

11 DIREKTNI PRETVORNIKI

11.1 Uvod

Od vseh pretvornikov energetske elektronike so za ekstremne zahteve glede izkoristka, glede najmanjšega volumna in če ni potrebe po galvanski ločitvi, najbolj primerni direktni DC/DC pretvorniki, ki jih imenujemo:

- a) pretvorniki navzdol (Buck converter)
- b) pretvorniki navzgor (Boost converter)
- c) zaporni pretvorniki (Buck - Boost converter)

Ti so teoretična osnova za vse ostale izvedbe direktnih pretvornikov, ki se uporabljajo v najrazličnejših napajalnih sistemih najmanjših moči (nekaj Watov) pa do največjih (varilne naprave) in vse do pretvornikov, ki so namenjeni najrazličnejšim elektromotorskim pogonom.

11.2 Vezja močnostne (energetske) elektronike

Najprej bomo obdelali pretvornike, ki so priključeni direktno na enosmerno vsiljeno napetost. Brez močnostnega transformatorja sta torej galvansko povezana preko pretvornika vir in uporabnik ali splošno rečeno napajalni sistem in napajani sistem.

Sem spadajo:

- a) direktni enosmerni pretvorniki za eno in večkvadrantno obratovanje
- b) lastno vodeni usmerniki in razsmerniki

Prednosti direktnih pretvornikov, ki ne uporabljajo transformatorja za galvansko ločitev, sta predvsem majhna teža in volumen. Ker se odpovemo potencialni ločitvi, smo deležni znatne prednosti glede razmerja instalirane stikalne oziroma preklopne moči in prenesene moči.

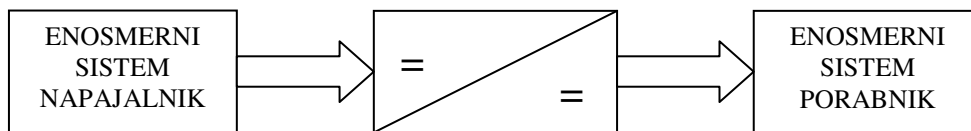
$$\frac{\text{instalirana preklopna moč}}{\text{maksimalna prenesena moč}}$$

Instalirana preklopna moč je definirana kot vsota preklopnih moči vseh stikalnih elementov (ventilov) vezja. Inštalirano preklopno moč definiramo kot:

$$P_p = \sum_{v=1}^n U_{pv} \cdot I_{pv}$$

Pri tem je: n - število stikalnih ventilov
 U_{pv} - teoretično maksimalna napetost na ventilu v
 I_{pv} - teoretično maksimalen tok ventila v

Osnovna naloga direktnega enosmernega presmernika, ki se nahaja med dvema enosmernima sistemoma je, da prenaša energijo od enega do drugega brez principielnih izgub, kot je to primer takšne povezave preko predupora.



Slika 11.1: Enosmerni nastavljalnik

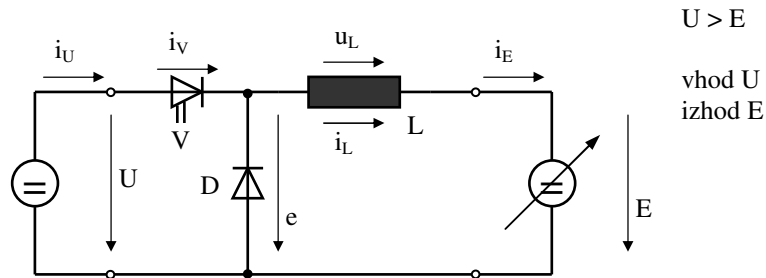
Čeprav je v splošnem pri tej vrsti pretvornikov napetost obeh sistemov napajalnega in napajanega, spremenljiva (n.pr. enosmerno v izmenično) bomo zaradi poenostavljanja privzeli, da je napetost obeh sistemov za nekaj stikalnih period konstantna. Pri tem bomo uporabili oznako U za vire s konstantno napetostjo in E za vire s spremenljivo napetostjo.

11.3 Osnovna vezja za enokvadrantno delovanje

Glede na predpostavljene napetostne in potencialne razmere si bomo najprej ogledali najbolj osnovna in pomembna vezja, ki omogočajo doseganje optimalnih izkoristkov, minimalno težo in volumen na enoto moči in ceno.

To so: - pretvornik navzdol (nem. Tiefsetzsteller, angl. Buck converter)
 - pretvornik navzgor (nem. Hochsetzsteller, angl. Boost converter)
 - zaporni pretvornik ali pretvornik dol-gor (nem. Sperrsteller ali Hoch und Tiefsetzsteller, angl. Flyback ali Buck-Boost-Converter)

11.3.1 Pretvornik navzdol (Buck – Converter)



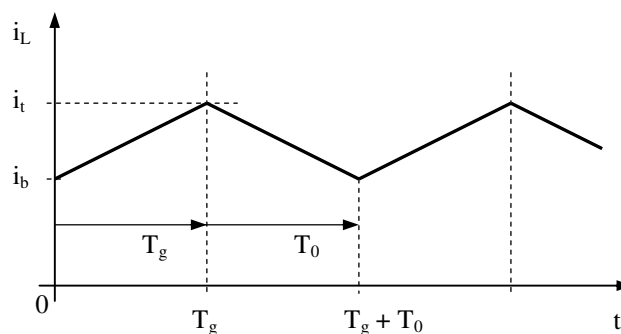
Slika 11.2: Shema pretvornika navzdol

Ko v času $t = 0$ vklopi ventil V, se vzpostavi zveza vira U preko ventila V in dušilke L na porabnik E. Tok i_L skozi dušilko prične zaradi $U > E$ – kar je pogoj za delovanje tega vezja – naraščati po enačbi:

$$i_L = i_b + \frac{1}{L} \cdot \int_{t=0}^t (U - E) dt \quad (1a)$$

Medtem zavzame napetost e vrednost U

$$e = e_{\max} = U \quad (1b)$$



Slika 11.3: Časovni potek toka

Če se (izklopni) ventil V po poteku časa prevajanja T_g , torej v času $t = T_g$ zopet zapre, mora tok dušilke i_L teči naprej – to zahteva v dušilki nakopičena energija – po na novo vzpostavljeni tokovni veji skozi diodo D.

Breme ali splošno sprejemni sistem je še naprej napajan (z napetostjo E) s tokom, ki upada po enačbi:

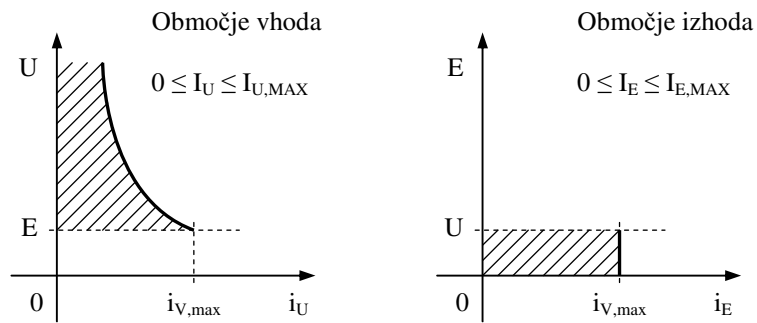
$$i_L = i_t + \frac{1}{L} \cdot \int_{t=T_g}^t (-E) dt \quad (2a)$$

Pri tem ima napetost e minimalno vrednost

$$e = e_{\min} = 0 \quad (2b)$$

V ustaljenem stanju bo ventil V ponovno vklopil, ko bo tok dušilke dosegel zopet svojo začetno vrednost i_b , t.j., po času T_o kar pomeni po trajanju zapore ali zapornem času. Tok potem zopet narašča v smislu enačbe 1a. Zanimiva so nastavitvena območja za primer pretvornika navzdol. Ta nam narekujejo območje nastavljanja toka dušilke i_L in toka ventila i_V .

Za pretvornik navzdol velja $U \geq E$.



Slika 11.4: Nastavitveno območje (za $i_L \approx I_L$ in $\hat{i}_V \leq \hat{i}_{V,\max}$)

$I_{U,\max}$ in $I_{E,\max}$ sta največji možni srednji vrednosti tokov, ki lahko nastopata na vhodu ($I_{U,\max}$) oziroma na izhodu ($I_{E,\max}$) obravnavanega vezja.

Za $i_L = I_L$ in $\hat{i}_V < \hat{i}_{V,\max}$ velja

$$\begin{aligned} \hat{i}_{V,\max} &= i_{L,\max} = I_{E,\max} \\ I_{U,\max} \cdot U &= I_{E,\max} \cdot E = \hat{i}_{V,\max} \cdot E \end{aligned} \quad (3) \text{ in } (4)$$

Iz (4):

$$I_{U,\max} = \hat{i}_{V,\max} \cdot \frac{E}{U} \quad (5)$$

Kot primer si oglejmo še izhodno nastavitveno območje:

Po definiciji dobimo za srednjo vrednost napetosti e :

Srednja vrednost e ($I_E > 0$):

$$\bar{e} = \frac{1}{T_g + T_o} \cdot \int_{t=0}^{t=T_g+T_o} e(t) dt = \frac{1}{T_g + T_o} \cdot (U \cdot T_g + 0 \cdot T_o)$$

torej

$$\bar{e} = \frac{T_g}{T_g + T_o} \cdot U = \tau_g \cdot U \quad (\text{relativni prevajalni čas } \times U) \quad (6)$$

Potem dobimo:

$$\begin{array}{lll} \text{za } \tau_g = 0 & \bar{e} = \bar{e}_{\min} = 0 & \text{in} \\ \text{za } \tau_g = 1 & \bar{e} = \bar{e}_{\max} = U & \text{to so srednje vrednosti } e \end{array}$$

