

2 kolokvija + ustni del izpita

2. polovica aprila ... 1. rok  
konec maja / začetek junija ... 2. rok

21.2.2013

→ EE in obnovljivi viri

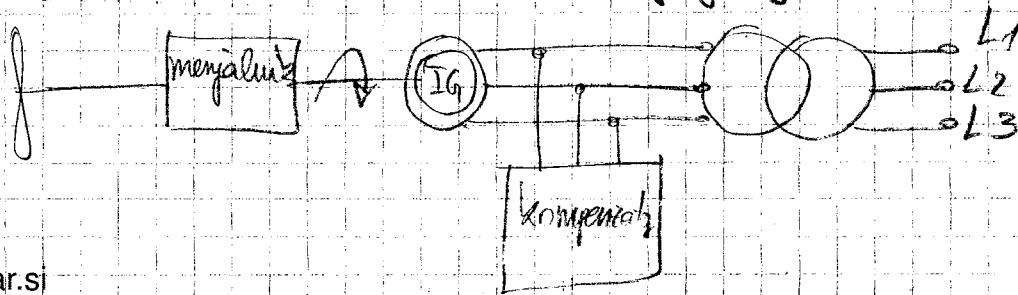
\* sončne celice:

- sistem z osrednjim razmernikom:
  - + za večje moči
  - močne izgube zaradi neujemanja med posameznimi moduli (do 3%)
- sistem z razmernikom za vsak niz:
  - + vsak niz ima MPPT modul (maximum power point tracker)
  - bistveno bolj izkoriščeni paneli
  - višja cena za 2W
- sistem s skupnim razmernikom in pretvornikom za vsak niz:
  - + vsak niz ima svoj MPPT enoto, širši razpon vh. napetosti
  - nižji izkoristek zaradi dvostopenjske pretvorbe moči  
(izkoristek 1 = 0,9; izk. 2 = 0,9 ⇒ izk. = 0,9 · 0,9 = 0,81)
- sistem z razmernikom za vsak modul (integrirani razmernik)
  - + vsak modul ima svoj MPPT enoto, integrirani razmernik in modula
  - + moduli so maksimalno izkoriščeni
  - moduli so izpostavljeni višji temperaturi ⇒ manjša življenjska doba
  - manjša moč ⇒ nižji izkoristek posameznih celic

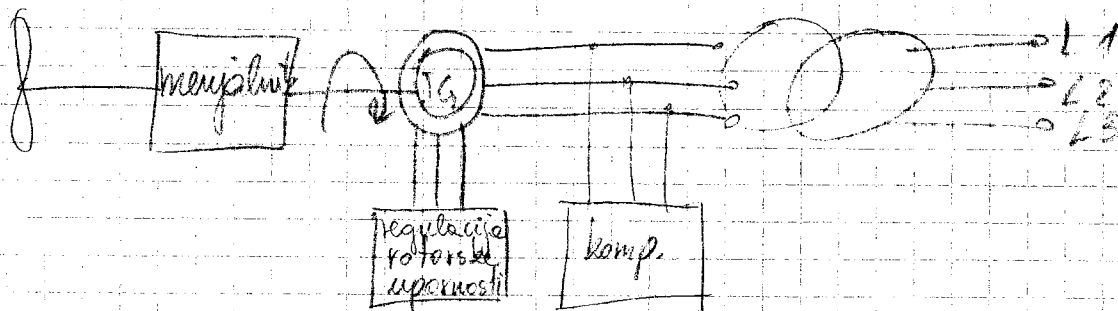
Težave so s kondenzatorji (elektrolitski), potrebna npr. zamenjava vsake nekaj let, najmanjši del v pretvorniku

\* vetrne elektrarne

- Moči tudi do 2MW; potrebno je zagotoviti pretvorbo
- če ne želimo operirati s pretvorniki, moramo zagotoviti konstantno vrtilno in vrtilno hitrost. (generator se konstantno vrli → oddaja konstantno prostorno in napetost)
- če želimo imeti z malokupljenim oprejo in obratovanjem celotne vetrne elektrarne ⇒ prilagajanje na smer vetra



- vetrnica potrebuje jalovo moč za vzbujanje polja
- slip se spreminja od 1-2%
- za majhne spremembe vrtilne hitrosti



- slip se spreminja od 2-10%

- možnost regulacije rotorskih tokov
- vplivamo na pretok delovne in jalove moči
- spreminjamo vrtilno hitrost  $\pm 30\%$
- moč pretornike je  $1/3$  moči generatorja (ne procesiramo celotne moči)

- Najbolj univerzalna rešitev

- pretvarjamo moč enako nazivni moči sistema
- vplivamo na delovno in jalovo moč
- dodatne izgube pri pretvorbah
- v brezveterju deluje sistem kot kompenzator jalove moči

- vračajo sinhronski stroj z navitim rotorjem

- moč vetrne el. :  $P \propto v^3$

izkoristek 10-30%

THD - total harmonic distortion → želimo prisotnost le 1. harmonike vendar so prisotni tudi 3, 5, 7. harmonike



- z razvojem se je vakuum nadomestil s plinom  $\rightarrow$  ob emisiji iz kVA elektroni trkajo z molekulami plina  $\rightarrow$  večja energija padci napetosti so bili nižji
- dodatek še ene elektrode - krmilna elektroda  $\rightarrow$  uravnavanje toka znotraj ventila (mrežaste oblike - grid)
- s pomočmi polarizaciji lahko reguliramo tok in padec napetosti
- plinska trioda  $\rightarrow$  tiratron
- Zato po preklonu višjih tokov in napetosti  $\rightarrow$  potrebno je postaviti pufarje  $\rightarrow$  medij (Hg) (diadni učvrstitev)
- z dovoljnim katodnim segrevanjem Hg, ki izpari in tvori vakuu  $\rightarrow$  postane nosilec naboja
- sistem treh amod  $\rightarrow$  prevajalnice, ki imajo najvišjo prevodno napetost z enim elementom dosežemo trifazne razmere + aluminij
- elektrode so dolgo delovale na podlagi Hg ventilov  $\rightarrow$  dober misel iz - Si transistor
- z mrežo elektrod se je uravnaval prenos nosilcev v plazmi s pomočmi tičnimi z vzdržuje nalo misel ionizacije  $\rightarrow$  minimalni tok, hitrejši pretek.

- Selenski lentil (plošča)

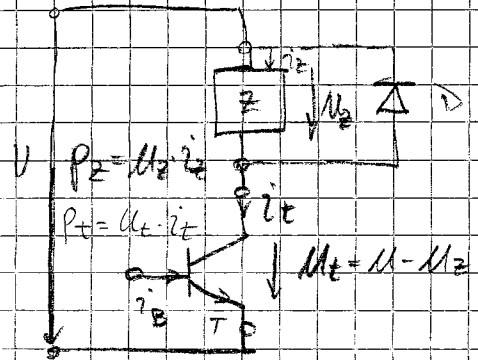
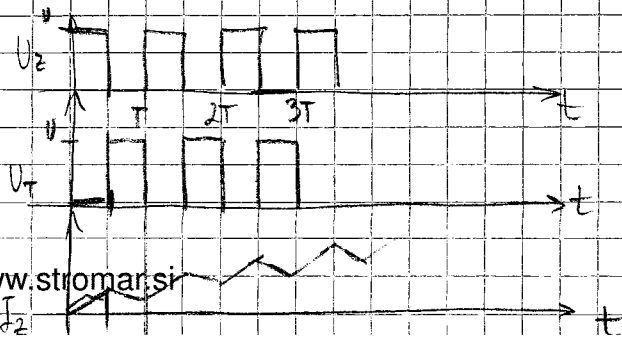
enostavnejši od polsivnih diod: slabše prevodne lastnosti  $\rightarrow$  150 modulov vezavni in senzor (višja prebojna trdnost)

Tok skozi induktivnost ne moremo prekiniti v trenutku  $\rightarrow$  pride do zelo visokih induktivnih napetosti

inducirana napetost je ekvivalentna kinetični energiji v mehaniki (avtomobila ne moremo ustaviti v trenutku)

Ob rezklonitvi upone pride do obloka  $\rightarrow$  tok šeleznost ETC, tranzistor bi odpreval

Tranzistor izklapljam, tok bi tekel: potencial naraste  $\rightarrow$  tok steče skozi diodo  $\rightarrow$  energija se troši na bremenu; tok upada s čas. konst.  $T = L/R$



$$P_z = I^2 Z = \frac{U^2}{Z} = \frac{(500V)^2}{10A} = 25kW$$

$$P_T = 25kW$$

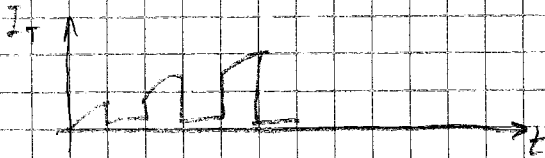
$$I = 50A$$

$$P_T = P_{\text{Prevaaja}} + P_{\text{zaprt}}$$

$\underbrace{\quad}_{U_{pr} \cdot I_{pr}}$   
 $\parallel$   
25W

Srednja vrednost toka skozi diodo je enaka sr. vr. toka skozi tranzistor

$$P_D = P_T = 25W$$



- cilj je : zmanjšanje izgub na stikalnih elementih ob ohranjanju moči vna bremenom

$$Z = R + X$$

$$X = f(\omega)$$

$$X_L = \omega L$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

če povečujemo frekvenco, ob enakem  $X$   $\rightarrow$  vpliv in  $C$  se zmanjša

z dviganjem frekvence hitro zmanjšujemo dimenzije reaktivnih komponent  $\rightarrow$  pretvorilniki postajajo manjši ob vsi moči

# - Diode

- v prevodni smeri:
  - napetost proge  $\rightarrow$  napetost pri kateri dioda prevaja; želimo da je čimmanjša

diferencialna upornost:

$$r = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F}$$

$$U_F = U_{T0} + r \cdot I_F \dots \text{celoten padec napetosti}$$

- v zaporni smeri:
  - karakteristika ni idealna
  - pomembna je  $U_{RM}$   $\rightarrow$  reverse maximum, napetost prek
  - pada napetosti 105 reda V in več

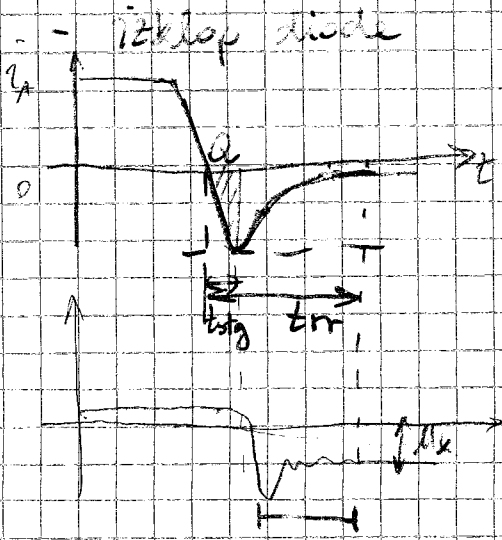
$U_{RRM}$   $\rightarrow$  reverse repetitive max. voltage: podana za npr.:  
 sinusni padek te napetosti v reverzni smeri;  
 napetost, ki jo kemil/dioda še prenese

če je tok v prevodni smeri trajen, lahko izračunamo (toplotna) izgube

ko diodo obravnavamo v dinamičnih pogojih, se razmere na diodi spremenijo  $\rightarrow$  tok se dinamično spreminja

tok ob padanju preide mejo ničle in začne teči v reverzni smeri  $\rightarrow$  naraste dokler ne doseže klenja površine krivulje (zaradi nabojske rekombinacije, ki traja nekaj časa  $\rightarrow$   $t_{str}$  (storage time))

napetost v trenutku upadanja toka ostane enaka, nato pa upada in raste v negativni smeri (z zakasnitvijo)  $\rightarrow$  upada šele, ko tok dobele teme



Ob spreminjanju toka se začne inducirati napetost

$$U_i = -L \frac{di}{dt}$$

pojav parazitnih induktivnosti  $\rightarrow$  na povezavah od mode do elementa

hitre spremembe toka ve vodnikov nastanejo ne le upornostne ampake tudi induktivne razmere

iznihanje dokler se rekombinacije ne zaključijo (tok = 0)

Če strmino  $\frac{di}{dt}$  povečamo, pride do preboja (prenapetosti) v reverzni smeri

maximalni  $\frac{di}{dt}$  je določen s strani proizvajalca

čas  $t_{rr}$  → reverse recovery time (čas od začetka do konca rekombinacije); začenši čim manjši, reda  $\mu s, ms$

takešne diode so primerne za počasna preklapanja pri nižji frekvenci (od omrežne do nekaj kHz)

manj je funkcija maksimalnega  $i_a$ , temperature, ...

