 Določitev števila primarnih ovojev transformatorja s standardno zračno režo

V primeru uporabe jedra s standardno zračno režo je dolžina zračne reže izračunana z izrazom 20 samo informacija, ki pomaga pri izbiri standardne reže. Izberemo namreč jedro z naslednjo večjo standardno zračno režo kakor je izračunana.

Število ovojev je v temu primeru zelo enostavno določati, saj proizvajalci navadno podajo vrednost induktivnosti enega ovoja A_L . Zaradi kvadratične medsebojne odvisnosti med induktivnostjo in številom ovojem lahko sedaj pišemo potrebno število ovojev

$$N_p = \sqrt{\frac{L_{prim}}{A_L}} \quad (21)$$

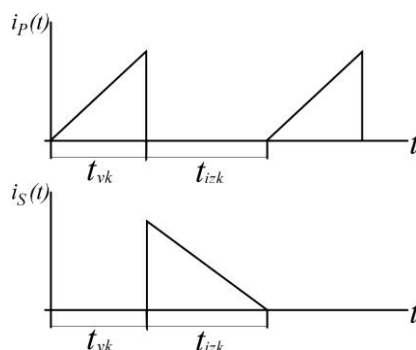
4.2 Določitev števila primarnih ovojev transformatorja s poljubno zračno režo

Pri tem načinu računanja ovojev je treba najprej izračunati dolžino zračne reže po enačbi 20, nato pa še njihovo število. Izraz, s pomočjo katerega jih računamo, je bil že uporabljen pri določevanju zračne reže in sicer enačba 17. Iz nje lahko s preureditvijo direktno določimo največje število primarnih ovojev, pri katerih jedro še ne bo v nasičenju

$$N_p = \frac{B}{I \cdot \mu_0} \left(l_Z + \frac{l_F}{\mu_F} \right) \quad (22)$$

4.3 Število sekundarnih ovojev

V kolikor si želimo nekoliko podrobneje pogledati dogajanje v magnetnem sklopu, kar je potrebno zaradi lažjega razumevanja razmer ob vklopih in večjih spremembah napetosti na sekundarni strani, moramo izhajati iz magnetnega pretoka. Za magnetni pretok fizikalni zakoni določajo njegovo zveznost, kar pomeni, da se njegova vrednost ne more skočno spreminjati. Zaradi medsebojne povezanosti toka in magnetnega pretoka slika 4 kaže potek primarnega in sekundarnega toka.



Slika 4: Časovni potek primarnega in sekundarnega toka

Magnetni pretok v jedru je v trenutku, ko se stikalni element na primarni strani zapre in tok i_p doseže vrednost I_{peak} , določen z naslednjim izrazom

$$\phi_{peak} = \frac{I_{peak} \cdot N_p \cdot \mu_0 \cdot A}{l_Z + \frac{l_F}{\mu_F}} \quad (23)$$

Če bi podoben izraz zapisali še za magnetni pretok, ko teče sekundarni tok, se izraza razlikujeta le v toku in številu ovojev

$$\phi_{peak} = \frac{I_{peak,S} \cdot N_S \cdot \mu_0 \cdot A}{l_Z + \frac{l_F}{\mu_F}} \quad (24)$$

In če oba prejšnja izraza (23 in 24) izenačimo, dobimo osnovno povezavo števila ovojev primarne in sekundarne strani s tokom

$$I_{peak} \cdot N_p = I_{peak,S} \cdot N_S \quad (25)$$

Poglejmo še povezavo med magnetnim pretokom in napetostjo, ki se inducira v navitju. Osnovna relacija pravi

$$U = N \frac{d\phi}{dt} \quad (26)$$

Predpostavimo lahko da je induktivnost dokaj konstantna v območju delovanja pretvornika. Iz tega sledi, da je električni tok, in s tem posredno tudi magnetni pretok v jedru, v času, ko se magnetna energija iz jedra pretvarja v električno, dokaj linearen. Zato lahko izraz 26 poenostavimo in pišemo samo še

$$U = N \frac{\phi}{t} \quad (27)$$

Zato lahko relacijo uporabimo na izrazu 24 in dobimo

$$U_S = \frac{I_{peak,S} \cdot N_S^2 \cdot \mu_0 \cdot A}{t_{izk} \cdot \left(l_Z + \frac{l_F}{\mu_F} \right)} \quad (28)$$