Po drugi strani velja

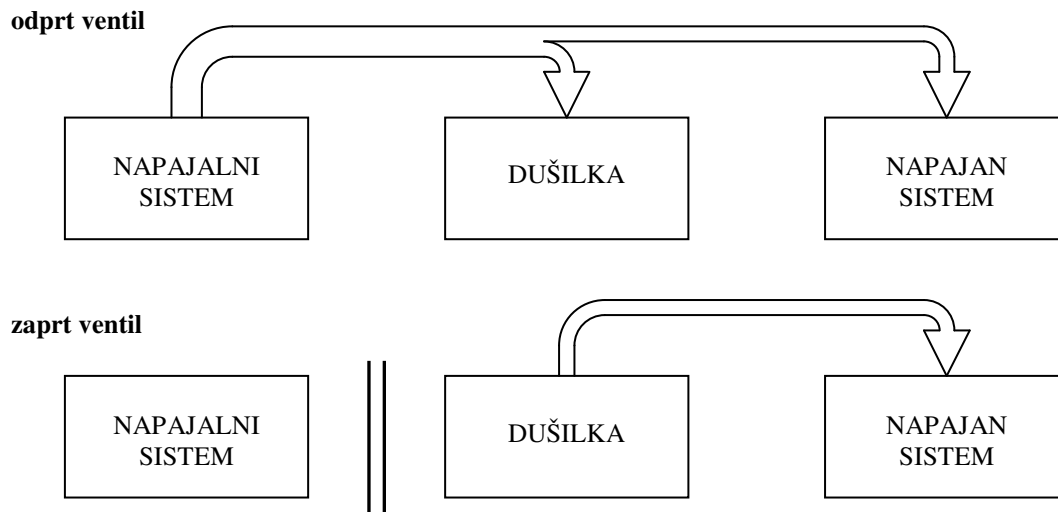
$$2. \text{ KHZ} \quad e - E - u_L = 0$$

$$\bar{e} - E - \frac{1}{T_g + T_o} \cdot \int_{t=0}^{T_g+T_o} u_L dt = 0 \quad \text{v stacionarnem (utečenem) stanju}$$

$$\text{in s tem} \quad \Rightarrow \quad \bar{e} = E$$

$$\text{torej tudi} \quad \Rightarrow \quad 0 \leq E \leq U$$

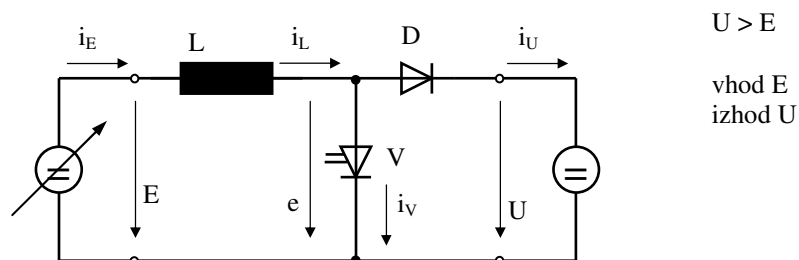
Pretok energije pretvornika navzdol je razviden iz poteka tokov v posameznih časovnih odsekih (odprtega ventila V in zaprtega ventla V) stikalne periode. Zaradi primerjave z ostalimi vrstami pretvornikov si dodatno razjasnimo potek energije še z naslednjima diagramoma:



Slika 11.5: Pretok energije v odprtem in zaprtem stanju ventila

Med prevajanjem ventila V se en del energije, ki jo odvzemamo napajalnemu sistemu, prenaša direktno v napajani sistem (breme), drugi del pa se kopiči v obliki magnetne energije v dušilki. V času ko je tranzistor zaprt je pretok energije iz napajalnega sistema prekinjen. Takrat je breme napajano le iz magnetnega polja dušilke.

11.3.2 Pretvornik navzgor (Boost-Converter)



Slika 11.6: Shema pretvornika navzgor

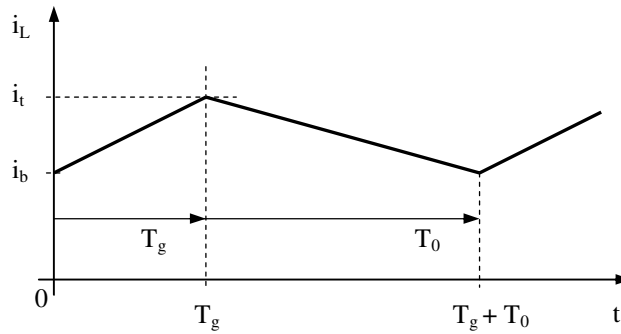
$U > E$

L, V, D so enaki gradniki kot pri pretvorniku navzdol, le da so drugače razporejeni. Če pri tem vezju vklopimo ventil v času $t = 0$, se vzpostavi tokokrog od E skozi dušilko in ventil V nazaj na E . Tok skozi dušilko L narašča linearno po enačbi:

$$i_L = \frac{1}{L} \cdot \int_{t=0}^t E dt$$

$$i_L = i_b + \frac{1}{L} \int_{t=0}^t E dt \quad (1a)$$

$$e = e_{\min} = 0 \quad (1b)$$



Slika 11.7: Časovni potek toka

Po preteku časa prevajanja $t = T_g$ ventil V izklopi, tok dušilke pa tudi pri tem vezju mora teči še naprej, saj to zahteva v dušilki nakopičena energija. Skozi na novo vzpostavljeno tokovno vejo vir, L, D, breme, vir, napaja breme (napajanje sistema) z napetostjo U torej na višji napetostni nivo ($U > E$) in pri tem upada linearno po enačbi (2a):

Med tem zavzema napetost e vrednost U . Za to tokovno vejo velja:

$$i_L = i_t + \frac{1}{L} \int_{t=T_g}^t (E - U) dt \quad (2a)$$

$$e = e_{\max} = U \quad (2b)$$

V ustaljenem stanju bo ventil V vklopljen zopet takrat, ko bo tok skozi dušilko dosegel svojo izhodiščno vrednost i_b . Zaprt bo torej za čas T_0 , potem pa bo tok zopet naraščal v vklopljenem stanju T_g po enačbi (1a).

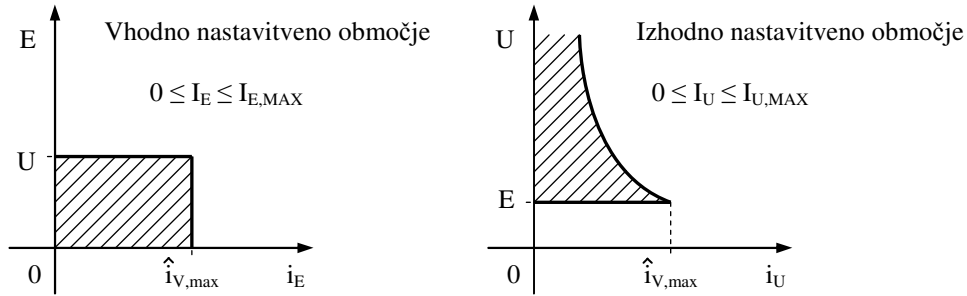
Tudi tukaj nas zanimajo nastavitvena območja oziroma razmere v katerih ta pretvornik lahko deluje.

Nastavitvena območja (za $i_L \approx I_L$ in $\hat{i}_V \leq \hat{i}_{V,\max}$)

Ta so določena glede na razmerje:

$$U > E$$

kakor tudi glede na delovanje ventilov V in D.

Slika 11.8: Nastavitveno območje (za $i_L \approx I_L$ in $\hat{i}_V \leq \hat{i}_{V,max}$)

$I_{E,max}$ in $I_{U,max}$ sta pri tem največji možni srednji vrednosti vhoda ($I_{E,max}$) in izhoda ($I_{U,max}$) tega vezja.

Za $i_L = I_L$ in $\hat{i}_V = i_{V,max}$ velja

$$\hat{i}_{V,max} = \hat{i}_{L,max} = I_{E,max} \quad (3)$$

$$\text{Bilanca moči: } I_{U,max} U = I_{E,max} E = \hat{i}_{V,max} E \quad (4)$$

iz (4):

$$i_{U,max} = \hat{i}_{V,max} \cdot \frac{E}{U} \quad (5)$$

Glede na nadaljnjo uporabo tega vezja si pogledjmo še naslednjo interpretacijo vhodnega nastavitvenega območja. Analogno kot pri pretvorniku navzdol dobimo za srednjo vrednost napetosti e :

Srednja vrednost e ($I_E > 0$):

$$\bar{e}^{p.d} = \frac{1}{T_g + T_o} \cdot \int_{t=0}^{t=T_g+T_o} e(t) dt = \frac{1}{T_g + T_o} \cdot (0 \cdot T_g + U \cdot T_o)$$

torej

$$\bar{e}^{p.d} = \frac{T_o}{T_g + T_o} \cdot U = \left[1 - \frac{T_g}{T_g + T_o} \right] \cdot U = (1 - \tau_g) \cdot U \quad (6)$$

Potem dobimo:

$$\begin{array}{lll} \text{za } \tau_g = 0 & \bar{e} = \bar{e}_{\max} = U & \text{in} \\ \text{za } \tau_g = 1 & \bar{e} = \bar{e}_{\min} = 0 & \end{array}$$