Hitre diode imajo manjši naboj, vendar imajo manjšo vrednost prebojne napetosti

## - Tiristor

za največje tokove in napetosti, moči reda 500kW in več (do 500kW se uporabljajo tranzistorji)

4 plasti pn (pnp) + krmilna dioda G (gate)

v zaporni smeri je karakteristika enaka kot pri diodi

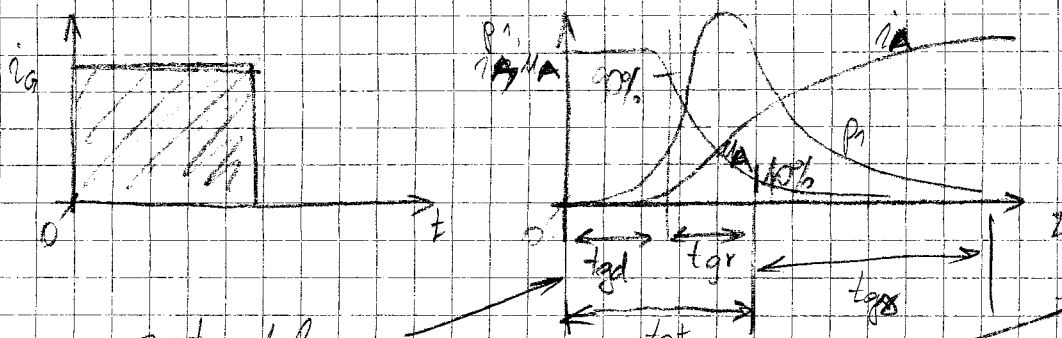
v prevodni smeri: če na G ni nobenega signala, poraba enake napetosti kot v zap. smeri → ob določenem toku se sprosti in prevaja kot dioda

z naraščanjem toka se prevodni prog (iz blokiranega v prevodno) manjša.

ob nezimnem toku takoj preklapi v prevodno stanje

s krmilno diodo tiristorje ne moremo izključiti, tak preneha teč, ko pade pod mejo držalnega toka  $I_H$  (holding current), reda 10-100mA (odvisno od velikosti elementa)

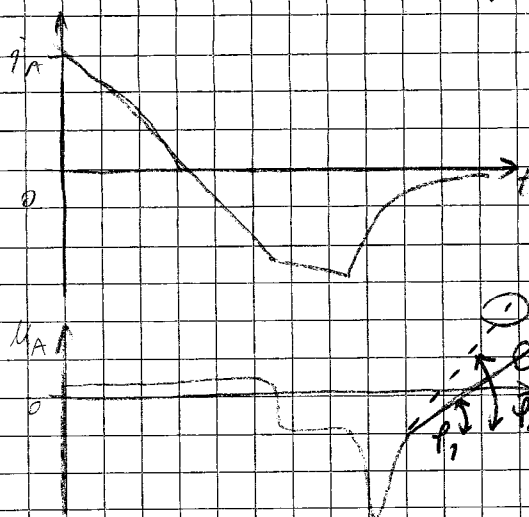
• Vklap tiristorja (Vklap, ko napetost na anodi doseže neko vrednost) med vrta in katodo prihranimo napetost, ki bo pognala tok (žalina, da je simbol pronačrtani → hitro naraščanje)



$P_1$  → preklapna izguba na elementu

◦ izklop tiristorja

- dinamične razmere, podobne razmere kot pri diodi → rekombinacije



Koliko časa po izklopu lahko sledi ponovni vklop (na modo ponovno priključimo pozitivno napetost)

→ Mehanizirani vklop je odvisen od strmine naraščanja toka in  $t_q$  → sprostitveni čas

brez proženja

→ tiristor ostaja v blokiranem stanju

Za varno delovanje se upoštevajo varnostni čas (daljši od  $t_q$ ) →  $t_c$

$$t_c = 1,3 - 1,5 t_q$$

Čas sprostitve tiristorja.

do 100ms → hitri tiristorji

- Diac

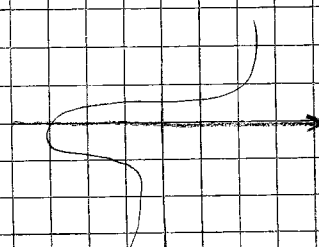
4 vezjih vzor 100 nižje moči

2 tiristorja skupaj

prag je konstanten, ker ni kermilne diode

Prehod iz blokiranega v prevodno st.: 30-40V

Velik padec napetosti



- Triac:

protiparalelno vezava dveh tiristorjev

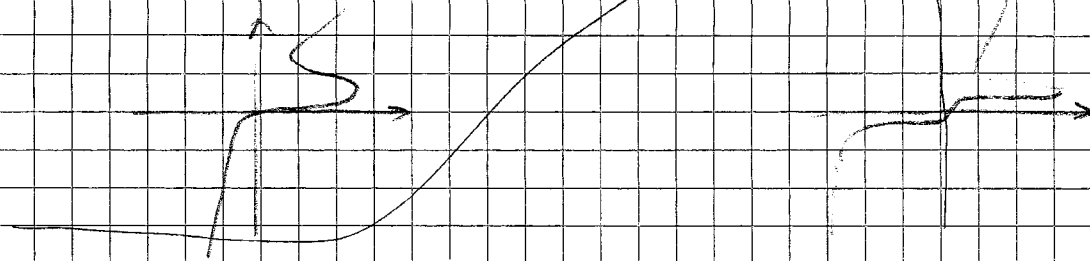
namesto dveh kermilnih elektrod je samo ena, ki deluje pri obeh polomitetah napetosti

prožimo ga lahko tudi s zapornem (3.) kvadrantu

daljši  $t_q$ , odvisen od temperature; dobre dinamične zmožnosti  
 $\frac{di}{dt} = 5 A/\mu s$ ,  $\frac{di}{dt} = 5 A/\mu s$

- Inverzni vodljiv tiristor

primz diodne karakteristike ← v zaporni smeri; prevaja



GTO

tiristor, ki ga lahko s krmilno elektrodo tudi izklopimo  
slabosti:

- $\beta \times I_c$  je velik, tudi do 20% celotnega toka tiristorja
- manjše moči kot tiristor; visoki prelopnostne frekvence
- domex ni več zanimiv.

5.3.2013

## MOČNOSTNI STIKALNI TRANZISTORJI

- močnostni bipolarni tranzistor - BJT
- močnostni MOSFET (danes večina m.e. temelji na MOSFET tehnologiji)
- IGBT → združitev BJT in MOSFET tehnologij
- najboljše lastnosti obeh

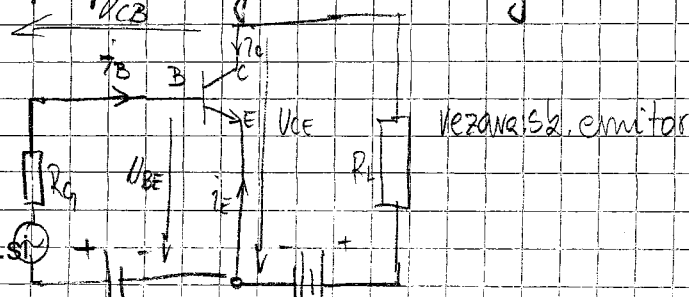
### 1.) BIPOLARNI TR.

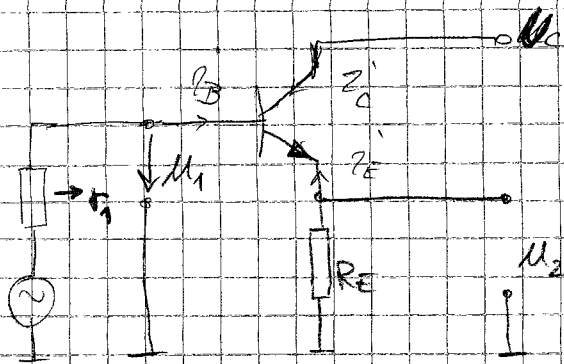
- najpogostejša je vezava s skupnim emitorjem
- zanimiva moč ojačanje ter vh. in izh. impedanca

napetostno ojačanje:  $A_u = -\frac{\mu_2}{\mu_1} = -\frac{\Delta V_{CE}}{\Delta V_{BE}}$

$I_C = \beta \cdot I_B = \beta \frac{I_{BE}}{V_{BE}}$  ← kolektorski tok;  $V_{BE} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_{BE}}$

znacilna je visoka vh. impedanca (zazeleno → manj obremenitev)  
izh. imp. pa naj bo čimmanjša → približamo se idealnemu viru





vezava: sk. kolektor (emitorski sledilnik)

- vezavo iz vezja razberemo tako, da pogledamo katera veja ni obremenjena

$$A_u = \frac{du_2}{du_1} = 1 - \frac{r_{BE}}{\beta \left( \frac{R_E}{r_{CE}} \right)} = 1 ; \text{ nizko nap. oja\ccejje, ki ne more biti ve\ccejja od 1.}$$

$$r_1 = \frac{du_1}{di_1} = r_{BE} + \beta \cdot R_E ; \text{ vrednost } \beta \text{ je visoka}$$

||  
di2

- izvedba tr. ki nam najbolj ustreza je NPN (PNP se bolj uporablja pri signalih)
- ko tr. prevaja ne sme biti v nasi\ccejnju, temve\ccej na meji nasi\ccejnja  $\rightarrow$  zaradi izklopitrenih \ccejasov (bolj\ccej\ccej dinamika)

### Glavni parametri BT

- zap. napetost:  $U_{CES}$  pri  $U_{BE} < 0 \rightarrow$  \ccej polariziramo v negativni smeri, lahko prenese bistveno ve\ccej\ccej napetost
- trajni kol. tok:  $I_{CM}$
- periodi\ccejen maksimalni kol. tok:  $I_{CEM}$

- \ccejelimo \ccejim hitreji prehod iz zaprtega v odprto obmo\ccejje

$$\frac{I_{CM}}{\beta} \rightarrow \text{faktor pove\ccejanja \ccej\ccej. baznega toka}$$

- ko tok dose\ccej\ccej vrednost 90%, izmerimo \ccej\ccej vklope  $\rightarrow T_{on}$
- ob izklopu je \ccej\ccej  $T_F$  (\ccej\ccej izklopa) med 90% in 10% vrednosti toka
- "najmali\ccejnej\ccej\ccej" je predlaj\ccejjanje ohmskega bremena

- ob vklopu pride do izgub -  $P_{on}$ , ki ne pade na 0 ampak zavrzame neko ustaljeno stanje; izgube preklopa
- Pri Ohmskem bremenu so izgube majhne

## V režju p tr. in diode:

- ob izklopjanju prehaja tok iz tr. na diodo → komutacija toka moč, ki se sprošča na tr. je večja kot na diodi z naraščanjem preklopne frekvence se energija linearno povečuje paziti moramo, da ne uničimo termičnega stikala
- izgube iz stikala prenesemo na zunanje (hladilno) vezje → toplotna razbremenitev tr.
- območje SOA (safe operating area)
- v zelo kratkem času imamo na elementu visoko napetost in tok → lahko pride do odpovedi tranzistorja

Zvezavo tr. v kaskado lahko dosežemo večje ojačenje → za krmiljenje koničnega tranzistorja tako potrebujemo manjši bazni tok.

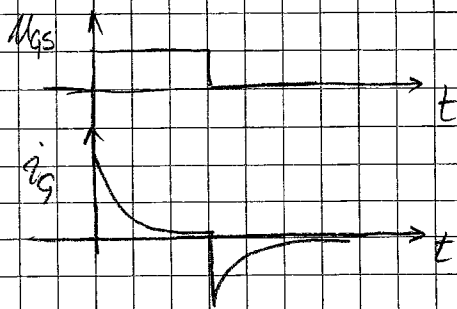
S tako zaprta 12 V tr. zmanjša dinamika (preklopov)

## MOSFET tr.

- boljše dinamika → ni p-n spoja, zato ni rekombinacij, ki podaljšujejo čas
- source, gate, drain → okoli elektrod je dopirano območje
- pri visokih napetostih je med S in D dokaj majhna upornost
- pri nizkih -1- se dosegajo nižji padci napetosti
- pri unipolarnih tr. je kanal obrnjen kot upor s pozitivnim temperaturnim koeficientom
- pri kaskadni vezavi se zaradi tega in  $\beta$  približno med vse elemente (ne pride do prepiranja elementov na istem vezavi)
- tr. z n-kanalom je bolj uporabljiva kot tr. s p-kanalom
- T-MOS (MOS-T) so za stikalne razmere najboljše → zato tehnologija ni primerna za linearno ojačevanje
- statične karakteristike so bolj "kvadratne" zato so primerni tudi za visokofrekvenčno delovanje

\* izdelavamo

- BS MOSFET z n. komalom, sev na domestnem vezju pojavi še povratna intrinzična dioda
- Za krmiljenje je pomembna kapacitivnost  $C_{gs}$  (pF = nF)
- MOSFET je napetostno krmiljen element; z nap. med G in S spravi in št. v prevodno stanje
- kondenzator se polni s tokom; ko nap. na C doseže nap. vira, tok ne vs več tekel

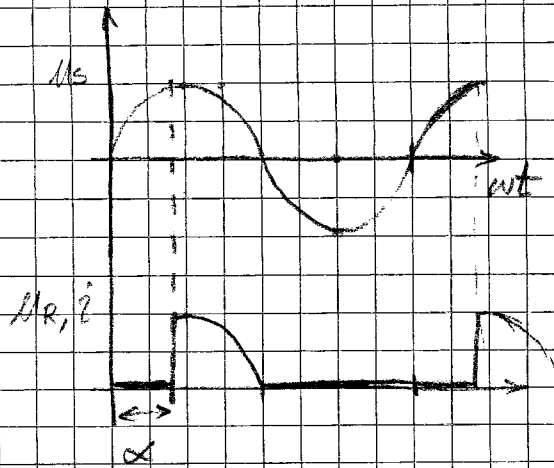
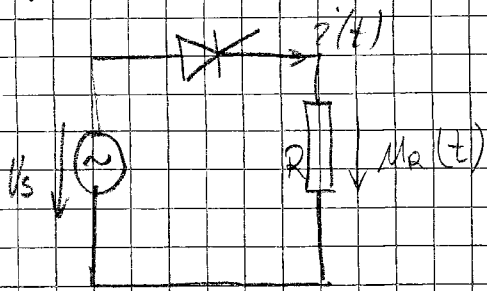


ob vzlopu moramo C nabit

tok mora ob izklopu mehoj iz C "potegniti" napr., da lahko napetost pade na 0

to želimo narediti čim hitreje → pulzi toka (p.s. mehoj r.)