Podobno bi lahko pisali za primarno stran v času, ko se energija kopiči v jedru

$$U_P = \frac{I_{peak} \cdot N_P^2 \cdot \mu_0 \cdot A}{t_{vk} \cdot \left(l_Z + \frac{l_F}{\mu_F} \right)} \quad (29)$$

Po izenačitvi zgornjih dveh enačb in upoštevanju odvisnosti med tokom in ovoji (25) dobimo naslednje razmerje, ki opisuje soodvisnost napetosti, ovojev in vklopnih časov

$$\frac{U_S}{U_P} = \frac{N_S \cdot t_{vk}}{N_P \cdot t_{izk}} \quad (30)$$

In ob upoštevanju soodvisnosti vklopnih razmerij in vklopnih časov

$$\frac{U_S}{U_P} = \frac{N_S \cdot D}{N_P \cdot D_{izk}} \quad (31)$$

Število sekundarnih ovojev torej lahko najenostavneje določimo z izrazom

$$N_s = \frac{N_p \cdot U_{izh} \cdot D_{izk}}{U_{vh} \cdot D} \quad (32)$$

Izklopno razmerje D_{izk} je določeno preko vklopnega razmerja D z naslednjo relacijo

$$D_{izk} = 1 - D \quad (33)$$

Pri tej izbiri so sekundarni tokovi najmanjši, s tem pa najmanjše sevalne motnje, ki jih ti povzročajo, magnetni fluks pa je pri polni obremenitvi in najmanjši napetosti na meji trganja.

5. POSEBNA OBRATOVALNA STANJA PRETVORNIKA

Pod posebna stanja pretvornika štejemo razna delovanja pri katerih vhodni in izhodni parametri niso v nazivnih območjih delovanja. Ogleдали si bomo naslednja stanja:

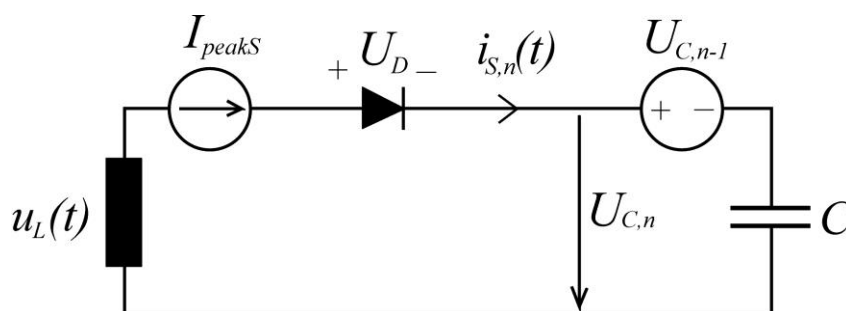
- zagon pretvornika,
- delovanje z vhodno napetostjo, ki je nižja od nazivne,
- delovanje z bremenom, manjšim od nazivnega in znižano vhodno napetostjo.

5.1 Zagon pretvornika

Pretvornik ima na izhodu navadno gladilni kondenzator, ki je ob vklopu prazen, torej brez naboja in zato brez napetosti na njem. V trenutku, ko se vklopi regulacijsko vezje pretvornika, le to zazna na izhodu prenizko napetost in zato poveča zeleno vklopno razmerje do največje vrednosti. Električni tok, ki steče skozi stikalni element, vzpostavi v jedru magnetni pretok, katerega največja vrednost je prednastavljena z regulatorjem. Po izklopu stikalnega elementa se prične energija iz jedra prenašati v sekundarni del vezja. Največja vrednost toka, ki se pojavi v sekundarnem navitju je opisana z izrazom 25, medtem ko je inducirana napetost opisana z enačbo 30. Prav pri napetosti pa se pojavi ob zagonu problem, saj te ob vklopu na sekundarni strani ni zaradi praznega kondenzatorja, nakar v odvisnosti od vrednosti kapacitivnosti počasi raste do nazivne vrednosti. Če predpostavimo, da je vklopni čas določen z največjim vklopnim razmerjem, ki je odvisen od primarne napetosti in je konstantna vrednost, kakršno je tudi število ovojev, lahko ugotovimo, da je izklopni čas t_{izk} , ki bi bil