Po drugi strani velja

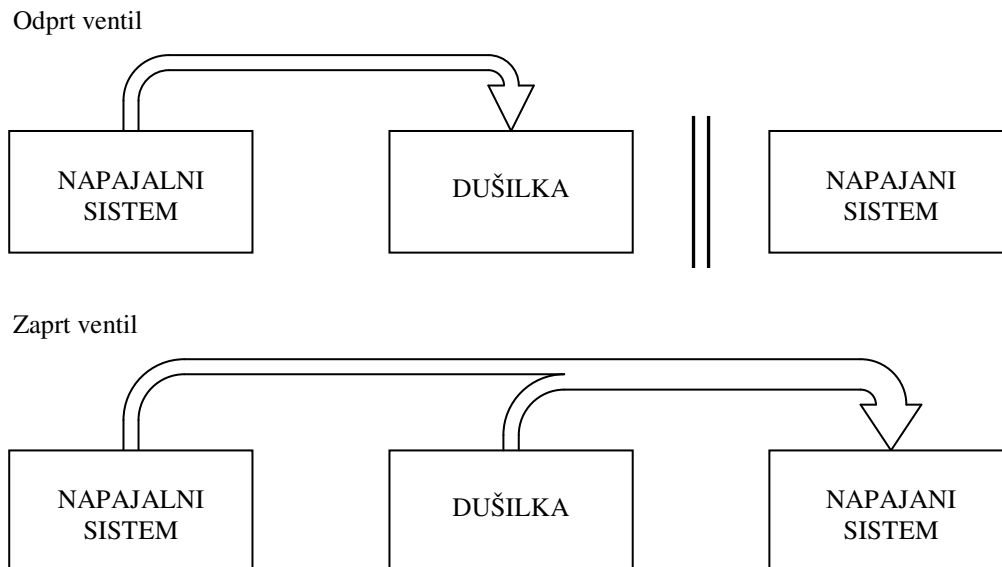
2. KHZ

$$\bar{e} - E - \frac{1}{T_g + T_0} \cdot \int_{t=0}^{T_g + T_0} u_L dt = 0 \quad \text{v stacionarnem (utečenem) stanju}$$

$$\text{in s tem} \quad \Rightarrow \quad \bar{e} = E$$

$$\text{torej tudi} \quad \Rightarrow \quad 0 \leq E \leq U$$

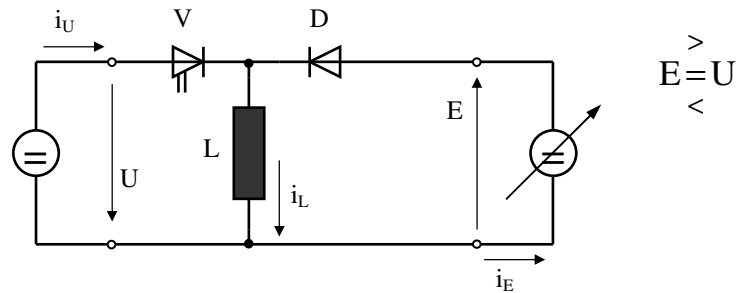
Energijski pretok je razviden iz posamičnih tokovnih poti, ki se vzpostavljajo z ventiloma V in D. Primerjava z ostalimi vezji pa je razložena s spodnjima diagramoma:



Slika 11.9: Pretok energije v odprtem in zaprtem stanju ventila

Med tem ko prevaja ventil V se energija iz izvora pretaka v dušilko in se v njej hrani v obliki magnetne energije. V času, ko je ventil zaprt pa se breme napaja delno iz napajalnega sistema, delno pa iz energije, ki je shranjena v dušilki.

11.3.3 Zaporni pretvornik (Sperrsteller ali angl. Flyback ali Buck-Boost-Converter)



Slika 11.10: Shema zapornega pretvornika

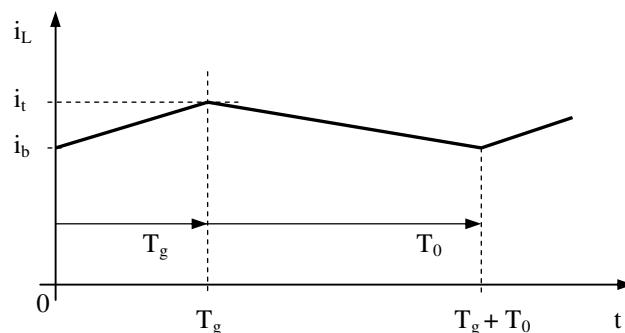
L, V, D: enaki gradniki kot pri pretvorniku navzdol in pri pretvorniku navzgor le še enkrat drugače razporejeni. Značilnost tega pretvornika je, da združuje funkciji obeh predhodnih pretvornikov le, da obrne potencial izhoda. To je lahko prednost ali slabost, kar je odvisno od celotne naprave v kateri kot podsestav nastopa zaporni pretvornik.

Ko v času $t = 0$ ventil V vklopi se vzpostavi tokokrog skozi dušilko L in tok narašča časovno linearno po enačbi:

$$i = \frac{1}{L} \cdot \int_{t=0}^t U dt$$

Če se to zgodi pri nekem toku i_b , potem velja

$$i_L = i_b + \frac{1}{L} \cdot \int_{t=0}^t U dt \quad (1)$$



Slika 11.11: Časovni potek toka

Ko po času T_g ventil V zopet zapre, se vzpostavi tokokrog iz dušilke L preko bremena in diode. Ta tok vzdržuje energija dušilke in upada glede na razmere v tem tokokrogu časovno linearno po enačbi.

$$i_L = i_t + \frac{1}{L} \int_{t=T_g}^t (-E) dt \quad (2)$$

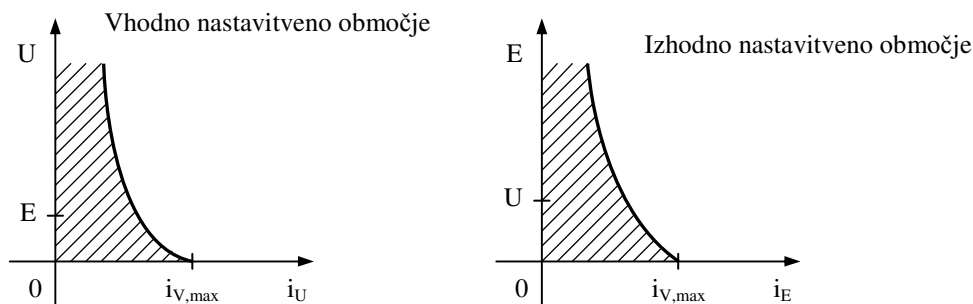
V ustaljenem stanju ventil V vklopi pri toku dušilke i_b , izklopi pa pri toku i_t .

Tudi tukaj lahko govorimo o nastavitvenih območjih (za $i_L \approx I_L$ in $\hat{i}_V = \hat{i}_{V,max}$).

To je pri tem pretvorniku posebno enostavno, saj v nobenem primeru napetost E bremenskega dela ni povezana z napajanjem. Ta pretvornik lahko dela torej za vse vrednosti

$$\begin{matrix} > \\ E=U \\ < \end{matrix}$$

Nastavitvena obočja so torej odvisna le od omejitev, ki jih postavljajo gradniki V in D.



Slika 11.12: Nastavitveno območje (za $i_L \approx I_L$ in $\hat{i}_V = \hat{i}_{V,max}$)

$I_{U,max}$ in $I_{E,max}$ sta pri tem največji možni srednji vrednosti tokov, ki si jih pri tem vezju lahko privoščimo na vhodu ali izhodu.

Za $\hat{i}_L = i_L$ in $\hat{i}_V = \hat{i}_{V,max}$ velja (vezje):

$$\hat{i}_{L,max} = \hat{i}_{V,max} \quad (3)$$

in bilanca nabojev:

$$I_{U,max} \cdot (T_o + T_g) = i_{L,max} \cdot T_g = \hat{i}_{V,max} \cdot T_g \quad \text{vklopljeno stanje} \quad (4)$$

$$I_{E,max} \cdot (T_o + T_g) = i_{L,max} \cdot T_o = \hat{i}_{V,max} \cdot T_o \quad \text{izklopljeno stanje} \quad (5)$$

prav tako bilanca moči:

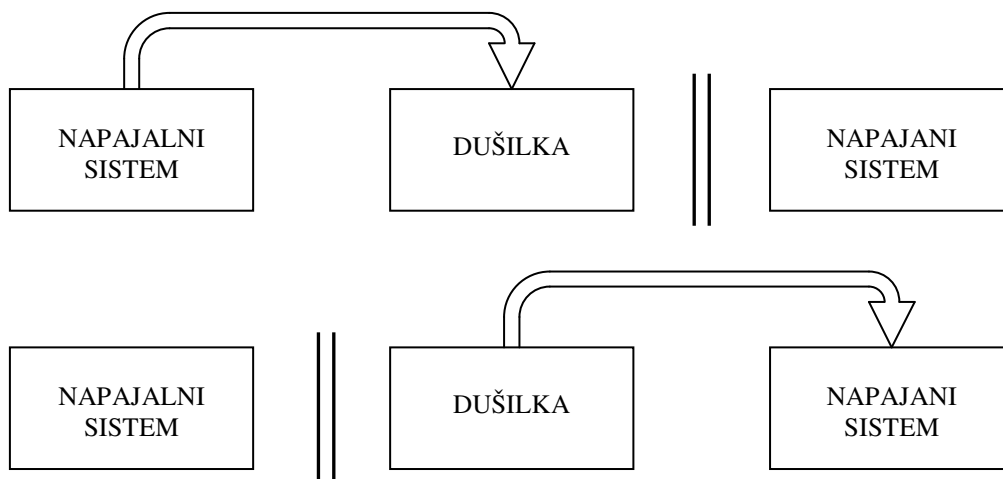
$$I_{U,\max} \cdot U = I_{E,\max} \cdot E \quad (6)$$

$$(4) : (5) \rightarrow \frac{T_g}{T_o} = \frac{I_{U,\max}}{I_{E,\max}} = \frac{E}{U} \quad (7)$$

$$(7) \rightarrow (4): I_{U,\max} = \hat{i}_{V,\max} \cdot \frac{1}{1+U/E} \quad (8)$$

$$(7) \rightarrow (5): I_{E,\max} = \hat{i}_{V,\max} \cdot \frac{1}{1+E/U} \quad (9)$$

Energijski pretok pri tem našem zapornem pretvorniku je zopet razviden iz tokokrogov, ki jih vzpostavljata ventila V in D.