- primer 5a:



$\alpha$  kot zakasnitve vhoda

- meri se od točke prehoda napetosti skozi 0

(točka momentane komutacije; ko bi stekel tok, če bila v vezju dioda)

- v večfaznem sistemu se točka nahaja drugje

- izračun srednje napetosti na bremenu

$$\bar{U}_R = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_s \sin(\omega t) d\omega t = \frac{\sqrt{2} U_s}{2\pi} \left( -\cos \omega t \right) \Big|_{\alpha}^{\pi}$$

$$= \frac{\sqrt{2} U_s}{2\pi} (1 + \cos \alpha) = U_{R,0}$$

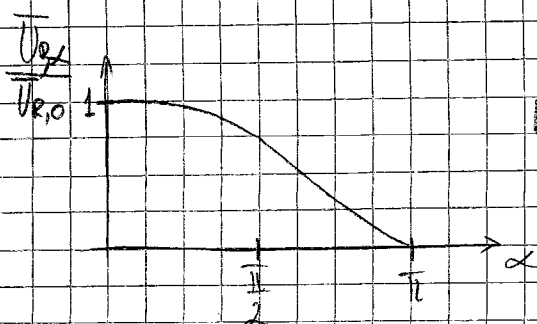
$$\frac{\bar{U}_R}{U_{R,0}} \propto$$

... sr. vr. nap. ob krmiljenju s kotom  $\alpha$

... sr. vr. nap. če bi bila v vezju dioda (tok bi tekel celo polperiodo)

$$\frac{\bar{U}_R}{U_{R,0}} = \frac{\frac{U_s}{2\pi} (1 + \cos \alpha)}{\frac{U_s}{\pi}} = \frac{1}{2} (1 + \cos \alpha) \rightarrow \text{krmilna karakteristika enofaznega enofaznega vezja}$$

$\rightarrow 0 \leq \alpha \leq \pi$  ... teoretično (v praksi težko dosežemo  $\pi$ )



krmilna karakteristika

# Hlajenje polprevodniških ventilov,

→ izgube so nastajene iz:

- preodni izgubi
- zaporni in blokirni
- prelopi
- krmilni

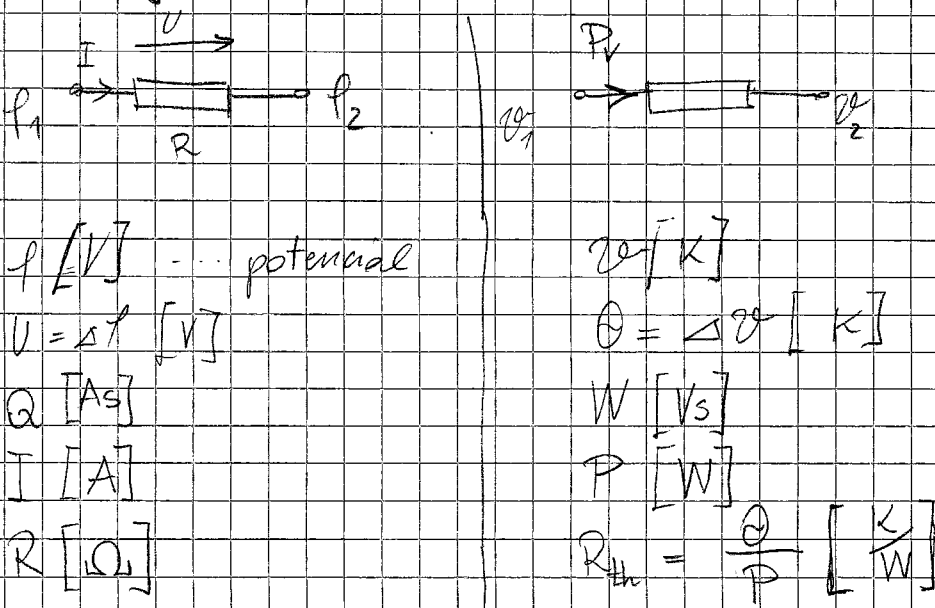
- periodično obratovanje → srednje vrednost  $P$  ← izgube

- prevodne izgube:

$$U_T = \underbrace{U_{(TO)}}_{\text{prevodna napetost}} + \underbrace{r_T I_T}_{\text{dinamične izgube}}$$

- toplota se razprošča preko silvanja, prevajanja (prenos toplote po minijci ionov), konvekciji (prenos toplote s tokom tekočine / zraka)
- proizvajalec določa maksimalno moč izgub in najvišjo temperaturo

Analogije med električnimi in toplotnimi veličinami:



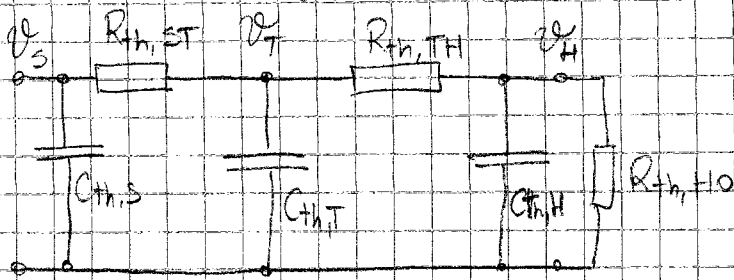
$$U_1 - U_2 = P \cdot R_{th} ; \quad R_{th} = \frac{d}{\lambda S} [ \frac{K}{W} ]$$

↑  
pravokotna na smer prehajanja toplote

Dodati je potrebno je toplotno kapaciteto komponente → akumulacija  
tj. izg. moči, ki potrosi rast temp.

$$f \cdot I_T = R_{th} \cdot d^2 \quad C_{th} = V \cdot \rho \cdot c [ \frac{Ws}{K} ] \quad \text{spec. topl. materiala}$$

Toplotna kapaciteta  $C_{th}$  je odvisna od  $\rho, c, V \rightarrow$   
 dobimo analogijo RC vezja.



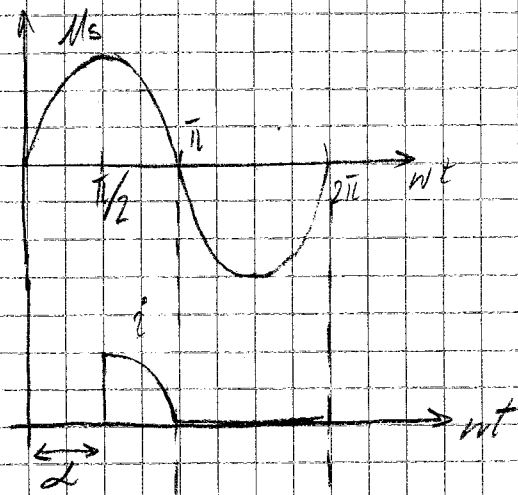
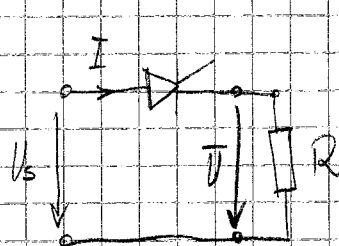
veličine so odvisne od dimenzij, geometrije, materialnih lastnosti  
 (površinaj)

nepraktično, ker je veliko priklonih  
 moči ohišja

(manjkajo moči)

2.4.2013

Primer: enopolzni usmernik



$$\begin{aligned} \hat{U}_s &= 325V \\ R &= 8\Omega \\ \alpha &= 90^\circ \end{aligned}$$

$P, S, Q, Q_1, \cos \phi_1$

jalova moč, ki jo generira  
 osnovna harm. ist. točka

breme je čisto ohmsko, tok je nelinearen

$$P = UI \quad (\text{ef. vrednosti})$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \hat{U}_s^2 \sin^2(\omega t) d\omega t} = \sqrt{\frac{\hat{U}_s^2}{2\pi} \left[ -\frac{1}{2} \sin(\omega t) \cos(\omega t) + \frac{\omega t}{2} \right]}$$

$$= \frac{\hat{U}_s}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{4\pi}} = \frac{325V}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\pi}{2\pi} + 0} = \frac{325V}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{1}{4}}$$

$$\text{www.stromar.si} = \frac{325V}{2\sqrt{2}} = \underline{\underline{114,9V}}$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{114,9V}{8\Omega} = \underline{\underline{14,36A}}$$

$$P = U \cdot I = 14,36A \cdot 114,9V = \underline{\underline{1650,3W}}$$

$$S = U_s \cdot I = 325V/\sqrt{2} \cdot 14,37A = 230V \cdot 14,37A = \underline{\underline{3302,4VA}}$$

↑  
"moč, kateče iz mreže"

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(3302,4)^2 - (1650,3)^2} = \underline{\underline{2860,4VAR}}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{1650,3W}{3302,4VA} = \underline{\underline{0,5}}$$

- za  $Q_1$  opravimo Fourier-jevo analizo, da določimo koeficiente

$$i(t) = \bar{I} + \sum_{\nu=1}^{\infty} \underbrace{(a_{\nu} \cos(\nu \cdot \omega t) + b_{\nu} \sin(\nu \omega t))}_{\text{izmenični del}}$$

↑  
srednja vrednost

$$b_{\nu} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \sin(\nu \omega t) d\omega t$$

$$a_{\nu} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \cos(\nu \omega t) d\omega t$$

$$f(\omega t) = \begin{cases} 0 & , \quad 0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2} \\ \hat{I} \sin(\omega t) & , \quad \frac{\pi}{2} \leq \omega t \leq \pi \end{cases}$$

$$\underline{b_1} = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \hat{I} \sin^2(\omega t) d\omega t = \frac{\hat{I}}{\pi} \left( \frac{\omega t}{2} - \frac{1}{4} \sin(2\omega t) \right) \Big|_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} = \frac{\hat{I}}{\pi} \left( \frac{\pi}{2} - 0 - \left( \frac{\pi}{2} - 0 \right) \right) = \frac{\hat{I}}{\pi} \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} \right) = \underline{\underline{\frac{\hat{I}}{4}}}$$

$$\underline{a_2} = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \hat{I} \sin(\omega t) \cos(\omega t) d\omega t = \frac{1}{\pi} = \frac{\hat{I}}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \frac{\sin(2\omega t)}{2} d\omega t = \frac{\hat{I}}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \sin(2\omega t) d\omega t = \frac{\hat{I}}{2\pi} \left( -\frac{\cos(2\omega t)}{2} \right) \Big|_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} = \frac{\hat{I}}{4\pi} \left( -1 - (-1) \right) = \underline{\underline{-\frac{\hat{I}}{2\pi}}}$$

$$I_1 = \underline{I}_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} = \sqrt{\frac{\hat{I}^2}{16} + \frac{\hat{I}^2}{4^2}} = \underline{0,296 \hat{I}}$$

amplitude osnovne harm. komp → sestavljena je iz sin in cos komp

$$\hat{I} = \frac{\hat{U}_s}{R} = \underline{40,625 A} \quad ; \quad \hat{I}_1 = 0,296 \cdot \hat{I} = 0,296 \cdot 40,625 A = \underline{12,03 A}$$

max. tok; steče med omežjem in bremenom.

$$p_1 = \text{atg} \frac{a_1}{b_1} = \underline{32,5^\circ}$$

- Osnovne harm. komp. toka:

$$i_1 = \hat{I}_1 \sin(\omega t - p_1) = 12,04 A \cdot \sin(\omega t - 32,5^\circ)$$

$$P = U_s I_1 \cos p_1 = 230 V \cdot \frac{12,04 A}{\sqrt{2}} \cdot \cos(32,5^\circ) = \underline{1651,5 W}$$

↑    ↑  
ef.   ef.

$$Q_1 = U_s I_1 \sin p_1 = 230 V \cdot \frac{12,04}{\sqrt{2}} \cdot \sin(32,5^\circ) = \underline{1052,1 VA}$$

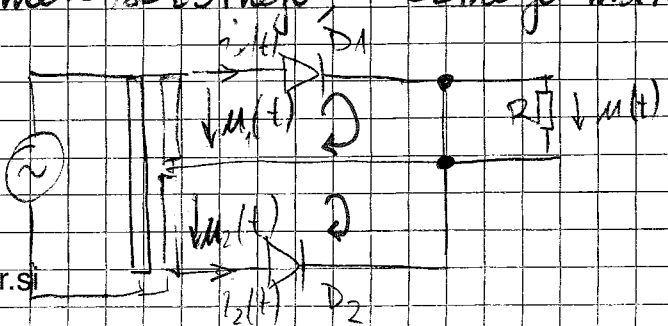
delož jalove moči, ki jo prispeva 1. harm. komponenta

- Dvofazna - enovh. vrom. vezji (ohm. breme)

vezji ima dve <sup>enaki</sup> sekundarni navitji na transformatorju, ki sta navitji v protifazi.

- 1. polperioda:   
 tako je v zgornjem tokokrogu dioda polarizirana prevodno, v spodnjem pa je dioda zaporno polarizirana

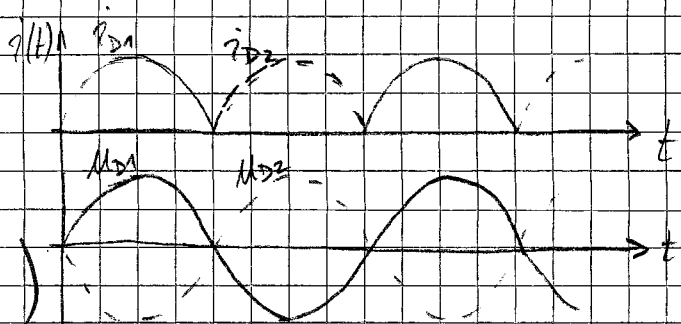
- 2. polperioda:   
 razmerje se obrne, razmerje ind. nap. na sek. se spremeni



