

Predmet: ENERGETSKA ELEKTRONIKA
Predmetni nastavnik: Dr Nándor Burány

5. semestar
Broj časova: 2+2

2. GLAVA

OSNOVNI PRETVARAČI - PRINCIPI RADA

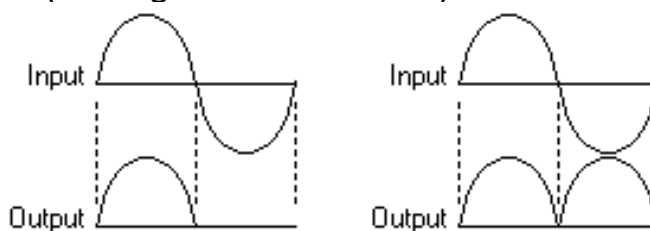
Bavićemo se sledećim temama:

- 2.1 Usmerači (ispravljači) (AC→DC)
- 2.2 Jednosmerni pretvarači (DC→DC)
- 2.3 Invertori (DC→AC)
- 2.4 Pretvarači naizmeničnog napona (AC→AC)
- 2.5 Rezonantni pretvarači

2

2.1 USMERAČI (ISPRAVLJAČI)

- U većini slučajeva električnu energiju uzimamo iz naizmenične mreže (gradske ili industrijske).
- Ako napajamo jednosmerne potrošače, potrebno je ispraviti napon (struju).
- Usmerač se može priključiti direktno na mrežu ili preko mrežnog transformatora (danas se sve manje primenjuje).
- Korišćene komponente: **diode** (kod običnih usmerača), **tiristori** (kod regulisanih usmerača).



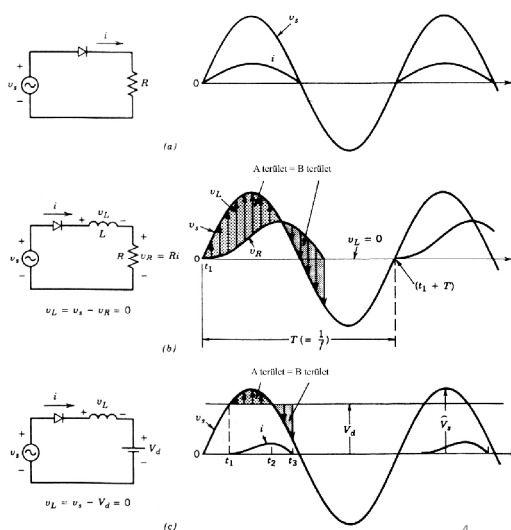
<https://en.wikipedia.org/wiki/Rectifier>

3

2.1.1.a OBIČNI USMERAČI - JEDNOFAZNE POLUTALASNE VARIJANTE

- Diodna kola napajana iz jedne faze.
- Retko se koriste pošto obično se ne preporučuje opterećenje izvora jednosmernom strujom.
- Ponašanje pri različitim opterećenjima: R, RL, LV.
- Važne jednakosti:

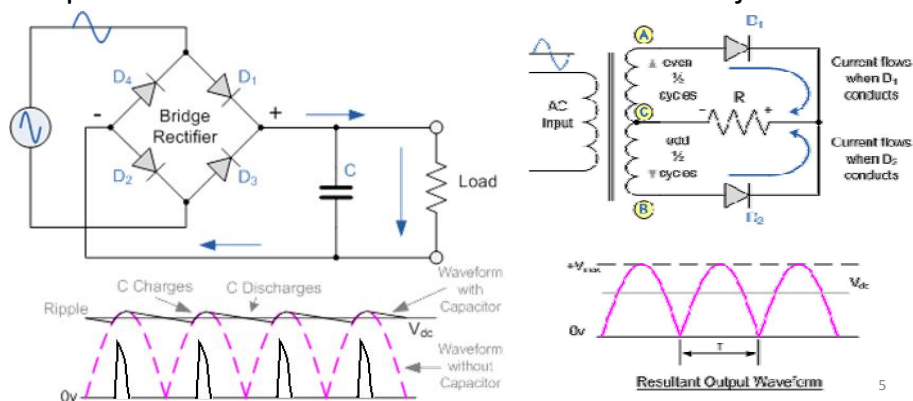
$$\int_0^T v_L dt = 0 \quad v_L = L \frac{di_L(t)}{dt}$$