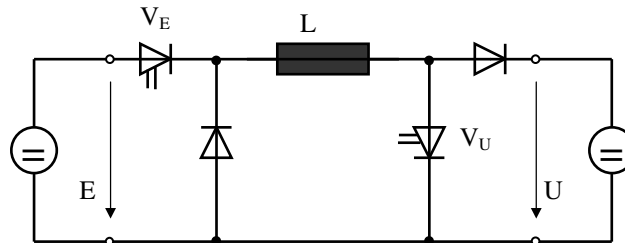


Slika 11.13: Pretok energije v odprtem in zaprtem stanju ventila

Ko prevaja ventil V se energija iz napajalnega sistema pretaka v dušilko, koder se shranjuje v obliki magnetnega polja. V času ko je V zaprt pa je sprejemni sistem napajan z energijo magnetnega polja dušilke.

Pri tem ne pride do direktnega pretoka energije iz napajalnega sistema v napajan sistem. To je principierna razlika v delovanju v primerjavi s pretvornikom navzgor in navzdol. Pri prejšnjih dveh pretvornikih je vedno del energije prešel iz napajanja v breme, drugi del pa se je predhodno shranil v obliki magnetnega polja v dušilki. Pri zapornem pretvorniku pa se celotna energija med prevajanjem ventila V shrani v dušilki (na koncu prevajanja ima največjo vrednost) in se, ko je ventil V zaprt prenese preko diode D v breme. To dejstvo zahteva večjo dušilko, torej večjo težo glede moči, slabši izkoristek pa tudi slabše razmerje instalirane preklopne moči proti preneseni moči.

Zato moramo pri tem razmisliti, če takšen zaporni pretvornik ni bolje nadomestiti s tako imenovano kaskado pretvornika navzdol in pretvornika navzgor.



Slika 11.14: Kaskada pretvornika navzgor in pretvornika navzdol

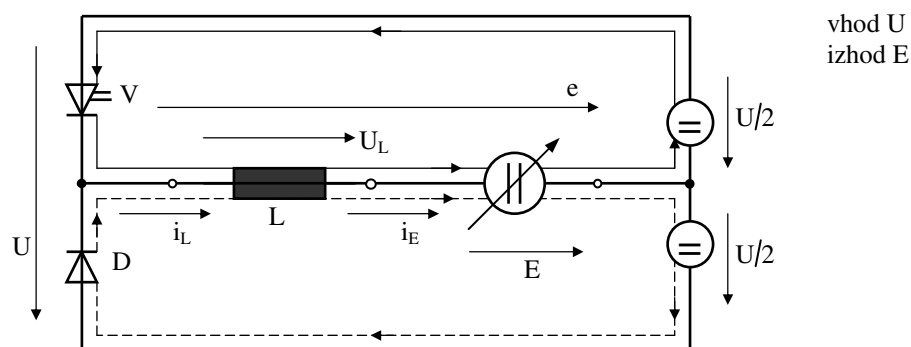
$E < U$: V_E - stalno prevaja; V_U preklaplja (delovanje pretvornika navzgor)
 $E > U$: V_U - stalno zaprt; V_E preklaplja (delovanje pretvornika navzdol)

11.4 Enosmerni nastavljalnik za večkvadrantno delovanje

11.4.1 Dvokvadrantni nastavljalnik s spremembo smeri napetosti

Takšna vezja omogočajo izmenjavo električne energije med dvema sistemoma v obeh smereh. Te vrste vezij imajo minus pol enosmernega sistema E (ki je običajno spremenljiv) vezan ne na minus pol enosmernega sistema U, pač pa na njegov srednji odcep: Če izhajamo iz pretvornika navzdol ali pretvornika navzgor, vidimo, da smo nastavitveno območje premaknili za polovico proti negativni smeri.

11.4.2 Pretvornik navzdol s spremembo smeri napetosti



Slika 11.15: Shema pretvornika navzdol s spremembo smeri napetosti

Za obe možni stikalni stanji ventila V imamo za tok $i_L > 0$ možne naslednje tokovne poti in stanja napetosti:

$$\text{V prevaja (T}_g\text{):} \quad \text{Tokovna veja } \text{---}; \quad e = e_{\max} = +\frac{U}{2} \quad (1a)$$

$$\text{V zaprt (T}_o\text{):} \quad \text{Tokovna veja } \text{---}; \quad e = e_{\min} = -\frac{U}{2} \quad (1b)$$

S tem je srednja vrednost e , torej \bar{e} :

$$\bar{e} = \frac{1}{T_g + T_o} \int_{t=0}^{T_g+T_o} e(t) dt = \frac{1}{T_g + T_o} \left[T_g \cdot \frac{U}{2} + T_o \cdot \left\{ -\frac{U}{2} \right\} \right]$$

$$\bar{e} = U \cdot \frac{1}{T_g + T_o} \left[T_g - \frac{T_g}{2} - \frac{T_o}{2} \right] = U \cdot \left\{ \tau_g - \frac{1}{2} \right\} \quad (2)$$

$$\tau_g = 1: \quad \bar{e} = \bar{e}_{\max} = +\frac{U}{2}$$

$$\tau_g = 0: \quad \bar{e} = \bar{e}_{\min} = -\frac{U}{2}$$

Po drugi strani velja:

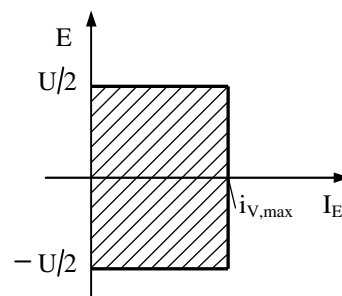
$$E = e - u_L$$

Torej za srednje vrednosti

$$E = \bar{e} - \frac{1}{T_g + T_o} \int_{t=0}^{T_g+T_o} u_L dt \quad \text{0 v stacionarnem (ustaljenem) stanju}$$

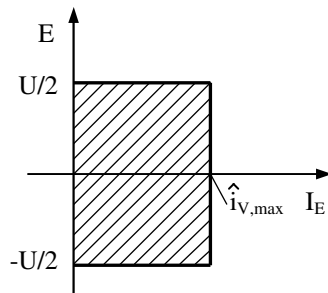
$$\rightarrow -\frac{U}{2} \leq E \leq +\frac{U}{2}$$

Izhodno nastavitveno območje je v primerjavi s pretvornikom navzdol ostalo enako, le za $U/2$ se je premaknilo proti negativni vrednosti.



Slika 11.16: Izhodno nastavitveno stanje sistema

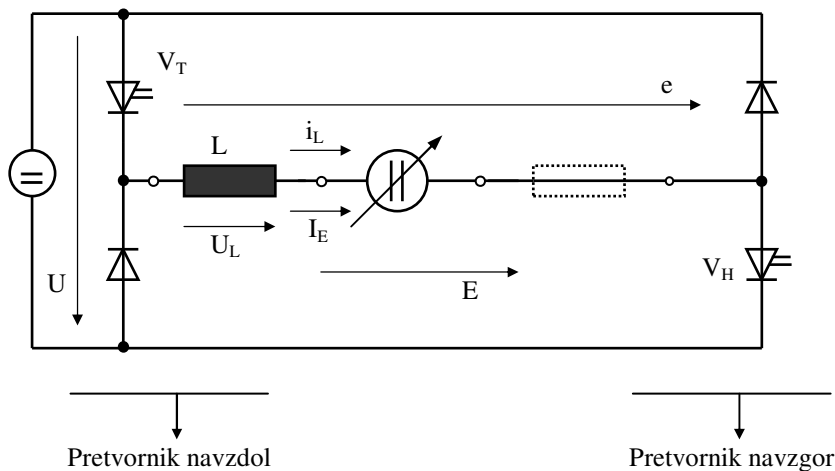
S tem vhodno nastavitveno območje tega vezja izgleda takole:



Slika 11.18: Vhodno nastavitveno območje

Tudi tukaj je vhodno nastavitveno območje prvotnega pretvornika navzgor v principu ostalo enako, le za $U/2$ se je pomaknilo navzdol.

11.4.4 Enosmerni nastavljalnik v obliki asimetričnega polmostiča



Slika 11.19: Shema nastavljalnika

Da bi se izognili skrajno nezaželenemu odcepu na napetostnem izvoru U smo pri tem vezju uporabili kombinacijo pretvornika navzdol (pogl. 1.1.) in pretvornika navzgor (pogl. 1.2). S tem ima celotno vezje dvakrat večje število ventilov, podvojita pa se tudi nastavitveno območje in moč. Ker sta dušilki obeh osnovnih vezij vezani v seriji, smemo eno zanemariti. Pri tem vezju imamo za tok $i_L > 0$ štiri možna obratovalna stanja.

Oznake teh stanj se nanašajo na energijski pretok v ali iz enosmerne izvora U oziroma v ali iz enosmerne izvora E .

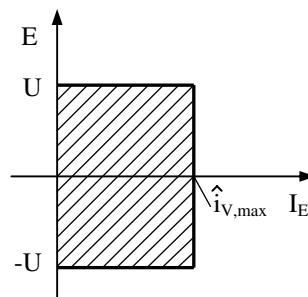
$I_L > 0$

| | | | |
|----------------|-------------------------|---------------------|------------------------|
| V_T prevaja, | V_H prevaja (T_S) | $e = e_{\max} = U$ | napajanje (1a) |
| V_T prevaja, | V_H zaprt (T_F) | $e = 0$ | prosti tek zgoraj (1b) |
| V_T zaprt, | V_H prevaja (T_F) | $e = 0$ | prosti tek spodaj (1c) |
| V_T zaprt, | V_H zaprt (T_R) | $e = e_{\min} = -U$ | vračanje (1d) |

Nastavitveno območje za E obsega torej celotno območje od

$$E = e_{\max} = +U \text{ do}$$

$$E = e_{\min} = -U$$



Slika 11.20: Nastavitveno območje

Za obvladovanje (pokrivanja) celotnega nastavitvenega območja od $+U$ do $-U$ imamo dve v principu različni možnosti:

- brez uporabe prostotečnih tokokrogov
- ločeno pokrivanje prvega in ločeno pokrivanje četrtega kvadranta.