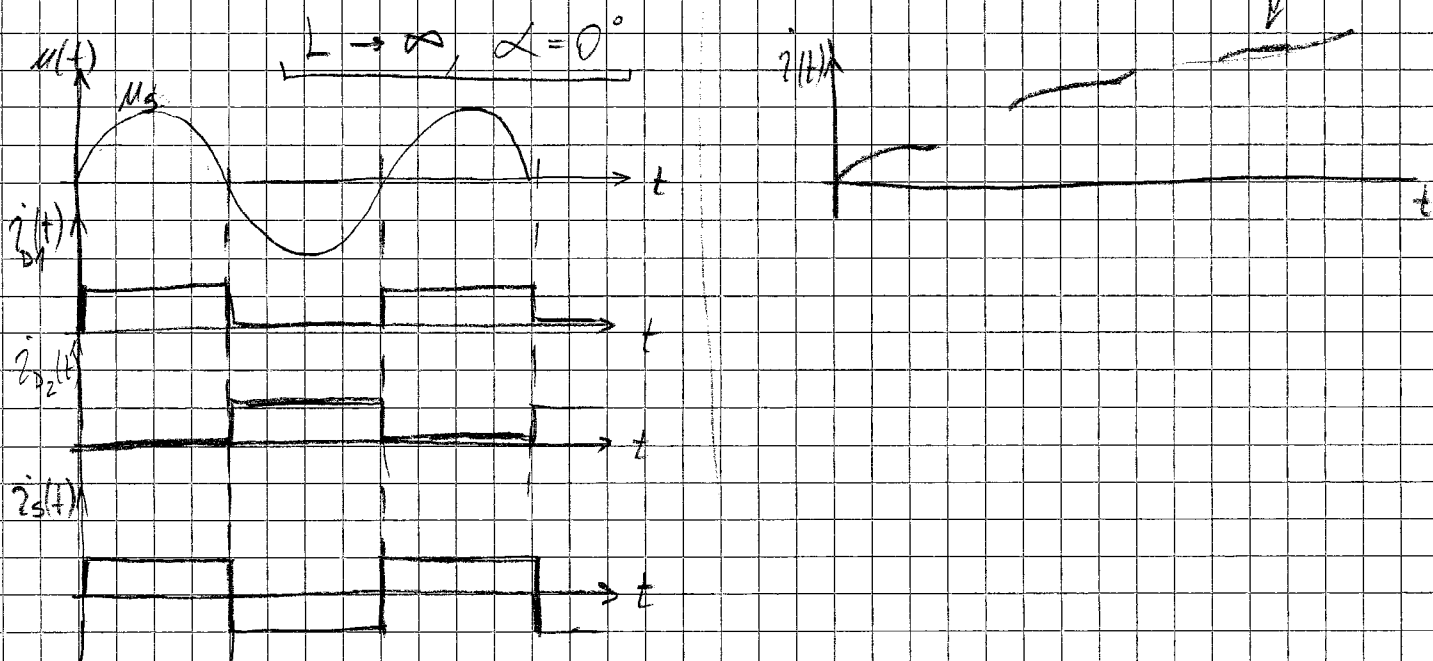
$$\hat{U}_s = \sqrt{2} U_s$$

$$\bar{U} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_s$$

$$\bar{U} = 0,9 U_s \quad (\text{pri prestavi } 1:1)$$



- če je breme RL se stanje ob preklopu zelo spremeni.
- če bi bila induktivnost neskončno velika, bi bil tok oblike:



- na usmerniškem delu dodamo še 2 diodi, tok tke prek dveh zap. diod
  - transformator se poenostavi
  - breme je ohmsko
  - srednja vr. napetosti je enaka kot v prvem primeru.
  - v prvem primeru je tr. bolj kompliciran, v drugem pa so 4 diode
  - če imamo nižje napetosti, želimo da je dim manj diod/ventilov vezanih v serijo, zato je primernyše prvi vezje
  - višje napetosti; pridobimo tudi na zaporni napetosti (po 2 diodi vezani v serijo) ...
- dvakratni padec napetosti  
→ 2x več izgub

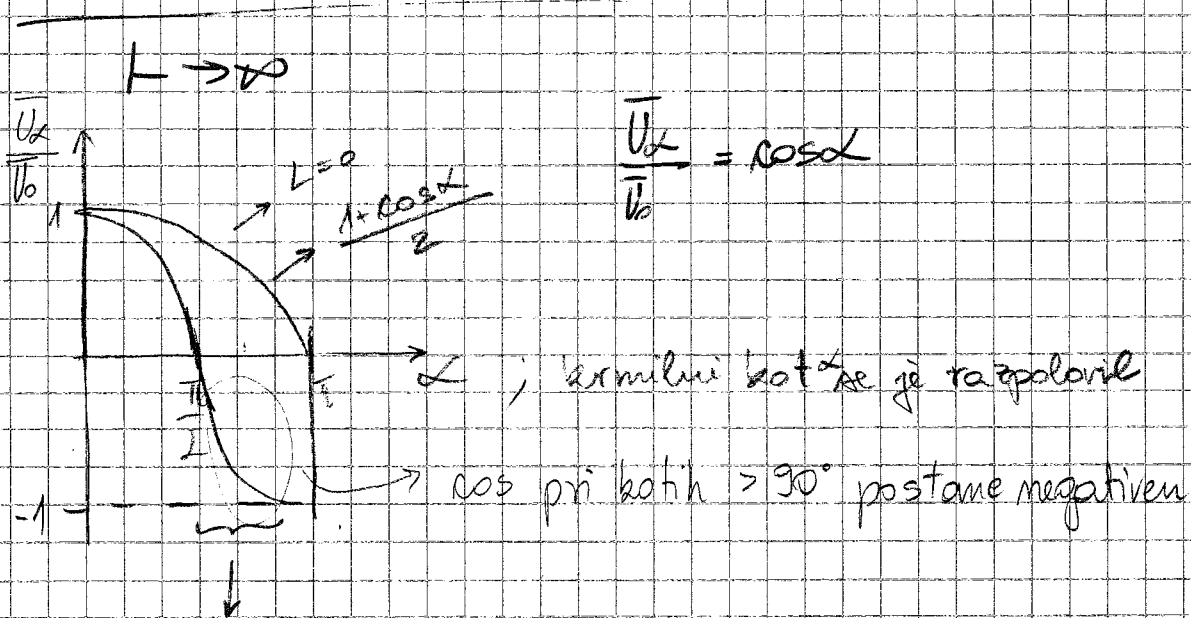
- če želimo krmiliti moč na bremenu, damo v vezje namesto dioda triistorje.

$$\bar{U}_0 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_s$$

$$\bar{U}_\alpha = \bar{U}_0$$

$$\frac{\bar{U}_\alpha}{\bar{U}_0} = \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

v primeru ohmskega bremena



v tem delu deluje vezje razmeriško → generator  
napetost postane negativna, tok obratna smer

→ moč v tem delu spremeni smer

↓  
moč teče v mrežo

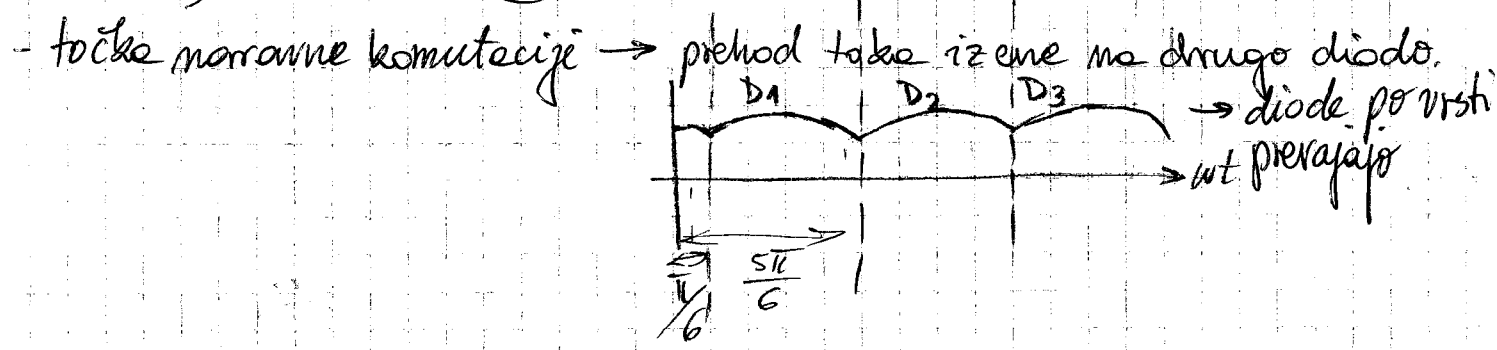
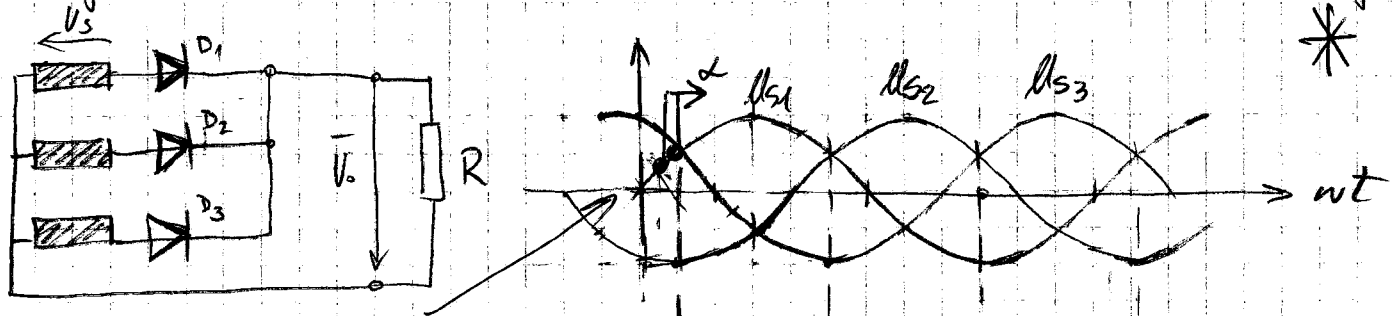
# \* trifazni nekontrolirani enofazni usmernik (brzina)

4.4.2013

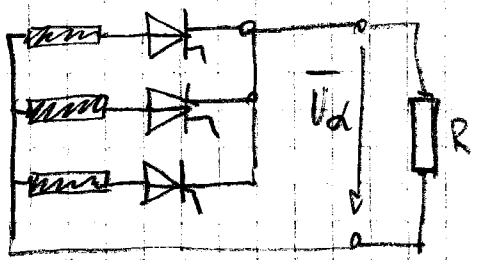
$$\alpha = 0 \quad \bar{U}_0 = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sqrt{2} U_s \sin(\omega t) d\omega t = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_s (-\cos(\omega t)) \Big|_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} = \frac{3\sqrt{2} U_s}{2\pi} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} U_s$$

$$\bar{U}_0 = 1,17 U_s$$

- ko je anoda na višjem potencialu kot katoda, dioda prevaja \*



$\alpha \neq 0$  → namesto diod dodamo tranzistorje

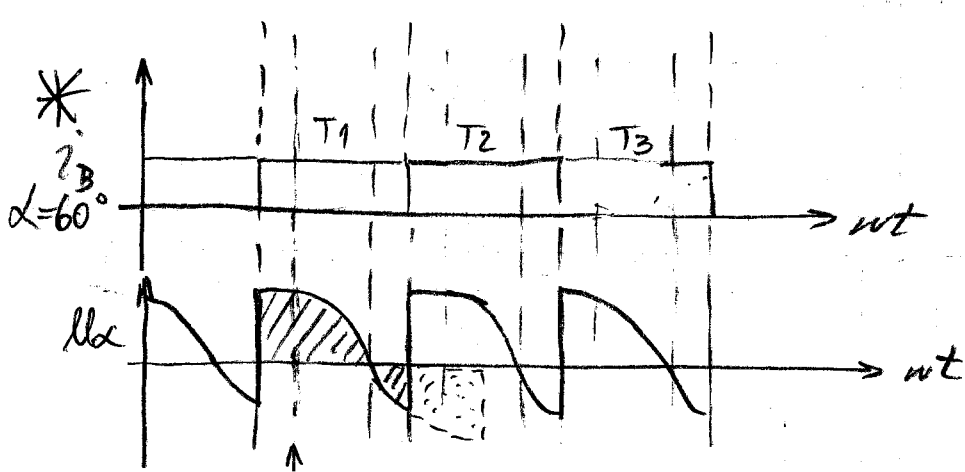


$$\bar{U}_d = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_s \sin(\omega t) d\omega t$$

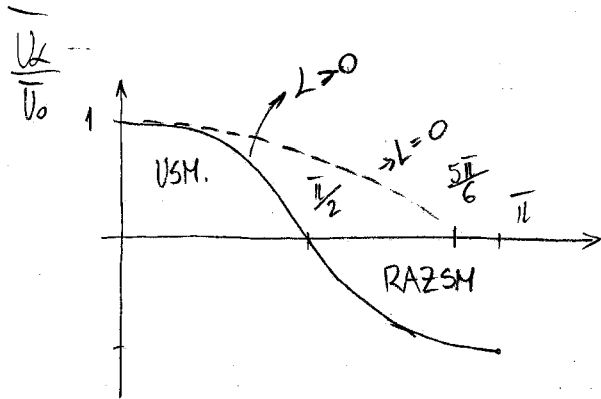
$$\bar{U}_d = \frac{3\sqrt{3} U_s}{2\pi} \left[ 1 + \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right) \right] ; \text{ za } \frac{\pi}{6} \leq \alpha \leq \frac{5\pi}{6}$$

$$\bar{U}_d = \frac{3\sqrt{3} U_s}{2\pi} \cos \alpha ; \text{ za } 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{6}$$

- pri  $\frac{\pi}{6}$  smo nad mejo triganega toka (če prozimo pri  $\alpha=0$ , to bi ne bi nikoli padel na 0)
- če prozimo pri  $\alpha > 0$ , bo tok nekaj časa 0.



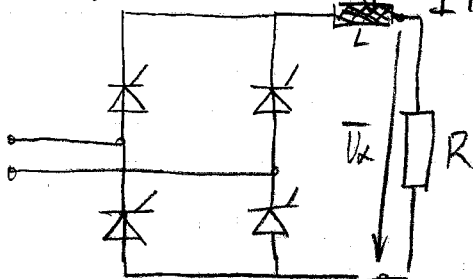
zakasnitev za  $90^\circ$ ; površina med osjo je enaka površini pod osjo ( $u_k = 0$ )



- pri 3-f sistemu vedno gledamo naprej od točke moravne komutacije

- za 1-f mostično vezje izračunaj L gladilne dusilke, da bo valovitost  $I_{izh}$  8%.

(\*)



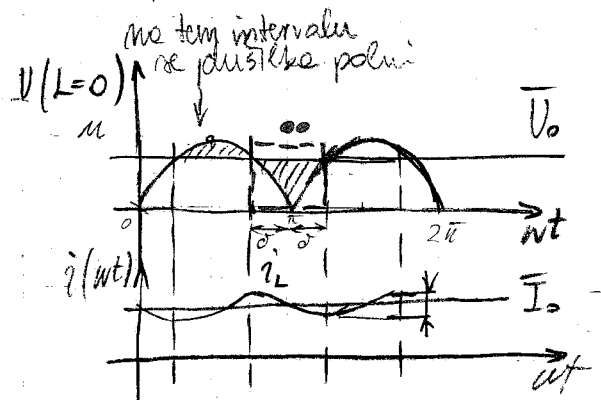
$$\frac{\Delta I}{\bar{I}_0} = 8\%$$

$$\alpha = 0^\circ$$

$$\bar{U}_0 = 220V$$

$$\bar{I}_0 = 120A$$

$$\frac{\Delta I}{\bar{I}_0} = 0,08$$



- med intervalu, ki je višji od srednje vrednosti se dusilke polni; med intervalu, ki je nižji od  $\bar{I}_0$  - dusilke deluje kot generator  $\rightarrow$  oddaja moč.