potreben da se vsa energija nakopičena v jedru odda gladilnemu kondenzatorju, odvisen samo od sekundarne napetosti. Ker pa je ta čas zaradi načina delovanja omejen na vrednost, opisano z izklopnim razmerjem D_{izk} (33), lahko ugotovimo, da se v primeru velike kapacitivnosti gladilnega kondenzatorja vsa energija ne pretvori nazaj v električno, ampak je del ostane ujet v jedru. Ob ponovnem vklopu pa stikalni element zopet omogoči toku, da teče skozi primarno navitje in zopet povečuje magnetni pretok. Zaradi preostalega pretoka v jedru se ta vrednost povečuje do mejne vrednosti, ki je dosežena v veliko krajšem času. Če je prisotna še neka časovna zakasnitev med regulacijskim vezjem in stikalnim elementom, lahko pride celo do nasičenja jedra, kar se opazi kot zelo hiter in velik porast primarnega toka in lahko povzroči celo določene poškodbe električnih elementov.

Poglejmo si primer vklopa, ko je napetost kondenzatorja U_C enaka 0, in pri tem izhajajmo iz nadomestne vezave, ki jo kaže slika 5.



Slika 5: Nadomestna vezava sekundarne strani pretvornika

Energijo, ki se shrani v obliki magnetnega pretoka jedra, določa enačba 8. Če bi se lahko energija celotnega energijskega pulza pretvorila v energijo električnega polja kondenzatorja C bi to pomenilo na njem približno naslednjo spremembo napetosti

$$\Delta U_C = \sqrt{\frac{2 \cdot W_{imp}}{C}} \quad (34)$$

Vendar bi se to zgodilo v času, ki je približno enak

$$t_0 = \frac{\pi \cdot \sqrt{L_S \cdot C}}{2} \quad (35)$$

V kolikor je izklopni čas t_{izk} manjši, bo del energije ostal neprenešen in se bo ohranil v obliki magnetnega pretoka v jedru.

V kolikor regulator čaka, da se vsa energija iz jedra izprazni v kondenzator, pomeni, da se bo kondenzator na izhodu napolnil do nazivne napetosti z naslednjim številom celotnih impulzov

$$n = \frac{C \cdot U^2}{2 \cdot W_{imp}} \quad (36)$$

Prejšnje enačbe (34 – 36) seveda veljajo samo za primere, ko je t_{izk} daljši od t_0 . Za nekoliko bolj natančen opis razmer ob vklopu, ko je t_{izk} krajši od t_0 , si pogledajmo enačbo, ki opisuje električni tok sekundarne strani. Pri opisu so upoštevane naslednje predpostavke: temenska vrednost toka sekundarne strani I_{peakS} je ob vsakem impulzu, preden napetost na kondenzatorju zraste do nazivne vrednosti, vedno temenska vrednost toka, ki je za prestavo večji od primarnega največjega toka I_{peak} ; zaradi nizke napetosti na izhodu lahko rečemo, da v porabnik ne teče tok; upornosti vezi in serijsko upornost transformatorja zanemarimo, napetostni padec na diodi pa upoštevamo kot napetost U_D . Z upoštevanjem tega dobimo naslednji izraz za tok n-tega intervala

$$i_{S,n}(t) = I_{peakS} \cdot \cos \frac{t}{\sqrt{L \cdot C}} - (U_{C,n-1} + U_D) \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \sin \frac{t}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (37)$$

Zaradi diode, ki je vezana v serijo z dušilko in kondenzatorjem, ta enačba velja samo za prvi polval toka, dokler ta ne doseže vrednosti nič. Enačba torej velja samo za čase od 0 do t_0 .

Iz tega sledi, da se napetost na kondenzatorju v enem pulzu prenešene energije spremeni iz napetosti $U_{C,n-1}$, v napetost $U_{C,n}$

$$U_{C,n} = U_{C,n-1} + I_{peakS} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \sin \frac{t_{izk}}{\sqrt{L \cdot C}} + (U_{C,n-1} + U_D) \cdot \left(\cos \frac{t_{izk}}{\sqrt{L \cdot C}} - 1 \right) \quad (38)$$

Če izraz razvijemo in izrazimo napetost na kondenzatorju v n-tem koraku z napetostjo m-tega koraka, dobimo naslednjo vsoto

$$U_{C,n} = U_{C,m} \cdot \cos^{m-n} \frac{t_{izk}}{\sqrt{L \cdot C}} + \left(I_{peakS} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \sin \frac{t_{izk}}{\sqrt{L \cdot C}} + U_D \cdot \cos \frac{t_{izk}}{\sqrt{L \cdot C}} - U_D \right) \sum_{i=m-n}^m \cos^{i-1} \frac{t_{izk}}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (39)$$