Za primer a) obvladujemo celo področje z menjavanjem stanj med dvema skrajnostima in sicer med stanjem:

- napajanje ($e = U$, čas T_S) in
- vračanje ($e = -U$, čas T_R)

Za srednjo vrednost napetosti e , torej \bar{e} dobimo:

$$\bar{e} = \frac{1}{T_S + T_F} \int_{t=0}^{T_S+T_F} e(t) dt = \frac{1}{T_S + T_R} \cdot [T_S \cdot U - T_R \cdot U] = \frac{T_S - T_R}{T_S + T_R} \cdot U \quad (2)$$

Potem velja:

$$\text{za } T_R = 0: \quad \bar{e} = U$$

$$\text{in za } T_S = 0: \quad \bar{e} = -U$$

zaradi $E = \bar{e}$ V ustaljenem stanju je napetost na dušilki 0

$$\rightarrow -U \leq E \leq +U$$

Po natančnejši analizi lahko hitro ugotovimo, da obstaja še druga možnost krmiljenja za pokrivanje celotnega nastavitvenega območja in sicer varianta b: Od nje pričakujemo ugodnejše rezultate tako glede preklopnih izgub kot tudi valovitosti napetosti in toka.

b) ločeno pokrivanje 1. in 4. Kvadranta

I: 1. kvadrant

Za prvi kvadrant uporabimo stanji »napajanje« in »prosti tek« (enakovredno ali zgoraj ali spodaj):

Srednja vrednost napetosti e je:

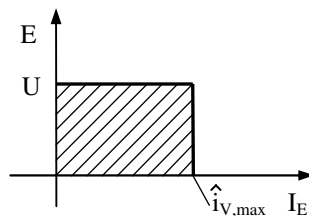
$$\bar{e} = \frac{1}{T_S + T_F} \int_{t=0}^{T_S + T_F} e(t) dt = \frac{1}{T_S + T_F} \cdot [T_S \cdot U + T_F \cdot 0] = \frac{T_S}{T_S + T_F} \cdot U \quad (3)$$

Potem velja

za $T_F = 0$: $\bar{e} = U$
in za $T_S = 0$: $\bar{e} = 0$

zaradi $E = \bar{e}$

torej $\rightarrow 0 \leq E \leq +U$



Slika 11.21: Shema pokrivanja

II: 4. kvadrant

Za obvladovanje 4. kvadranta sta v tem primeru uporabljeni stanji »prosti tek« (enakovredno ali zgoraj ali spodaj) in (vračanje) »povratno napajanje«.

Srednja vrednost napetosti e je:

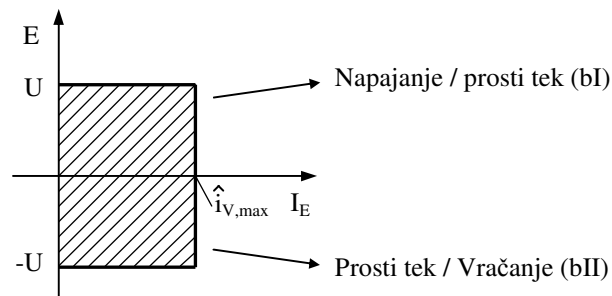
$$\bar{e} = \frac{1}{T_F + T_R} \int_{t=0}^{T_F + T_R} e(t) dt = \frac{1}{T_F + T_R} \cdot [T_F \cdot 0 - T_R \cdot U] = \frac{-T_R}{T_F + T_R} \cdot U \quad (4)$$

Potem velja

za $T_R = 0$: $\bar{e} = 0$
 in za $T_F = 0$: $\bar{e} = -U$

zaradi $E = \bar{e}$

torej $\rightarrow -U \leq E \leq 0$

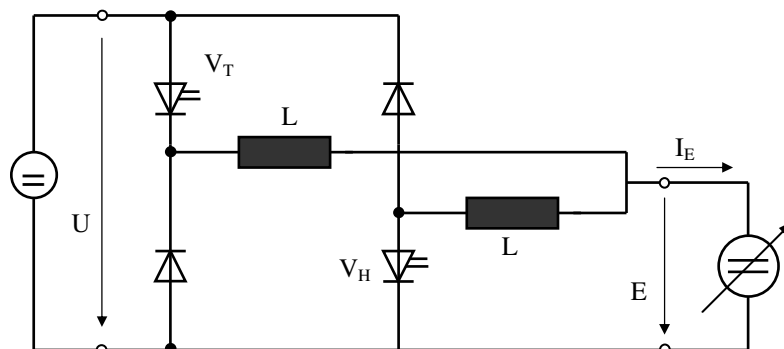


Slika 11.22: Celotno nastavitveno območje

Pri tem je

$0 \leq E \leq +U$ (bI) in
 $-U \leq E \leq 0$ (bII)

11.4.5 Dvokvadrantni nastavljalnik z obračanjem smeri toka

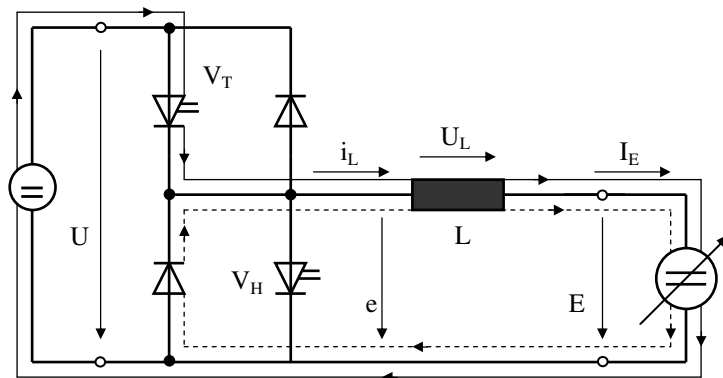


Slika 11.23: Shema nastavljalnika

Antiparalelna vezava pretvornika navzdol (§1.1) in pretvornika navzgor (§1.2) nam omogoča izvedbo takšnega dvokvadrantnega nastavljalnika. Podrobnejša analiza pokaže, da to zagotavljata nastavitveni območji: izhodno pretvornika navzdol in vhodno pretvornika navzgor.

- za tok : $I_E > 0$: deluje samo pretvornik navzdol
- za tok : $I_E < 0$: deluje le pretvornik navzgor

Deluje ali eden ali drugi, nikoli oba istočasno. Zato nista potrebni dve dušilki ampak ena sama za oba načina delovanja. S tem se vezje poenostavi



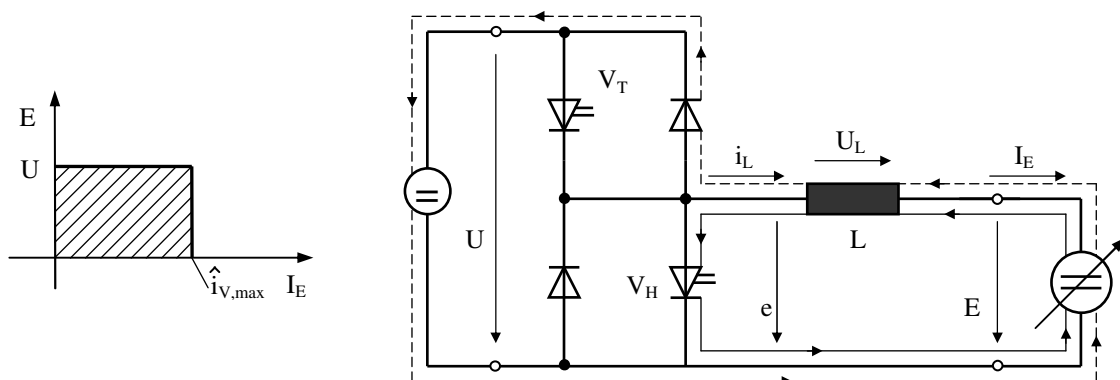
Slika 11.24: 1. Kvadrant

Tudi tukaj vidimo, da imamo opravka s štirimi možnimi stikalnimi stanji, ki pa jih lahko glede na predznak I_E oziroma i_L takoj omejimo na dva krat po dve in sicer:

1. $i_L > 0$

| | | | | |
|-------------------------|----------------------|--------------------|------------|------|
| V_T prevaja (T_S) | tokovna veja — | $e = e_{\max} = U$ | napajanje | (1a) |
| V_T zaprt (T_F) | tokovna veja - - - - | $e = e_{\min} = 0$ | prosti tek | (1b) |

Pripadajoče delovno (nastavitveno) območje za E: 1. Kvadrant



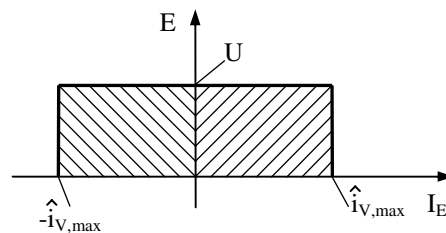
Slika 11.25: 2. Kvadrant

2. $I_L < 0$:

| | | | | |
|-------------------------|------------------------|--------------------|------------|------|
| V_H prevaja (T_F) | tokovna veja — | $e = e_{\min} = 0$ | prosti tek | (1c) |
| V_H zaprt (T_R) | tokovna veja - - - - - | $e = e_{\max} = U$ | vračanje | (1d) |