•• poenostavitev  $\rightarrow$  površino aproksimiramo s trikotnikom

- 1. kolobkvič: 23/26/7/9
- 2. kolobkvič: 4/6 jurnij

→ ustni 12.6., Rekvas tudi na 2.12e 1.7.

Tipška moč tr. je enaka povprečni vrednosti navideznih moči na posameznem vrtiljuhu.

$$S_T = \frac{S_p + S_s}{2}$$

faktor tipške moči:  
 primar      sekundar

$$G_T = \frac{S_T}{P_B} = \frac{S_p + S_s}{2 \cdot P_B} = \frac{C_p \cdot P_B + C_s \cdot P_B}{2 \cdot P_B} = \frac{C_p + C_s}{2}$$

faktor tipške moči

konstantna moč na klemenu

$$S_p = C_p \cdot P_B$$

$$S_s = C_s \cdot P_B$$

\* nadaljevanje primera

$$\frac{\Delta I}{I_0} = 8\% = 0,08$$

$$\alpha = 0^\circ$$

$$\bar{U}_0 = 220V$$

$$\bar{I}_0 = 120A$$

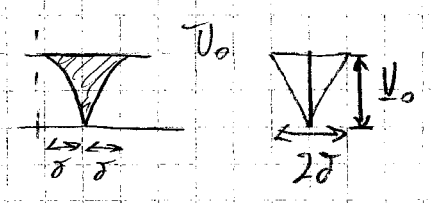
L

$$u_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$\int u_L dt = L \cdot \Delta I$$

$$\psi = L \cdot \Delta I$$

$$\Delta I = 0,08 \cdot \bar{I}_0 = 0,08 \cdot 120A = 9,6A$$



$$\bar{U}_0 = U \sin \delta$$

$$\psi = \frac{2\delta}{\omega} \cdot \bar{U}_0 \cdot \frac{1}{2}$$

$$\delta = \alpha \sin \frac{\bar{U}_0}{U} = \alpha \sin \frac{2 \cdot U_s}{\frac{U}{A_s}} = \alpha \sin \frac{2}{\pi}$$

$$\frac{2\delta}{\omega} = 2 \cdot \Delta t$$

Zanimna mas časa trajanja kota

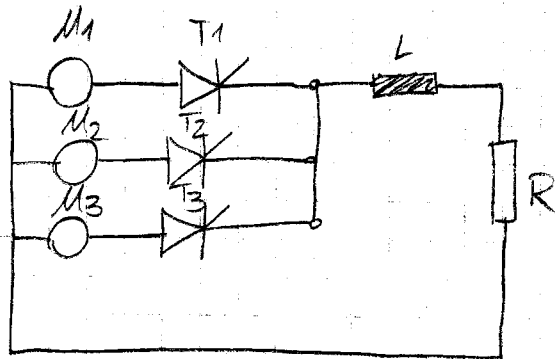
$$\delta = 39,5^\circ$$

$$\psi = \frac{2\delta}{\omega} \cdot \bar{U}_0 \cdot \frac{1}{2} = 0,0022s \cdot 220V = \underline{0,484 Vs}$$

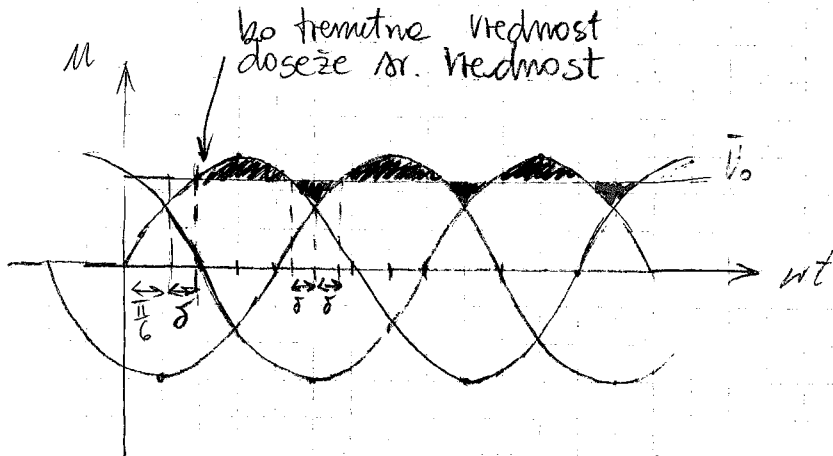
$$L = \frac{\psi}{\Delta I} = \frac{0,484 Vs}{9,6A} = \underline{50,4mH}$$

Potrebujemo tolikšno induktivnost, da bo valovitost 8%

### 3-fazna enofazna usmerniška vezje



$$\begin{aligned} \bar{U}_o &= 220V \\ \bar{I} &= 120A \\ L &= 13mH \\ \hline \Delta \bar{I} \text{ pri } L=0 \end{aligned}$$



$$\bar{U}_o = \hat{U} \sin\left(\frac{\pi}{6} + \delta\right) \quad *$$

$$\delta = \arcsin\left(\frac{U \cdot 1,17}{U \cdot \sqrt{2}}\right) - \frac{\pi}{6} = 55,8^\circ - 30^\circ = \underline{\underline{25,8^\circ = 0,45 \text{ rad}}}$$

$$\Psi = \frac{2\delta}{\pi} \left(\bar{U}_o - 0,5\hat{U}\right) \cdot \frac{1}{2} = \frac{2 \cdot 0,45}{314 \text{ s}^{-1}} (220V - 133V) \cdot \frac{1}{2} = \underline{\underline{0,125 \text{ Vs}}}$$

$$\Delta \bar{I} = \frac{\Psi}{L} = \frac{0,125 \text{ Vs}}{13 \text{ mH}} = 9,6A$$

$$\frac{\Delta \bar{I}}{\bar{I}} = \frac{9,6A}{120A} \cdot 100\% = 8\%$$

3-f enof. usm. vezje;  
v prejšnjem primeru je bila  
dusilka 50,4mH (skrajna  
veža)

→ več kot je pulzov, manjša  
je lahka dusilka

$$* \bar{U}_o = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} U_s = \underline{\underline{1,17 U_s}}$$

- 3 f. enovh. usmerjanje: imamo tri pulze na eno periodo

- v vsakem trenutku prevaja en ventil zgoraj in en ventil spodaj

- v eni periodi imamo 6 komutacij

vezje se imenuje tudi: trifazno 6-pulzno vezje

11.4.2013

- enosmerna napetost:

$$u_{uv} = \sqrt{2} U \cos(\omega t)$$

$L \rightarrow \infty$

$\bar{U}_0 = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} U = 1,35U$  → razmerje med ef. vrednostjo na vnosu in medfazno napetostjo

$L \rightarrow 0$

$$\bar{U}_0 = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} U = 1,35U$$

$$0 < \alpha \leq \frac{\pi}{3}$$

- prozorni kot na vnosu je  $30^\circ$  zato toliko ne pade na vrednost

$L \rightarrow \infty$

$q$  - komutacijsko število: št. komutacij na eno periodo, ki se odvija pri eni skupini ventilov

$s$  - število komutacijskih grup

$r$  - št. paralelnih grup (npr.: transformator z dvema usmernikoma → nadaljnje delitev kota)

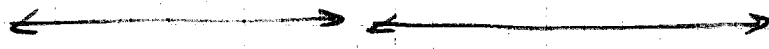
$P = \frac{q}{\pi} \cdot s \cdot r$  → št. pulzov na eno periodo.

Splošna formula za izračun sr. vrednosti nap.  $\bar{U}_0$  pri omejenih vrednih pretvornikih

reziter:

$$\bar{U}_0 = \frac{p\omega}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{p}}^{\frac{\pi}{p}} \sqrt{2} U_s \cos(\omega t) d\omega t ; \quad \bar{U}_0 = \sqrt{2} U_s \frac{p}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{p}\right)$$

Št. pulzov p:	2	3	6	12
$\bar{U}_2/U_s$	0,9	1,17	1,35	1,4



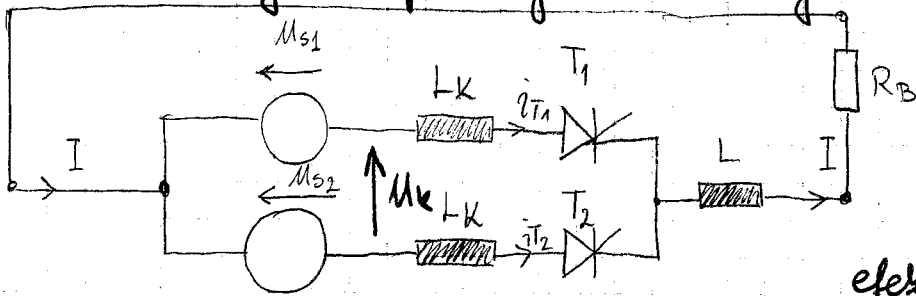
$U_s$  je fazna napetost

$U_s$  je medfazna napetost

- Pozorni moramo biti na to kdaj tok poganja fazno / medfazno nap.

- Nadomestno vezje 6-pulznega usmerniškega vezja

16.4.2013



efektivna vrednost

$$u_2 = u_{s2} - u_{s1}$$

$$u_2 = \sqrt{2} U_k \sin(\omega t)$$

→ naravna komutacijska napetost

medfazna napetost = razlika dveh faznih napetosti

max. vrednost

- V eni periodi pride do šestih komutacij toka
- mi se bšredotolino na eno komutacijo → od 1. do 3. ventilca
- to nadomestno vezje velja le za čar komutacije.
- točka naravne komutacije je  $30^\circ$  kasneje kot je prehod faze napetosti skozi 0.
- tok na bremenski strani je konstanten

$$i_{T1} + i_{T3} = I$$

$$u_2 + L_k \frac{di_{T1}}{dt} - L_k \frac{di_{T3}}{dt} = 0$$

$$\frac{di_{T1}}{dt} = - \frac{di_{T3}}{dt} = \frac{di_k}{dt} \quad (\text{tok je glajen})$$

$$u_k = 2 \cdot L_k \frac{di_k}{dt} = \sqrt{2} U_k \sin(\omega t)$$

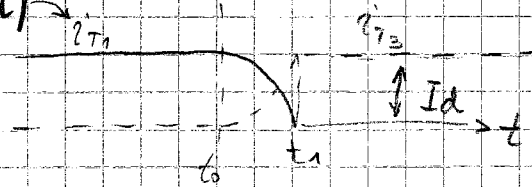
$$i_k = \frac{\sqrt{2} U_k}{2 \cdot L_k \cdot \omega} \int_0^{\omega t} \sin(\omega t) d\omega t = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{U_k}{X_k} (1 - \cos(\omega t))$$

odvod po času nadomestimo s kotom

$$i_{T1} = \frac{\sqrt{2} U_k}{2 X_k} (\cos(\omega t) - 1) + I_b$$

(tok upada)

$$i_{T3} = \frac{\sqrt{2} U_k}{2 X_k} (1 - \cos(\omega t)) \quad (\text{tok naraščanja})$$



- velja že  $\alpha = 0$ ; komutacija se izvaja relativno dolgo.

Višje  $U_k \rightarrow$  strmina spreminjanja toka skozi obe tiristorje je večja

-  $\neq \alpha$  (prožilnim kotom) spreminjamo potek komutacije

- območje spreminjanja kota  $\alpha$  je od  $0^\circ$  do  $180^\circ$ ; usmerniško delovanje je do  $90^\circ$ , do  $180^\circ$  pa je vzsmerniško delovanje

- kako je v primeru, ko se  $\alpha$  spreminja?

$\alpha \neq 0$

meje integracije se spreminjajo

$$i_{T1} = \frac{\sqrt{2} U_k}{2 X_k} (\cos(\omega t + \alpha) - \cos \alpha) + I_b$$

$$i_{T3} = \frac{\sqrt{2} U_k}{2 X_k} (\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha))$$

$$U_k - 2 L_k \frac{di_{T3}}{dt} = 0$$

čas komutacije

$$\int_0^{t_u} U_k dt = 2 L_k \int_0^{t_u} di_{T3}$$

- ko je komutacija končana je tok enak bremenskem toku, pred komutacijo teče glajeni tok.

Zajamemo padca v obeh induktivnih vejah

- padec v obeh induktivnostih:

$$\frac{1}{2} \int_0^{t_u} U_k dt = L_k \cdot I$$

- napetostna kakovostna ploskev:  $D_x$

$$D_x = L_k \cdot I \cdot \omega g_f; \text{ ponovi se pri vsaki komutaciji}$$

za naš primer

št. vrstnih vezanin komutacijskih grup

→  $s=1$

$g$ ... št. komutacij

→  $g=3$

$$d_x = \frac{D_x}{T_0}$$

→ kakšen je padec napetosti na izhodu

- Primer:

6-pulzno mostično vezje, ki je preko kom. dušilke priključeno na omr. Izračunaj kote prebrivanja ( $\mu$ ) za krmične kote  $\alpha = 0, 30^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ . Podanesi vsaj tudi kom. dušilke za 2 primera.