Če sedaj predpostavimo, da je kondenzator na izhodu ob vklopu popolnoma prazen, je prvi del enačbe z začetno vrednostjo enak 0 in ostane samo vsota, iz katere lahko s pomočjo numerične matematike določimo najmanjše število vklopov k , ki so potrebni, da se kondenzator na izhodu napolni do želene napetosti U_{Ck} in prične delovati regulacijska zanka

$$U_{Ck} = \left(I_{peakS} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \sin \frac{t_{izk}}{\sqrt{L \cdot C}} + U_D \cdot \cos \frac{t_{izk}}{\sqrt{L \cdot C}} - U_D \right) \sum_{i=0}^k \cos^{i-1} \frac{t_{izk}}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (40)$$

Prejšnje trditve veljajo v primeru, ko regulator vedno dopusti skozi primarno navitje največji dovoljeni tok in pri stalni vrednosti izklopnega časa.

5.2 Primer, ko je vhodna napetost nižja od nazivne

V primeru, da je na vhodu pretvornika napetost, ki je manjša od nazivne vrednosti, se razmere nekoliko spremenijo. Največja vrednost energijskega pulza se zmanjša, saj tok narašča počasneje kakor pri napetosti enaki ali večji od nazivne vrednosti. Temensko vrednost toka lahko izrazimo s pomočjo enačbe 29

$$I_{peakZ} = \frac{I_{peak} \cdot U_Z}{U_{min,vh}} \quad (41)$$

Pri čemer je U_Z znižana napetost na vhodu pretvornika, $U_{min,vh}$ pa najmanjša napetost pri kateri pretvornik ob nazivni obremenitvi še normalno deluje, pri tem sta obe vrednosti določeni za primer največjega vklopnega razmerja. Energijski impulz je v temu primeru naslednji

$$W_{imp,Z} = \frac{L_{prim} \cdot I_{peakZ}^2}{2} \quad (42)$$

Oziroma izražen z razmerjem vhodnih napetosti

$$W_{imp,Z} = \frac{L_{prim} \cdot I_{peak}^2}{2} \cdot \left(\frac{U_Z}{U_{min,vh}} \right)^2 \quad (43)$$

Kar ob upoštevanju stikalne frekvence pripelje do največje razpoložljive moči na sekundarni strani

$$P_{izh,Z} = \frac{f \cdot \eta \cdot L_{prim} \cdot I_{peak}^2}{2} \cdot \left(\frac{U_Z}{U_{min,vh}} \right)^2 \quad (44)$$

Iz tega pa lahko enostavno določimo razpoložljivo moč pri zmanjšani napetosti v odvisnosti od napetosti in nazivne razpoložljive moči

$$P_{izh,Z} = P_{izh} \left(\frac{U_Z}{U_{min,vh}} \right)^2 \quad (45)$$

5.3 Delovanje z bremenom manjšim ali večjim od nazivnega

Če je breme, priključeno na sekundarno stran pretvornika, manjše od nazivnega, bo pretvornik normalno vzdrževal izhodno napetost tudi v primeru, ko bo vhodna napetost nižja od najnižje vhodne napetosti $U_{min,vh}$, podobno pa tudi v primeru, ko je breme večje od nazivnega pretvornik deluje le do neke napetosti, ki je večja od $U_{min,vh}$. Pri tem je treba poudariti, da delovanje z večjim bremenom od nazivnega pri uporabi tokovnih regulatorjev teoretično ni možno, ker to omejuje tokovna limita.

Pri tem lahko enostavno izhajamo iz prejšnje točke in zadnje enačbe 45. Z delno preureditvijo dobimo vhodno napetost, pri kateri bo z nekim drugačnim bremenom pretvornik še normalno deloval in pri tem na izhodu vzdrževal regulirano napetost

$$U_Z = U_{min,vh} \cdot \sqrt{\frac{P_{izh,Z}}{P_{izh}}} \quad (46)$$

6. LITERATURA

- R. W. Erickson: Fundamentals of power electronics, Current programmed control
- Podatkovni listi integriranih vezij UC2845 proizvajalca Motorola
- Miljutin Željeznov: Osnove teorije elektromagnetnega polja