Pripadajoče nastavitveno območje za E: 2. Kvadrant

Celotno krmilno območje za E

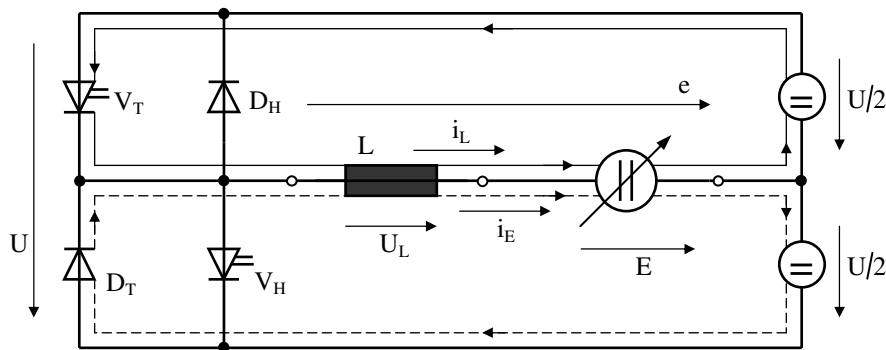


Slika 11.26: Krmilno območje

11.5 Enosmerni nastavljalniki za štirikvadrantno delovanje

11.5.1 Štirikvadrantni nastavljalnik s spremembo smeri napetosti s srednjim odcepom

To vezje bi formalno lahko razvili na dva različna načina, ki pa oba pripeljeta do enakega rezultata. Uporabimo najprej vezje, ki smo ga obravnavali v predhodnem poglavju, t.j. dvokvadrantni nastavljalnik s spremembo smeri toka. Pri tem pa naj minus pol enosmerne sistema E ne bo priključen na minus pol enosmerne sistema U, pač pa na njegov srednji odcep. Tako dobimo naslednje vezje:



Slika 11.27: Shema nastavljalnika, delovanje v 1. in 4. kvadrantu

Enako vezje bi nastalo z antiparalelno kombinacijo pretvornika navzdol in pretvornika navzgor s spremembo smeri napetosti in s srednjim odcepom na enosmernem napetostnem sistemu U .

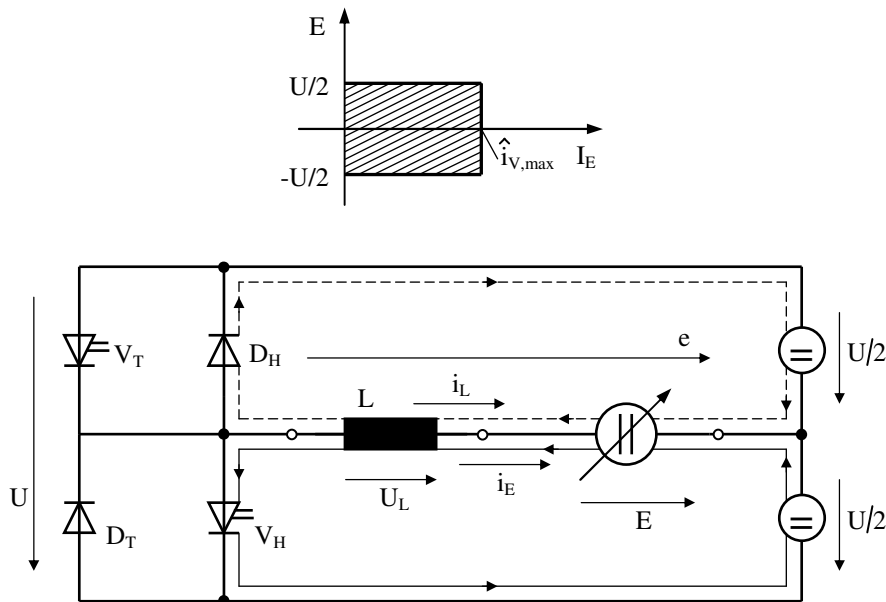
Tudi tukaj imamo štiri uporabna stikalna stanja, ki pa jih glede na smer toka I_E oziroma i_L lahko omejimo na dvakrat po dve.

1. $I_L > 0$

V_T prevaja (T_S): tokovna veja — $e = e_{\max} = +\frac{U}{2}$ napajanje (1a)

V_T zaprt (T_R): tokovna veja - - - - - $e = e_{\min} = -\frac{U}{2}$ vračanje (1b)

→ Pripadajoče nastavitveno območje za E : 1. in 4. kvadrant



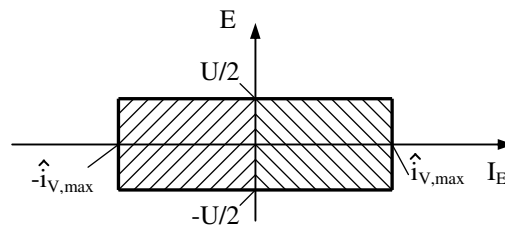
Slika 11.28: Delovanje v 2. in 3. kvadrantu

2. $I_L < 0$

V_H prevaja (T_S): tokovna veja — $e = e_{\min} = -\frac{U}{2}$ napajanje (1c)

V_H zaprt (T_R): tokovna veja - - - - - $e = e_{\max} = +\frac{U}{2}$ vračanje (1d)

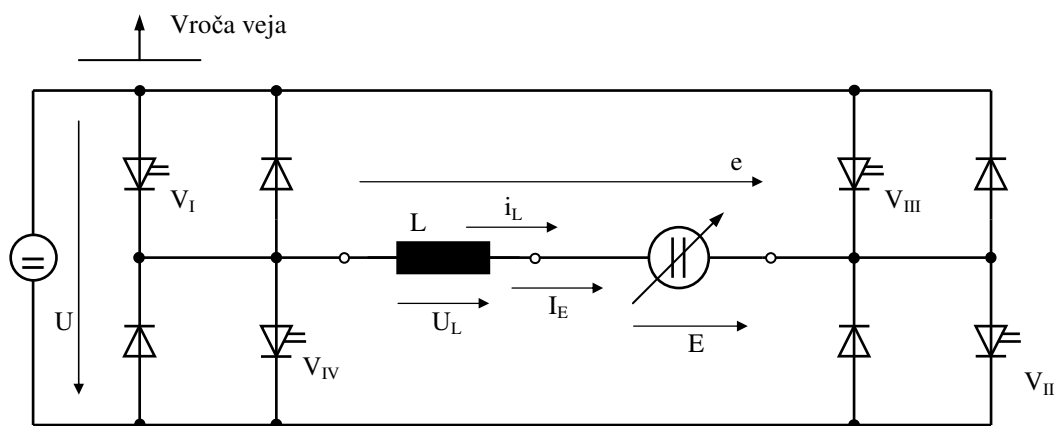
→ Pripadajoče nastavitveno območje za E : 2. in 3. kvadrant



Slika 11.29: Skupno nastavitveno območje

Nastavitveno območje za E prvotnega vezja (dvokvadrantni nastavljalnik s spremembo smeri toka) je torej ostalo isto (enako veliko). Premaknilo se je le za $U/2$ navzdol.

11.5.2 Štirikvadrantni nastavljalnik v popolnem mostičnem vezju



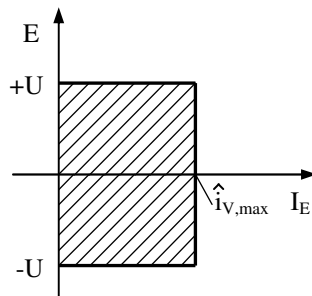
Slika 11.30: Shema vezja (tokovne veje niso vrisane)

Da se izognemo skrajno nezaželenemu srednjemu odcepu na enosmernem napetostnem izvoru U , uporabimo na obeh straneh (ne samo na levi) dvokvadrantni nastavljalnik s spremembo smeri toka. Pri tem zahtevnejšem vezju s štirimi ventili, ki jih lahko vklapljamemo in izklapljamemo imamo skupno osem možnih uporabnih delovnih stanj, ki jih lahko glede na smer toka i_L oziroma i_E razdelimo takoj v dve grupi.

1. $I_L > 0$

| | | | | |
|--|------------------------|---------------------|----------------|------|
| V_I in V_{II} prevajata (T_S): | tokovna veja — | $e = e_{\max} = U$ | napajanje | (1a) |
| V_I prevaja, V_{II} zaprt (T_F): | tokovna veja - - - - | $e = 0$ | prosti tek zg. | (1b) |
| V_I zaprt, V_{II} prevaja (T_F): | tokovna veja ······ | $e = 0$ | prosti tek sp. | (1c) |
| V_I in V_{II} zaprta (T_R): | tokovna veja - - - - - | $e = e_{\min} = -U$ | vračanje | (1d) |

→ Pripadajoče nastavitveno območje za E : 1. in 4. kvadrant



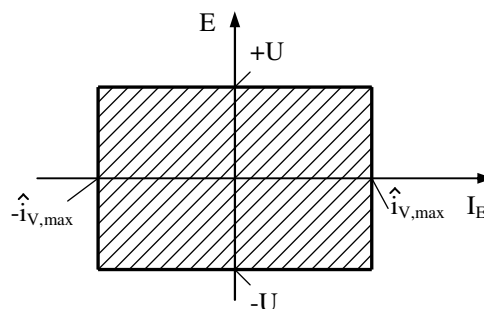
Slika 11.31: Nastavitveno območje za E

Tukaj dobimo za $i_L > 0$ enako delovno (nastavitveno) področje za E kot pri enosmernem dvokvadrantnem vezju v obliki asimetričnega polmostičnega vezja. Pri obeh imamo opravka za primer toka $i_L > 0$ z enakimi stikalnimi konfiguracijami in zato enakimi možnimi delovnimi stanji. Za pokrivanje celotnega delovnega področja imamo tudi tukaj dve možnosti in sicer z uporabo prostotečnih tokokrogov ali pa brez uporabe letih. Že v poglavju 1., 2., 3. smo ugotovili, da imamo v primeru, ko tokokrogov prostega teka ne izkoriščamo, opravka z večjimi stikalnimi izgubami in z večjo valovitostjo toka. Tak način, kot bomo kasneje videli, uporabljamo samo tam, koder je nujno.