$U_s = 230/400V$   
 $I = 30A$

$\alpha [^\circ]$	0	30	90	120	150
$L_{k1}$	8,10	1,13	0,57	0,66	1,16
$L_{k2}$	22,10	7,56	4,20	4,99	9,93

$\alpha = 0, 30^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$

(1)  $L_{k1} = 0,3 \text{ mH}$

(2)  $L_{k2} = 2,2 \text{ mH}$

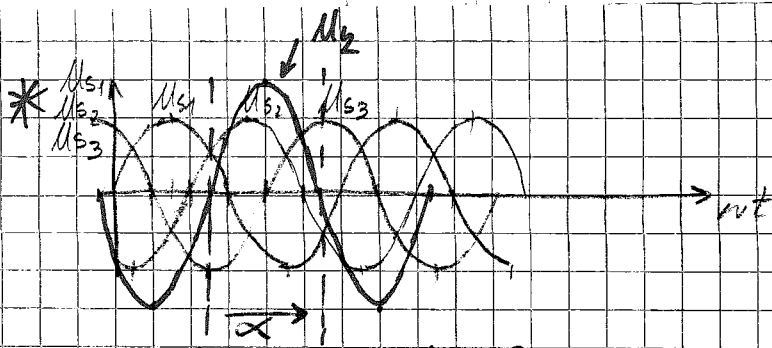
$$\cos(\alpha + \mu) = \cos \alpha - \frac{\sqrt{2} \cdot I \cdot \omega L_k}{U_k}$$

①  $\alpha = 0$ :  $\cos(\mu) = 1 - \frac{\sqrt{2} \cdot 30A \cdot 100\pi \frac{1}{s} \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} \frac{Vs}{A}}{400V} = 0,99$

$\mu = 8,1^\circ$

②

- Večja kot je  $L_k$ , daljši je čas prebrivanja → padec na izhodu je večji  
- če gremo preko  $180^\circ$ , bi ventil kar prevajal (kar pomeni, da bi to lahko bil nek kratki stiz → krmično kar je potrebno skrajšati in upoštevati kot krmičenja)



$M_{s1} = M_{s2}; M_2 = 0$

$i_{T1} + i_{T2} - i = 0 \longrightarrow$  velja v času komutacije  
 $M_2 + L_k \cdot \frac{di_{T1}}{dt} - L_k \cdot \frac{di_{T2}}{dt} = 0$

$\frac{di_k}{dt} = - \frac{di_{T1}}{dt} = \frac{di_{T2}}{dt}$

$U_k - L_k \frac{di_k}{dt} - L_k \frac{di_k}{dt} =$

$U_k = 2 L_k \frac{di_k}{dt} = \sqrt{2} U_2 \cdot \sin(\omega t)$

$i_k = \frac{\sqrt{2} U_2}{2 L_k \cdot \omega} \int_0^{\omega t} \sin(\omega t) d\omega t$

$i_{T1} = \frac{\sqrt{2} U_2}{2 \cdot L_k \cdot \omega} (\cos(\omega t) - 1) \dots$  upeda  
 $i_{T2} = \frac{\sqrt{2} U_2}{2 \cdot L_k \cdot \omega} (1 - \cos(\omega t)) \dots$  narašča  
 }  $\alpha = 0$

$i_{T1} = \frac{\sqrt{2} U_k}{2 L_k \cdot \omega} (\cos(\omega t + \alpha) - \cos \alpha)$   
 $i_{T2} = \frac{\sqrt{2} U_k}{2 L_k \omega} (\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha))$   
 }  $\alpha \neq 0$

- kot prekrivanja :  $\mu = \omega (t_1 - t_0)$
- kaj vpliva na potek komutacije ?
- $U_k, 0 \leq \alpha \leq 180^\circ$

v času, ko prevajata obe diistorija, se zg. dušilka prežne, sp. pa' polne

• ko se pretok toka konca ni več podra . napetosti na dušilki mi več vpliva na rihodnos napetost

$u = \omega t$  ; ob koncu komutacije :

$$\underline{2T_1 = 0}$$

$$\frac{\sqrt{2} U_k}{2 X_k} (\cos(\alpha + \alpha) - \cos \alpha) + i = 0$$

$$\begin{aligned} \cos(\alpha + \alpha) &= \cos \alpha - \frac{i \cdot 2 X_k}{\sqrt{2} \cdot U_k} \\ &= \cos \alpha - \frac{i \sqrt{2} X_k}{U_k} \end{aligned}$$

• kaj izgubimo na izhodu?

$$\begin{aligned} \alpha = 0 & \quad \bar{U}_0' = \bar{U}_0 - D_x \\ \alpha \neq 0 & \quad \bar{U}_k' = \bar{U}_k - D_x \end{aligned}$$

padec napetosti zaradi realtane  
 komutacijskih  
 zmanjšane vrednosti napetosti  
 na izhodu  
 ... ne glede na kot  $\alpha$  je  
 padec napetosti enak.

$$D_x : U_k \cdot \Delta t = L \cdot \Delta i$$

padec napetosti je enak padcu na  
 eni komutacijski induktivnosti

$$\frac{1}{2} \int U_k \Delta t = L x \Delta i$$

$$U = L_k \cdot i ; L \rightarrow \dots i = I$$

$$D_x = \frac{3U}{T} = \frac{3L_k \cdot I \cdot \omega}{2\pi} = \frac{3X_k \cdot I}{2\pi}$$

$$\omega = 2\pi \frac{1}{T}$$

$d_x$  ... relativni padec napetosti

$$\begin{aligned} d_x &= \frac{D_x}{\bar{U}_0} = \frac{X_k \cdot I}{\sqrt{2} \cdot U_k} \\ \bar{U}_0 &= \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{U_s}{\pi} = \underline{1.57 \cdot U_s} \end{aligned}$$

$\rightarrow$  medfazna

Primer: 3-f, 3-pulzno usmerniško vezje

1.)  $I = 400 \text{ A}$   
 $\bar{U}_0 = 220 \text{ V}$   
 $X_k = 0,1 \Omega$

$U_s = ?$ , da bo na izhodu nr. vr. 220 V

$$D_x = \frac{3 \cdot X_k \cdot I}{2\pi} = \frac{3 \cdot 0,1 \cdot 400 \text{ A}}{2\pi} = 19,1 \text{ V} \rightarrow \text{na izhodu izgubimo } \approx 20 \text{ V}$$

$$\bar{U}'_0 = \bar{U}_0 + D_x = 19,1 \text{ V} + 220 \text{ V} = 239,1 \text{ V} \rightarrow \text{napetost, ki je potrebna na izhodu}$$

$$U_s = \frac{\bar{U}'_0}{1,17} = \frac{239,1 \text{ V}}{1,17} = 204,3 \text{ V}$$

\*\*

$$\begin{aligned} -M_{s1} - \frac{M_k}{2} + M_o &= 0 \\ -M_{s2} + \frac{M_k}{2} + M_o &= 0 \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} -M_{s1} - \frac{M_k}{2} + M_o &= 0 \\ -M_{s2} + \frac{M_k}{2} + M_o &= 0 \end{aligned}} \right\} +$$

$$-M_{s1} - M_{s2} + 2M_o = 0$$

$$M_o = \frac{M_{s1} + M_{s2}}{2} \quad \alpha \leq \alpha + \mu \leq \alpha + \mu$$

2.) Izračunaj kot prekrivanja med komutacijami 3-f, 3-pulznega vezja:

$$\bar{U}_0 = 440 \text{ V}$$

$$X_k = 0,14 \Omega$$

$$I = 300 \text{ A}$$

$$\cos(\alpha + \mu) = \cos \alpha - \frac{\sqrt{2} I X_k}{U_k}$$

$$\alpha_1 = 0$$

$$\alpha_2 = 30^\circ$$

$$U_k = \sqrt{3} \frac{U_0}{1,17} = \sqrt{3} \frac{440 \text{ V}}{1,17} = 651,4 \text{ V}$$

$$\alpha_1 = 0: \cos \mu_o = \cos 0 - \frac{\sqrt{2} I X_k}{U_k} \Rightarrow \mu_o = 24,66^\circ$$

$$\alpha_2 = 30^\circ: \cos(30^\circ + \mu) = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\mu_{30^\circ} = 9,8^\circ$$

SNOV KOLOKVIJA:  
do komutacije →

25.4.2013

- stikala
- toplota, izgub, odvajanje
- trans. imp; temp. potomeznih spojev
- vezja → enof. enovh.
- || - mostično vezje
- vezje z dvema tistorjema - (dvoj. enovh. trif. enovh. (tripulzno), trifazni mostič (6-pulzno))

- krmišne korr. za različne bremena; izredni sr. vrednosti no enosmerni stromi
- računska in vpisna vprašanja

TRIFAZNO TRIPULZNO VEZJE  
 $U_{s,med} = 500V$

$\bar{I} = 1000A$

$X_{om} = 0,69 \mu\Omega$

- reaktanca, ki jo čutimo proti mreži, ko ne dodamo dodatnih induktivnosti
- ne bremenski strani

$L \rightarrow \infty$

- kdaj nastopi najvišja kom. nap. in kakšna je njena vrednost? (koliko je %)

$\hat{U}_k = \sqrt{2} \cdot U_{s,mp} = \sqrt{2} \cdot 500V = \underline{\underline{707,1V}}$

$\alpha = 90^\circ$

- kako velika je največja strmina toke skozi tistorje →  $\frac{di}{dt}$  kot prekrivajoča je najmanjši pri max. kom. napetosti →  $\hat{U}_k$

$\frac{di}{dt} = \frac{U}{L} = \frac{\hat{U}_k \omega}{2X_{om}} = 160 A/\mu s$

$X_{om} = \omega L \rightarrow$  imo 2 veji, v vsaki veji sta dve reaktanci  
→  $2\omega L$

$(\frac{di}{dt})_{maks} = 60 A/\mu s \rightarrow$  maksimalni preklon tistorjov, mi imamo veliko večjega

- kako veliko induktivnost moramo dodati v vsaki veji, da pridemo do te vrednosti?

$L_{om} = \frac{X_{om}}{\omega} = 2,2 \mu H$

dodati moramo:

$L_{k,dod} = L_{k,min} - L_{om} = \underline{\underline{3,7 \mu H}}$

$L_{k,min} = \frac{\hat{U}_k}{2 (\frac{di}{dt})_{maks}} = 5,89 \mu H$

- kolikšen je padec napetosti zaradi prekrivanja  $\rightarrow D_x$  ?

$$D_x = \frac{3 X_v \cdot \bar{I}}{2\pi} = 0,88V$$

$$dx = \frac{D_x}{U_0} = \frac{0,88V}{1,17 \cdot U} = 0,0026 \rightarrow 0,26\% = dx(\%)$$

Primer:

Izračunajte delomo, jalovo in max. moč usmernika v trifezni mostični krmiljeni izvedbi / v polkrmiljeni izvedbi. Pri obeh izvedbah želimo na izhodu  $\bar{U}_x$ .

$\bar{U}_0 = 500V$   
 $\bar{U}_x = 250V, L \rightarrow \infty$   
 $\bar{I}_x = 1000A$

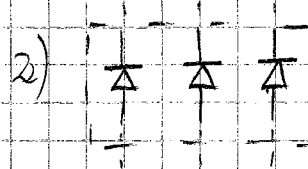
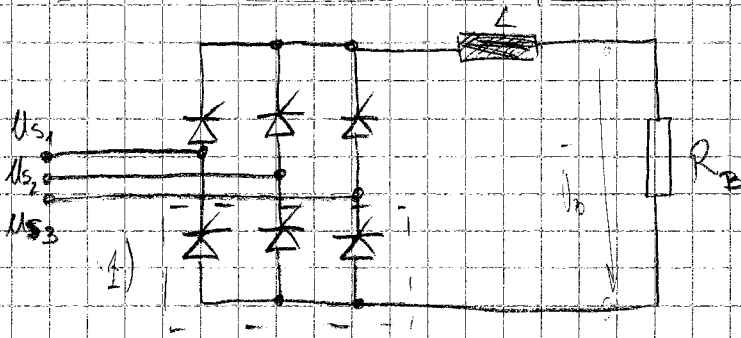
Ne vemo kakšen je kot  $\alpha$ .

1) krmiljena izvedba:

2) polkrmiljena izvedba:

$P_1 = 250kW$   
 $Q_1 = 433kVAr$   
 $S_1 = 500kVA$

$P_2$   
 $Q_2$   
 $S_2$



pri tej izvedbi zamenjamo eno skupino krmiljenj z obdelami

1.)  $\bar{U}_x = \bar{U}_0 \cdot \cos\alpha$

$\alpha = \arccos \frac{\bar{U}_x}{\bar{U}_0} = \arccos \frac{1}{2} = 60^\circ$

$\rightarrow P = \bar{U}_0 \cdot \bar{I}_x \cdot \cos\alpha = 500V \cdot 1000A \cdot \frac{1}{2} = \underline{250kW}$

moč je zaradi krmiljenja manjša

$Q_1 = \bar{U}_0 \cdot \bar{I}_x \cdot \sin\alpha = 500V \cdot 1000A \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \underline{433kVAr}$

$S_1 = \sqrt{P^2 + Q_1^2} = \underline{500kVA}$

- tažsne so moči, ko želimo imeti na izhodu polovico maksimalne napetosti

2.) Gledamo prispevke posameznih skupin elementov  $\rightarrow$  vsota obeh.