Tu pa dajemo prednost uporabi tokokrogov prostega teka. Torej:

| | | |
|-------------|-----------|----------------------|
| 1. kvadrant | izmenjava | napajanje/prosti tek |
| 4. kvadrant | izmenjava | prosti tek/vračanje |

Za $i_L < 0$ so razmere popolnoma analogne, le namesto ventilov V_I in V_{II} sta sedaj v igri ventila V_{III} in V_{IV} . S tem dobimo celotno delovno področje.



Slika 11.32: Nastavitveno območje

Komentar:

V primerjavi s štirikvadrantnim nastavljalnikom s spremembo smeri napetosti ob uporabi srednjega odcepa se je delovno področje podvojilo. Enako vezje bi nastalo, če bi vezali antiparalelno dva asimetrična polmostična enosmerna nastavljalnika.

Glede na razčlenbo, ki smo jo uvodoma nakazali, si bomo v naslednjem poglavju na kratko ogledali lastno vodene galvansko vezane usmernike in razsmernike.

11.6 Lastno vodeni usmerniki in razsmerniki

Najprej si bomo ogledali enofazno vezje

11.6.1 Enofazni usmerniki in razsmerniki

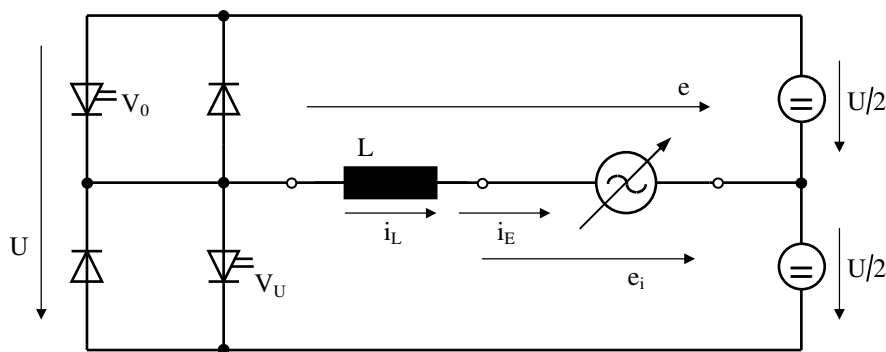
Pri tem lahko ugotovimo, da je v prejšnjem poglavju obravnavan štirikvadrantni enosmerni nastavljalnik pravzaprav enofazni usmernik in razsmernik z lastnim vodenjem, saj so zahteve do obeh pretvorniških vezij pravzaprav ekvivalentne.

Obe vezji morata biti sposobni na izhodu oddajati ali sprejemati energijo pri obeh smereh toka ali napetosti. Štirikvadrantni enosmerni nastavljalnik je torej lahko tudi enofazni usmernik in razsmernik. S tem lahko odgovarjajoča vezja z malenkostnimi dopolnitvami kar privzamemo.

11.6.2 Enofazni usmernik in razsmernik v polmostičnem vezju

To polmostično vezje je enako kot v pogl. 3.4 izvedeno s statično obremenljivim enosmernim virom s srednjim odcepom.

Varianta s statično obremenljivim virom s srednjim odcepom



Slika 11.33: Shema vezja

Tudi pripadajoče sistemske lastnosti lahko privzamemo iz poglavja 3.4

1. $I_L > 0$:

$$V_o \quad \text{prevaja:} \quad e = +\frac{U}{2} \quad (1a)$$

$$V_o \quad \text{zaprt:} \quad e = -\frac{U}{2} \quad (1b)$$

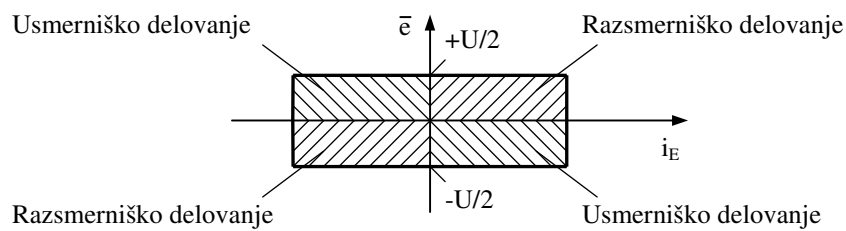
1. in 4. Kvadrant

2. $I_L < 0$:

$$V_U \quad \text{prevaja:} \quad e = -\frac{U}{2} \quad (1c)$$

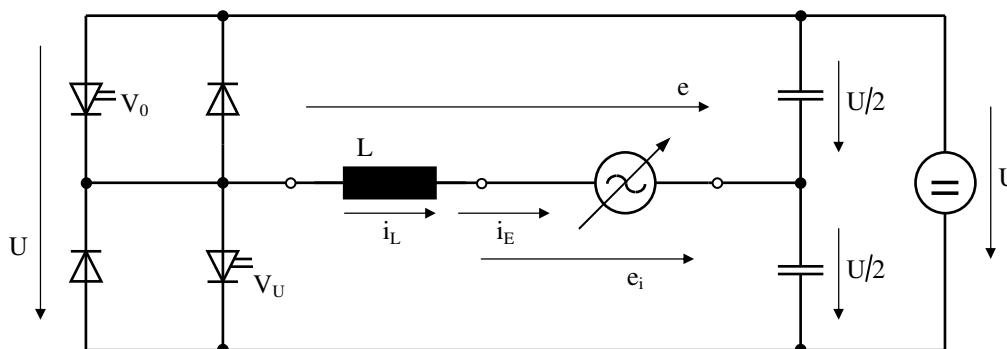
$$V_U \quad \text{zaprt:} \quad e = +\frac{U}{2} \quad (1d)$$

2. in 3. kvadrant



Slika 11.34: Nastavitveno (delovno) področje

Ker naj bi tok i_e ne vseboval nobene enosmerne komponente (oziroma ni potrebno da jo vsebuje, največkrat je nezaželena), potem tudi ni nujno da je srednji odcep enosmernega vira statično obremenljiv. Po tej ugotovitvi lahko enosmerni vir s srednjim odcepom zamenjamo z enosmernim virom s kapacitivno izvedenim srednjim odcepom.

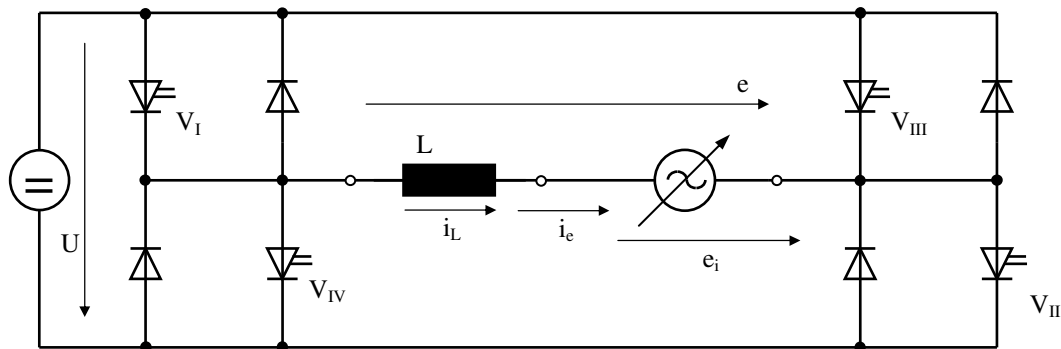


Slika 11.35: Izvedba s kapacitivnim srednjim odcepom

Vezje ima enake lastnosti, le v tem primeru je postavljena dodatna zahteva in sicer:

i_e ne sme vsebovati enosmerne komponente, kar pomeni, da to vezje ni uporabno za tako zelo nizke frekvence, kar lahko označimo kot slabost vezja. Če bi imeli na izhodu transformator, ta ne more biti predmagnetiziran, kar je lahko tudi prednost vezja.

Enofazni usmernik razsmernik v (popolnem) mostičnem vezju



Slika 11.36: Shema vezja

Sistemske lastnosti:

1. $I_L > 0$:

| | | |
|--------------------------------|----------|------|
| V_I in V_{II} prevajata: | $e = +U$ | (1a) |
| V_I prevaja, V_{II} zaprt: | $e = 0$ | (1b) |
| V_I zaprt, V_{II} prevaja: | $e = 0$ | (1c) |
| V_I in V_{II} zaprta: | $e = -U$ | (1d) |

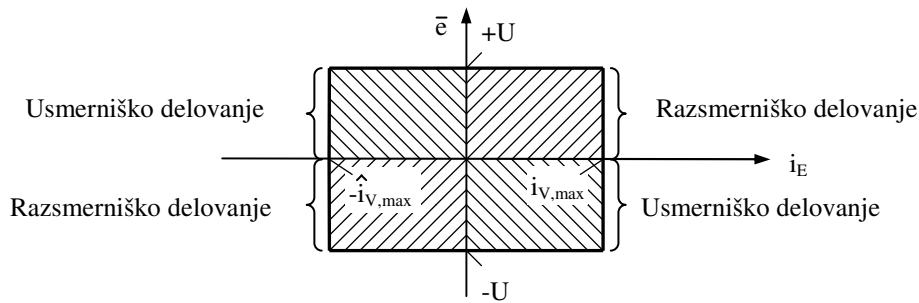
1. in 4. kvadrant

2. $I_L < 0$:

| | | |
|------------------------------------|----------|------|
| V_{III} in V_{IV} prevajata: | $e = -U$ | (1e) |
| V_{III} prevaja, V_{IV} zaprt: | $e = 0$ | (1f) |
| V_{III} zaprt, V_{IV} prevaja: | $e = 0$ | (1g) |
| V_{III} in V_{IV} zaprta: | $e = +U$ | (1h) |