$\bar{U}_x = \frac{\sqrt{3}}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot U_s \cdot \cos\alpha \rightarrow$  prispevek zgornje komutacijske skupine  
 ↑  
 faze napetost

$\bar{U}_{x,sp} = \frac{\sqrt{3}}{2 \cdot \sqrt{2}} U_s \cdot \cos\alpha_2 = \frac{\sqrt{3}}{2 \cdot \sqrt{2}} U_s$

$$\bar{U}_x = (1,17U_0) \cdot \cos \alpha + (1,17U_0) =$$

$$\bar{U}_x = \frac{U_0}{2} \cdot (\cos \alpha + 1) = U_0 \cos \frac{\alpha}{2} = U_0 \cos \left( \frac{2\bar{U}_x}{U_0} - 1 \right) =$$

$$\alpha = 2 \cos^{-1} \left( \frac{\bar{U}_x}{U_0} \right) = 90^\circ$$

$$P = \bar{U}_x \cdot \bar{I}_x = \frac{U_0 \cdot \bar{I}_x}{2} (\cos \alpha + 1) = 250 \text{ kW}$$

→ v obeh primerih je P enaka, ker imamo obakrat na izhodu enako napetost in tok.

$$Q_2 = \frac{U_0}{2} \cdot \bar{I}_x \cdot \sin \alpha + \frac{U_0}{2} \cdot \bar{I}_x \cdot \sin 0^\circ = 250 \text{ kVAR}$$

→ vsota prispevkov obeh delov

$$S_2 = \sqrt{P^2 + Q_2^2} = 353,6 \text{ kVA}$$

- T drugi izvedbi smo zelo zmanjšali jalovo moč
- delamo lahko še v usmerniškem režimu

## DIREKTNI PRETVORNIKI

- so brez galvanjske ločitve med vh. in izh.
- za eno in večkvadrantno delovanje
- možnost enosmernega ali dvismernega pretoka moči
- pri prejšnjih pretvornikih je frekvenca diktirala vodenje; tuje vodenje
- tu samo izredno vodenje

- majhne dimenzije, mase
- dobra razmerja med instalirano preklopno močjo in maksimalno preneseno močjo (visok izkoristek  $\approx 85-98\%$ )

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

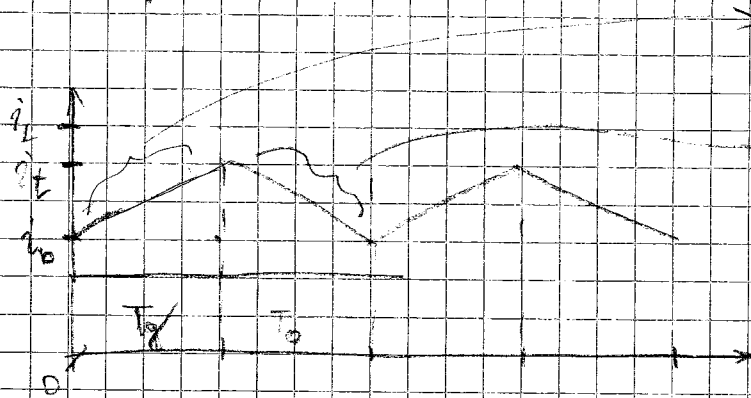
n... št. ventilov  
 $U_{pv}$ ... teoretična  $U_{max}$  ino ventila v  
 $I_{pv}$ ... ..  $I_{max}$  ...

- cilj je doseči max. moč na kilogram (volumen)
- tipičen primer: razmerje za FV celice.
- povzročajo več elektromagnetnih motenj sosednjim elementom.

## DC - DC pretvorniki

- pretvorniki manjša / manjša

- kombinacija pretvornika navzgor in navzdol → zaporni pretvornik - pretvornik gor-dol
- preklopna frekvenca je precej višja od čas. konstant v vezju → linearni potek toka
- tok skozi dusilko (enak toku skozi stikalo) linearno narašča do izklopa



- ob vklopu teče tok po celotnem vezju
- ob izklopu se tok seli/komutira v prostokolni tokokrog (desni del vezja)

- tok je omejen s sposobnostjo prevajanja ventila
- vh. napetost praktično ni omejena, izhodna nap. je omejena  
 $U_{izh.} \leq U_{vh.}$

- iz vira tečejo tokovni impulzi → težava! → visok  $\frac{di}{dt}$   
pojavi se lahko inducirane napetosti, ki se pojavijo na parazitnih induktivnostih

- stikalo prozimo s pulzno širinsko metodo x na izhodu  
če je zagonska napetost višja od krmilne, bo stanje "0"; če pa bo nižja pa bo "1".

- če je stanje vh. in izh. enako, dobimo na izhodu polovico srednje vrednosti napetosti

- breme je ponavadi ind. značaja → valovitost napetosti (harmonske stopnje) → potrebujemo RC filter 2. reda

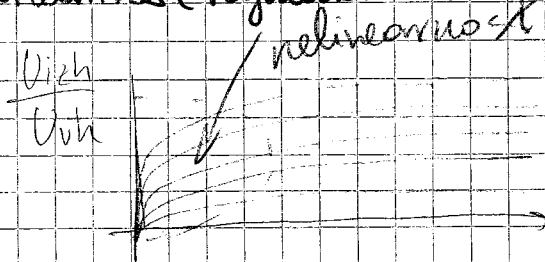
- nizpasovni filter prepušča nižje frekvence, duši frekvence, ki so nad mejno frekvenco.

- da filter čim bolj duši posledice preklopov

- Izh. nap. krmilimo z delovnim razmerjem

$$\frac{U_{izh}}{U_{vh}} = \frac{d^2}{d^2 + \frac{I_{izh}}{4 \cdot I_{izh}}}$$

Ob zmanjšani obremenitvi se pojavi trgan tok  $\rightarrow$  razmere so nelinearne (regulator v tem območju ni več optimiziran)



Blizje kot smo nazivnim obremenitvam, boljše so pogoji za optimalno delovanje.

Valovitost napetosti na kondenzatorju je odvisna od  $C$  in  $L$

$$\Delta U_{izh} = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta I_L}{2} \cdot \frac{T_s}{2}$$

$$\Delta I_L = \frac{U_{izh}}{L} (1-d) T_s$$

$$\Delta U_{izh} = \frac{T_s}{8C} \cdot \frac{U_{izh}}{L} (1-d) \cdot T_s$$

Zg. meja filtra je določena z  $L$  in  $C$

PRETVORNIK NAVZGOR

$$U_{izh} \geq U_{vh}$$

Višja kot je  $U_{izh}$ , višja mora biti  $U_{Lind}$ .

Na vh. smo omejeni z velikostjo napetosti na izhodu, tož je omejen s sposobnostjo prevajalca prekajanja teže stikala

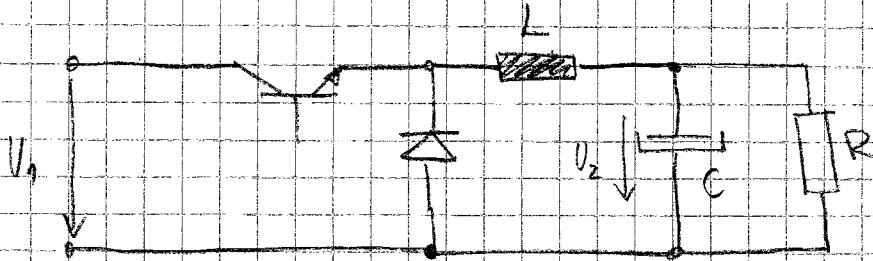
V vsakem ciklu napolnimo  $L$ , izklopimo tranzistor; mag. energija se pretvori v energijo kondenzatorja

Izhod mora biti reguliran

- kaj se zgodi, če povečamo frekvenco?  
oddaljimo se od meje trgonnega toka

// na strmine ne vplivamo, ker imamo konstantne razmere  $u_L$  in  $i_L$ .

## 2.) Pretvornik navzdol

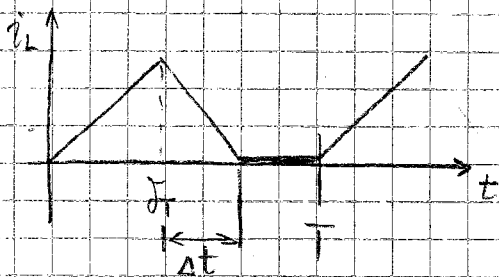


$$\begin{aligned} U_1 &= 25V \\ L &= 300 \mu H \\ R &= 2 \Omega \\ f &= 1 \text{ kHz} \\ \delta &= 0,2 \end{aligned}$$

- trgon tok
- konstantni napetosti - C je zelo velik
- ustaljeno stanje

$$\delta = \frac{T_{\text{on}}}{T}$$

$$U_2 = ?$$



$$U_1 - U_2 = L \frac{\Delta I}{T_1}$$

$$T_1 = 0,2 \cdot T^{-1}$$

$$I = \frac{U_1 - U_2}{L} \cdot \delta \cdot T$$

$$\Delta t = \frac{L \cdot \hat{I}}{U_2} = \frac{L (U_1 - U_2) \delta \cdot T}{U_2} = \left( \frac{U_1}{U_2} - 1 \right) \delta T$$

$$\bar{I} = \frac{\hat{I} (T_{\text{on}} + \Delta T)}{2 \cdot T} = \frac{U_2}{R}$$

$$U_2 = \frac{R \cdot (U_1 - U_2) \cdot \delta \cdot T (T_{\text{on}} + \Delta T)}{L \cdot T \cdot 2}$$

$$U_2 = \frac{2 (U_1 - U_2) \cdot \delta^2 \left( \frac{U_1}{U_2} - 1 \right) T}{2 \cdot L}$$

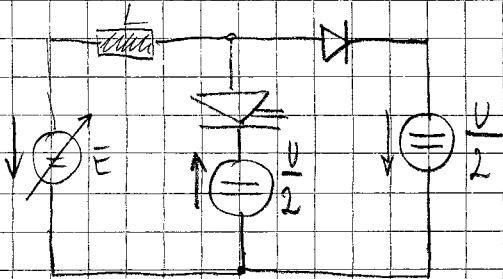
$$U_2 = \frac{R \delta^2 T}{2L} \cdot \left( \frac{U_1^2}{U_2} - U_1 - U_1 + U_2 \right) \quad // U_2$$

$$U_2^2 = \frac{R \delta^2 T}{2L} (U_1^2 - 2U_1 + U_2^2)$$

$$U_2^2 + U_2 \left( \frac{\delta^2 U_1 \cdot R \cdot T}{2L} \right) - \frac{U_1^2 \delta^2 RT}{2L} = 0 \quad // \text{ po krajšem premisleku}$$

$$U_2 = \frac{-3,33 \pm \sqrt{11 + 333,3}}{2} \rightarrow \frac{-3,33 \pm 18,5}{2}; \quad U_2 = 7,61V$$

smiselno rešitev je tista, ki nam da pozitivni rezultat



• pretvornik navzgor, sprememba smeri napetosti

- priključanje ( $T_g$ ):
- zaprt ( $T_o$ ):

$$e = e_{min} = -\frac{U}{2}$$

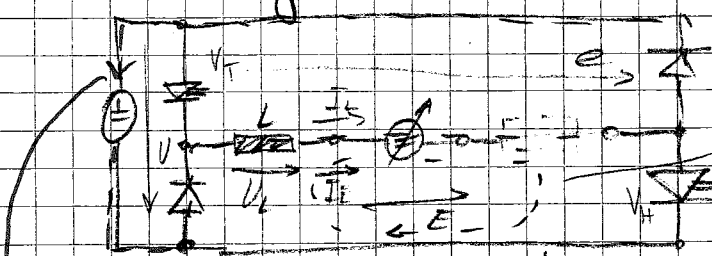
$$e = e_{max} = \frac{U}{2}$$

• možno je obratovanje v štirih kvadrantih

$U_{wh} = e \in \left\{ -\frac{U}{2}; \frac{U}{2} \right\} \rightarrow$  za  $\frac{U}{2}$  se premakne tudi pod absciso  $\rightarrow$  pokrijemo 1m<sup>4</sup>, kv.

• Enak močnik dobimo tudi brez mednjega odtupa (2 vira)  $\rightarrow$  en vir in 2x več stikal (bolj prilagodljivo za višje moči): asimetrični polmostic (11.19)

• ko sta sklenjeni obe stikali, teče tok skozi sp. krog



$\rightarrow$  (hratni izklop obeh tranzistorjev)

• v zap. stanju: na  $L$  se inducira  $U$ , skupaj z  $e$  je takor velika, da lahko tok teče skozi diodi in vir

•  $U_{ind}$  je precej visoka;  $\frac{di}{dt}$  je posledično tudi visoka  $\rightarrow$  pojavi rečemo: vračanje energije v vir.

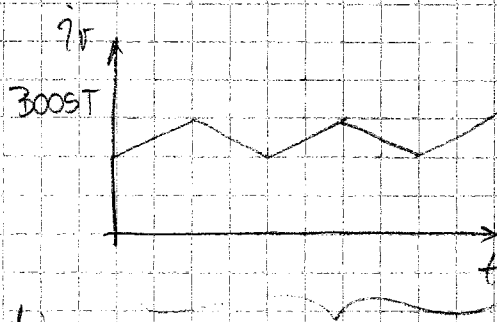
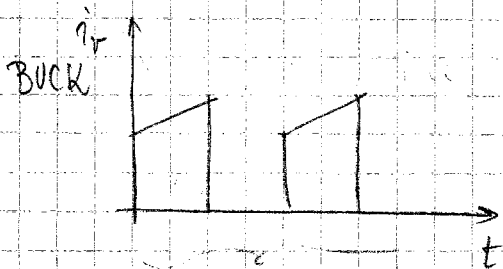
• izklopimo samo  $v_{T1}$ .  $v_{T2}$  pa prevaja? vzpostavi se prostotokni tokokrog skozi sp. diodo  $\rightarrow U_{ind} =$  nižja, ker nimamo vira.

$e = 0$

•  $\frac{di}{dt}$  je odvisna od  $U_{vira}$  in  $E \rightarrow$  pogonje tok

• za hitre spremembe uporabimo metodo izklopa obeh stikal

• izkušne so na stikalih, ob preklopih in na bremenih



Pojavijo se težave zaradi  
stabilnosti  $\frac{di}{dt} \rightarrow$   
prenapetosti; težave na  
elementu ob komutaciji

Oblike tok je bolj "prijetno" mreži -  
blizu konstantnega tokoval

$T_2$  Pretvornik ne more delovati brez sklenjene regulacijske zanke.

## ZAPORNI PRETVORNIK

21.5.2013

- na vh. je konstantni vir
  - izh. nap. je lahko višja ali nižja od V<sub>vh</sub>.
  - POSEBNOST: Vzh ima drugačno polariteto
  - v aktivnem delu prevaja tok preko stikala, dusilke in vira  $\rightarrow$  tok narazice;  $\frac{di}{dt}$  je odvisna od V<sub>vh</sub> in L
  - ko stikalo zapremo, tok ne kče več  $\rightarrow$  energija v dusilki potisne tok na drugi kraj  $\rightarrow$  preko dusilke, diode in izhoda
- $\underbrace{U_{ind}} = U_{breme}$

tako velika (po iznosu), da kče tok.

- tok je omejen z zmogljivostjo stikal
- negativna polarizacija Vzh

- pretok energije : aktivno delovanje : povezave med napajalnim sistemom in dusilko

zaprti stanje : napajanje je ločeno; dusilke se prazni skozi breme

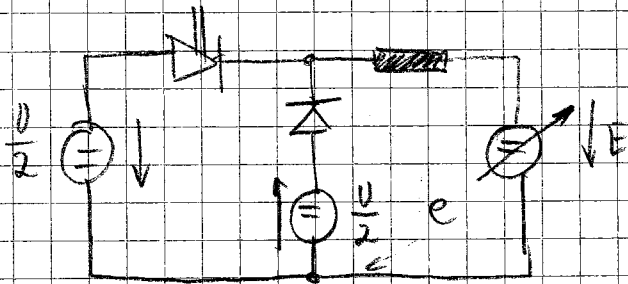
- vir in breme nista povezana v nobenem delu periode!