2. in 3. Kvadrant

→ celotno delovno področje za \bar{e}



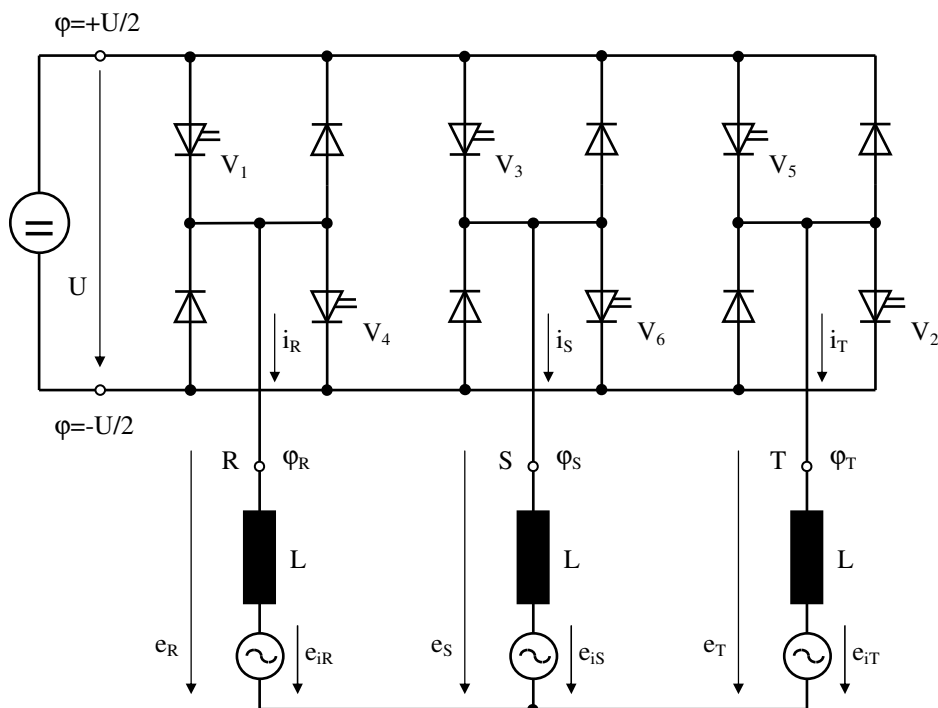
Slika 11.37: Oznaka v kvadrantih za kvazistacionarno delovanje

11.6.3 Trifazni usmernik in razsmernik v mostičnem vezju

Če želimo preiti iz enofaznega razsmernika v trifaznega imamo v principu več različnih možnosti (z različnimi sistemskimi lastnostmi).

Prva možnost je, da v prejšnjem poglavju obravnavanem vezju enofaznega usmernika in razsmernika dodamo še eno »vročo vejo«, t.j. tretja razsmerniška veja. Tako dobimo trifazni lastno vodeni usmernik in razsmernik s tremi vejami in tremi priključki izmenične napetosti.

Trifazni usmernik in razsmernik s tremi vejami



Slika 11.38: Shema vezja

Sistemske lastnosti so sledeče:

1. $\varphi_R > 0$:

$$V_1 \text{ prevaja} \quad \varphi_R = +\frac{U}{2}$$

$$V_1 \text{ zaprt} \quad \varphi_R = -\frac{U}{2}$$

2. $\varphi_R < 0$:

$$V_4 \text{ prevaja} \quad \varphi_R = -\frac{U}{2}$$

$$V_4 \text{ zaprt} \quad \varphi_R = +\frac{U}{2}$$

b) φ_S analogno kot φ_R :

$$\text{za } i_S > 0 \text{ in } i_S < 0 : \quad \varphi_S = +\frac{U}{2} \quad \text{ali} \quad \varphi_S = -\frac{U}{2}$$

c) φ_T analogno kot φ_R :

$$\text{za } i_T > 0 \text{ in } i_T < 0 : \quad \varphi_T = +\frac{U}{2} \quad \text{ali} \quad \varphi_T = -\frac{U}{2}$$

Torej lahko ugotovimo, da je razpoložljiv prostor sistemskih lastnosti v primerjavi z enofaznim usmernikom in razsmernikom v polnem mostičnem vezju nekoliko omejen. To je pričakovano, saj pri enofaznem usmerniku in razsmerniku sodelujeta dve razsmerniški vezji za formiranje ene faze izmenične napetosti, medtem ko so pri trifaznem usmerniku in razsmerniku na razpolago samo tri »vroče veje«.

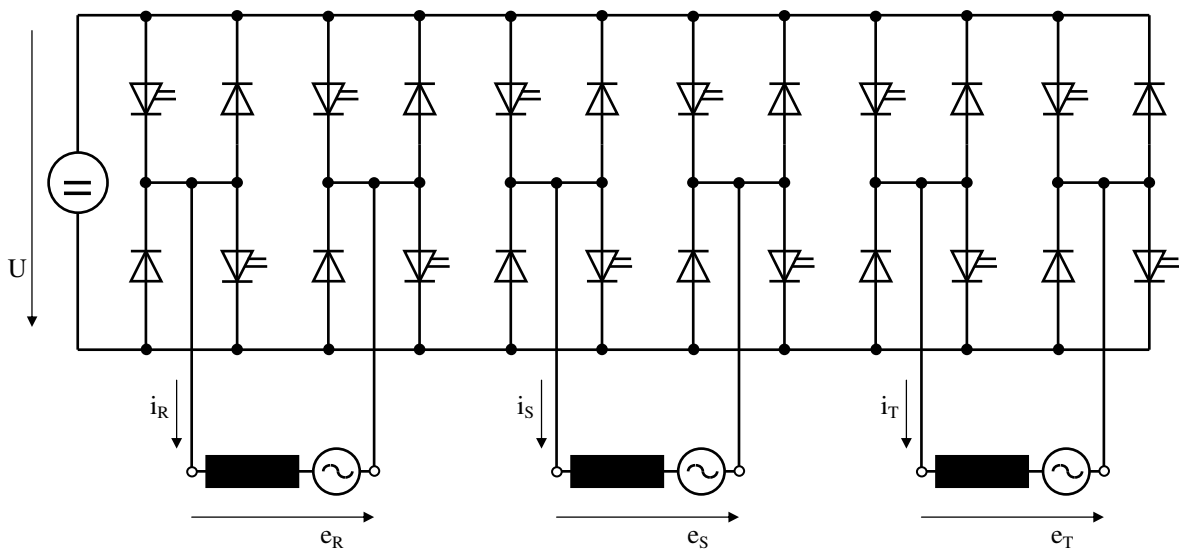
Zahtevnost glede števila gradnikov je torej za faktor 2 manjša. Če pa želimo imeti primerljiv delovni prostor pri trifaznem razsmerniku, potem moramo pričakovati tudi primerljivost glede števila gradnikov. To željo nam izpolni vezje v naslednjem poglavju.

Trikrat enofazni usmernik in razsmernik v popolnem mostičnem vezju

Takšno vezje je uporabno, če se trifazni sistem lahko razstavi v posamezne faze. To je možno npr. če ima trifazni stroj izpeljane vse priključke navitij, ki so galvansko ločena, torej ima dostopnih vseh 6 priključnih vodnikov.

Takšno izvedbo ima napetostno tokovni vir za preizkušanje števecv električne energije. Lastnosti so pri tem vezju ekvivalentne enofazni izvedbi.

Za $i_R = 0$ glede na krmiljenje $e_R = +U$, 0 ali $-U$. Enako za S in T.



Slika 11.39: Shema vezja

| | | |
|-----------|---|------------|
| 11 | DIREKTNI PRETVORNIKI..... | 160 |
| 11.1 | Uvod..... | 160 |
| 11.2 | Vezja močnostne (energetske) elektronike..... | 160 |
| 11.3 | Osnovna vezja za enokvadrantno delovanje..... | 161 |
| 11.3.1 | Pretvornik navzdol (Buck – Converter)..... | 162 |
| 11.3.2 | Pretvornik navzgor (Boost-Converter)..... | 165 |
| 11.3.3 | Zaporni pretvornik (Sperrsteller ali angl. Flyback ali Buck-Boost-Converter)..... | 169 |
| 11.4 | Enosmerni nastavljalnik za večkvadrantno delovanje..... | 172 |
| 11.4.1 | Dvokvadrantni nastavljalnik s spremembo smeri napetosti..... | 172 |
| 11.4.2 | Pretvornik navzdol s spremembo smeri napetosti..... | 172 |
| 11.4.3 | Pretvornik navzgor s spremembo smeri napetosti..... | 174 |
| 11.4.4 | Enosmerni nastavljalnik v obliki asimetričnega polmostiča..... | 175 |
| 11.4.5 | Dvokvadrantni nastavljalnik z obračanjem smeri toka..... | 178 |
| 11.5 | Enosmerni nastavljalniki za štirikvadrantno delovanje..... | 180 |
| 11.5.1 | Štirikvadrantni nastavljalnik s spremembo smeri napetosti s srednjim odcepom..... | 180 |
| 11.5.2 | Štirikvadrantni nastavljalnik v popolnem mostičnem vezju..... | 182 |
| 11.6 | Lastno vodeni usmerniki in razsmerniki..... | 184 |
| 11.6.1 | Enofazni usmerniki in razsmerniki..... | 184 |
| 11.6.2 | Enofazni usmernik in razsmernik v polmostičnem vezju..... | 184 |
| 11.6.3 | Trifazni usmernik in razsmernik v mostičnem vezju..... | 187 |