- 1. del periode : polnjenje L iz breme
- 2. del periode : praznjenje L skozi breme

- vse energije sistema, ki jo želimo prenesti k bremenu se akumulira v dusilki

# KASKADNA VEŽAVA BUCK - BOOST

- ko sta vklopljena tr. 1 in tr. 2, se krog zaključuje med virom, tr. 1, L in tr. 2
- ko sta obe izklopljene, se energija prenese na breme
- če želimo, da je  $U_{\text{ish}}$  višja od  $U_{\text{vh}}$

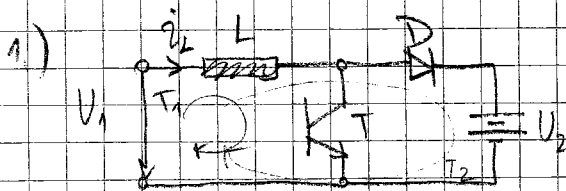


- ko prevaja ( $T_{\text{g}}$ ): tokovna veja:  $i = i_{\text{max}} = \frac{U}{Z}$
- zaprt ( $T_{\text{o}}$ ): tok. veja:  $i = i_{\text{min}} = -\frac{U}{Z}$

Pri tr. 1 in 2 navzgor  $\Delta$  sprememba smeri napetosti

- Doslej smo lahko delovali samo v enem kvadrantu  $\rightarrow$  pretokanje energije od vira k bremenu
- Sedaj pa deluje tudi v k. kv.  $\rightarrow$  tudi z negativno napetostjo

## Z primerom za SPROSTITEV!

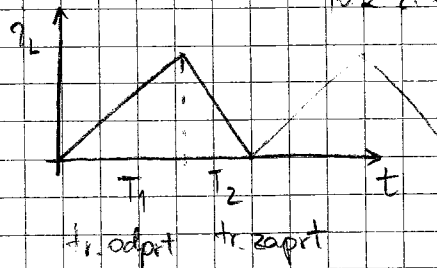


$$U_1 = 5V$$

$$U_2 = 12V$$

$$L = 50 \text{ mH}$$

$$\Delta I_L = 5A$$



tok želimo imeti na meji tiganja

$f$

$$U_1 = L \frac{\Delta I_L}{T_1} \rightarrow T_1 = L \frac{\Delta I_L}{U_1} = 50 \cdot 10^{-3} \frac{Vs}{A} \cdot \frac{5A}{5V} = 50 \text{ ms}$$

$$\frac{\Delta I_L}{T_1} = 100 \text{ A/s}$$

$$U_2 - U_1 - U_L = 0$$

$$L \frac{\Delta I_L}{T_2} = U_2 - U_1 \rightarrow T_2 = L \frac{\Delta I_L}{U_2 - U_1} = 50 \cdot 10^{-3} \frac{Vs}{A} \cdot \frac{5A}{7V}$$

$$= \frac{250}{7} \text{ ms} = 35,7 \text{ ms}$$

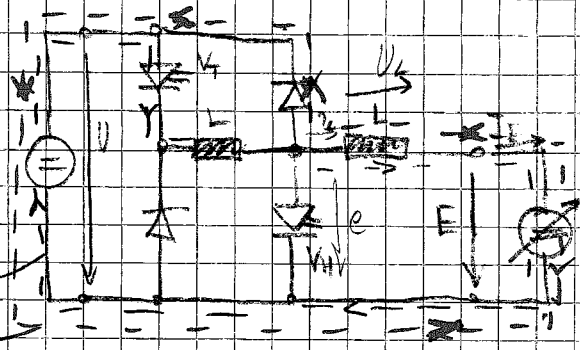
$$T = T_1 + T_2 = 85,7 \text{ ms}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{85,7 \text{ ms}} = 11,67 \text{ Hz}$$

- v prostem toku ni pretoka energije v vir / mrežo; omejeni samo na en kvadrant (1.)

## DVOKVADRANTNI NASTAVLJALNIK :

- sinteza Buck & Boost
- deluje lahko samo eden na enkrat

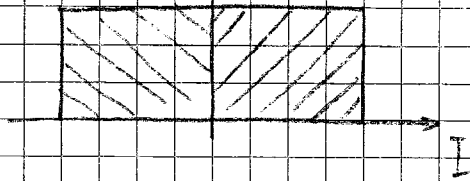


- obratovanje v 1. kv.: vklop  $V_1$

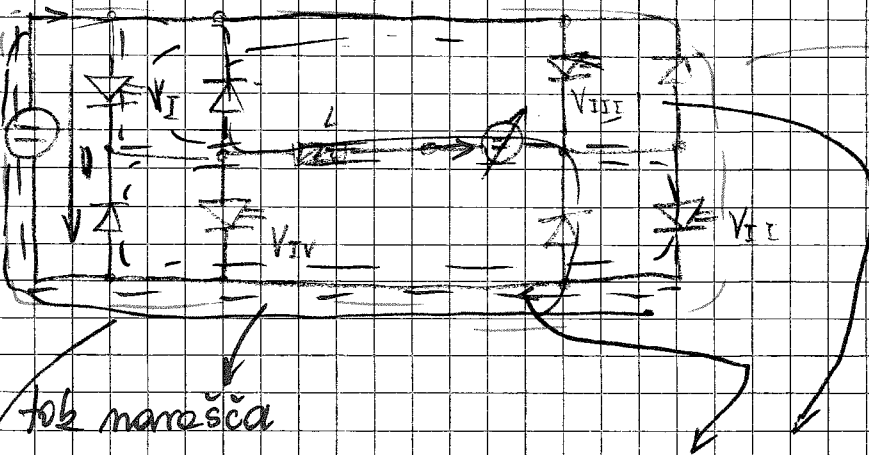
- obratovanje v 2. kv.: izklop  $T_2$

dvostanski pretok energije → obratovanje v 1. in 2. kv

- $U$  ima enak predznak,  $I$  pa spremeni



## ŠTIRIKVADRANTNI NASTAVLJALNIK



→ vračanje energije v vir

tok narasča

- če izklopimo eno od stikal  $V_1 / V_{II}$  → zmanjšamo tok

- za spremembo smeri toka

prožimo stikali  $V_{III} / V_{IV}$

→ hkratni izklop  $V_{III} / V_{IV}$

- z vključitvijo pr. teka valovitost naraste

- Ko motor zavira, deluje usmerniškas → vrača energijo v vir

- napajanje 3-f stroja:

- 1-f vezje razširimo za 3x. 3x več stikal
- vsako fazo se neodvisno prikljubi na mostič
- s krmiljenjem zagotovimo fazi zamik, da vzbudimo mag. polje
- začetek in konec navitij je dostopno → obratovanje med fazami je neodvisno (ob okvari enega mostiča delujeta 2 naprej)
- robustna zasnova → veliko stikal
- če nimamo dostopa do navitij, naredimo vezje s temi vezji in zvezdiščem.
- $\sum U$  in  $\sum I = 0$  → pogoji, ki ga izpolnimo s krmilnim vezjem (simetrija)
- če s krm. vezjem vnašamo nesimetrične razmere → magnetenje ni simetrično, motor je slabši (ni konst.), pride do pregrevanja

1) modulatorjski principi (PSM) - najbolj razširjen princip.

- v nekaterih primerih ni potrebno dodati dodatne L za dušenje toka, zadostuje že L stroja
- prosti tok → tok skozi breme upada
- $U = \max$ ;  $U = 0$  → v praksi teh ekstremov ne moremo doseči
- ko se bližamo 100% izkrmiljenju → izklop in takojšnji vklop (neprijazno do stikala)
- stikalo sploh ne preide v zap. stanje, ko že mora preklapiti v aktivno ( $U$  in  $I$  se povečujeta hkrati → večanje izgub)
- Po navadi sta mejni izkrmiljenja nastavljeni na 95% in 5% → minimalna napetost pri delovanju

+ frekv. preklapljanja je konst. → perioda; lažje dimensionirati filter za višje harmonike

2) Dvopolozajna modulacija

- določimo valovitost
- $I_{max}$  → tranzistor izklopi,  $I_{min}$  → ponoven vklop
- frekvenca preklopa je odvisna od postavite širine pasu.
- frekvenca se spreminja

- nimamo kontrole med  $T_{min}$  in  $T_{max}$  vklopljenega stanja tranz.  
- princip je preprost  $\rightarrow$  uporaben za predvidljive razmere in bremen.

- vedno pride do odstopanj od nr. vrednosti pri ploščinah

- odstopanje omejimo z vzp. I-členom  $\rightarrow$  dobimo korigirano zeleno vrednost  $\rightarrow$  odpravimo poprešek

- princip ne funkcioniira brez povratne zanke

- Časovni diskretni Regulator

- na začetku vsake periode pogledamo stanje na izhodu  $\rightarrow$  če je dejanska vr. višje od zelene, stikalo izklopimo (za vsaj eno periodo)

- ni več stanja, ko izklopimo in nato takoj vklopimo stikalo: obstaja maksimalna frekvenca preklopa, možen je prekop z nižjo frekvenco

$\frac{1}{2}$  taktne frekvence

- manjše stikalne izgube od prejšnjega (histereznega) reg. ni preklapljanje, ostaja odprt  $\rightarrow$  boljše dinamika

- preklapljanje lahko le v diskretnih intervalih, ki so mnogokratnik osnovne periode

SLABOST:

- nižji harmoniki  $\rightarrow$  pretvornik je hrupen

- "Current mode" regulator

- pri napajalnikih za npr.: računalnik, mobilni, ...

- vsebujejo transformator (1. kvadrant)  $\rightarrow$  ne smemo izkoristiti več kot 50%

- v aktivnem stanju se jedro magneti, ob izklopu pa se mora razmagnetiti potrebuje vsaj toliko časa kolikor traja magnetenje; če ne pride do nasičenja.

- prekop se zgodi, ko dejanska vrednost doseže zeleno vrednost (preko primerjalnika)  $\rightarrow$  s tem se izognemo maraščanju toka nad zeleno vrednost; tokovna limita, ne moremo ustiči vezjav

- breme = del nih. kroga
- v praksi: indukcijski peči

- Z (RLC)

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

če se približujemo  $f_r$ , dobimo tokovno resonanco ( $I = \max$ )  
(oz.  $Z = \min$ )

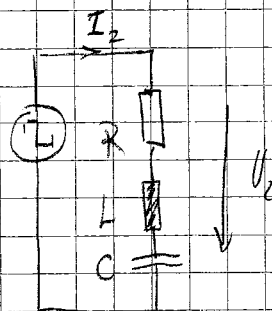
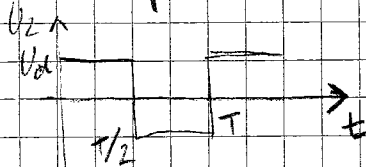
- ZVS - zero voltage switching
  - ZCS - zero current switching
- } preklon pri teh pogojih

→ moč pri preklonu = 0.

- moč reguliramo na več načinov:

- : spreminjanje napetosti, ki napaja breme
- : spreminjanje kot / proženja stikal

-  $U_2 =$  pravokotne oblike



$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

- 1. harm. komp.:

$$\hat{U}_{21} = \frac{4 \cdot U_d}{\pi}$$

$$\hat{U}_{23} = \frac{4 \cdot U_d}{3\pi}$$

$$\hat{U}_{25} = \frac{4 \cdot U_d}{5\pi}$$

PRIMER:

$$C = 50 \mu F$$

$$L = 1 mH$$

$$R = 12 \Omega$$

$$U_d = 400 V$$

$$I_{21}, I_{23}, I_{25}$$

predpostavimo  $Z = \emptyset$

→ ohmski del je zelo majhen

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{10^{-3} \frac{Vs}{A} \cdot 50 \cdot 10^{-6} \frac{As}{Vs}}} = 712 \text{ Hz}$$

$$\hat{U}_{21} = 509 V$$

$$f = f_0; Z = Z_0 = R \rightarrow I_{21} = \frac{U_{21}}{R} = \frac{360 V}{12 \frac{Vs}{A}} = 300 A$$

$I = 0$  ... fazi premik 1. harm. stopnje toka proti napetosti

$$U_{23} = 170V$$

$$U_{23} = 120V$$

$U_2 =$  vsota vseh primernih napetost na bremenu  
 $U_d =$  nap. vira  $\rightarrow$  pravokotni vir nap.

Kakšna impedanca žuti 3. harm. komp?

$$Z_3 = \sqrt{R^2 + \left(3\omega_0 L - \frac{1}{3\omega_0 C}\right)^2}$$

$$\omega_0 \rightarrow f_0$$

$$Z_3 = \sqrt{(1,2)^2 + \left(3 \cdot 2\pi \cdot 712 \text{ Hz} \cdot 10^{-3} \frac{Vs}{A} - \frac{1}{3 \cdot 2\pi \cdot 712 \text{ Hz} \cdot 50 \frac{As}{10^{-4}}}\right)^2} = 11,98 \Omega$$

$$Z_3 = \underline{12 \Omega}$$

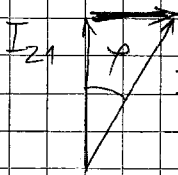
$$I_{23} = \frac{U_{23}}{Z_3} = \frac{120V}{12 \Omega} = 10A$$

$$\varphi_3 = \arctan \left( \frac{3\omega_0 L - \frac{1}{3\omega_0 C}}{R} \right) = \underline{84^\circ}$$

$$I_{25} = 3,35A$$

$$\varphi_5 = 87,5^\circ$$

- Vsota vseh harm. komp. toka : pri amplitudi prevladuje osnovna komponenta
- Vsota faznih premikov :  $I_2$  zaostaja za nek kot  $\varphi$  za napetostje (induktivni karakter)



$$I_2 = I_{21} + I_{23} + I_{25} + \dots$$

- frekvenca proženja je v tem primeru nižje od  $f_0$ .