4

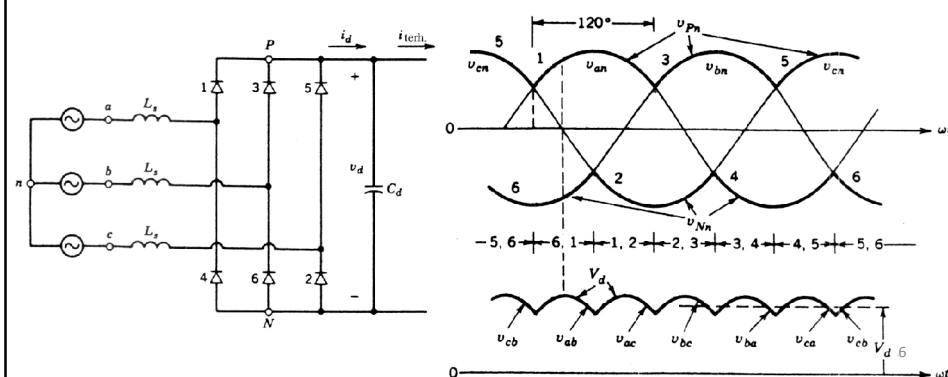
2.1.1.b OBIČNI USMERAČI - JEDNOFAZNE PUNOTALASNE VARIJANTE

- Uglavnom se koristi mostna sprega sa četiri diode (Graetz-ov spoj).
- Druga mogućnost: transformator sa srednjim izvodom i dve diode.
- Kapacitivni filter na izlazu - izobličava ulaznu struju.



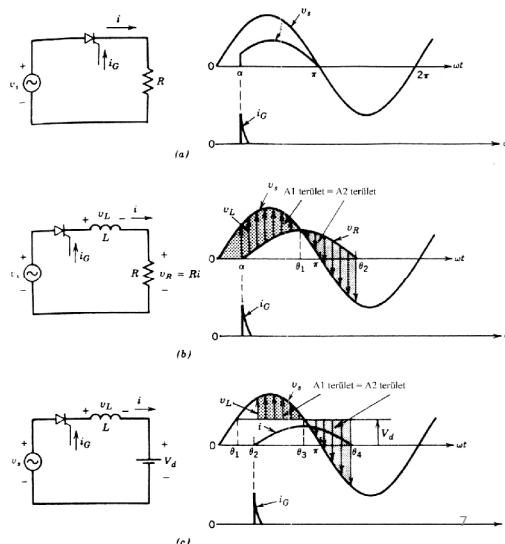
2.1.1.c OBIČNI USMERAČI - TROFAZNE PUNOTALASNE VARIJANTE

- Kod većih snaga treba koristiti trofazni usmerač (ravnomerno opterećenje sve tri faze).
- Talasnost izlaznog napona je mala u odnosu na jednofazne usmerače, čak i bez filtracije.



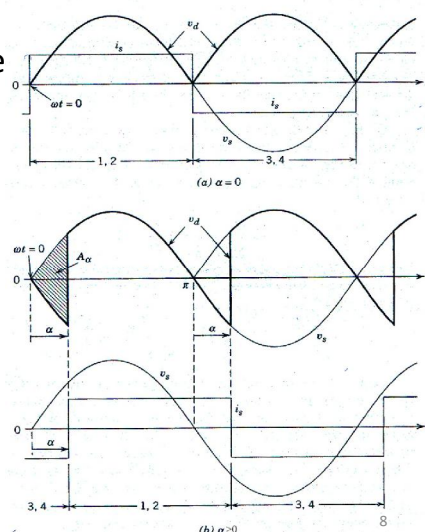
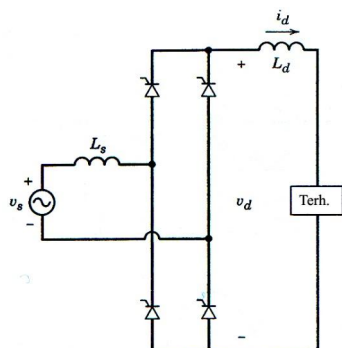
2.1.2.a REGULISANI USMERAČI - JEDNOFAZNE POLUTALASNE VARIJANTE

- Slična su odgovarajućim diodnim kolima, ali se koriste tiristori (2.1.1).
- Zahvaljujući tiristorima može se regulisati jednosmerna komponenta (srednja vrednost) izlaznog napona/struje.



2.1.2.b REGULISANI USMERAČI - JEDNOFAZNE PUNOTALASNE VARIJANTE

- Slične su odgovarajućim diodnim kolima (2.1.1).
- Zahvaljujući tiristorima može se regulisati jednosmerna komponenta izlaznog napona/struje.



2.1.2.c REGULISANI USMERAČI - ANALIZA JEDNOFAZNE PUNOTALASNE VARIJANTE

- Srednja vrednost izlaznog napona:

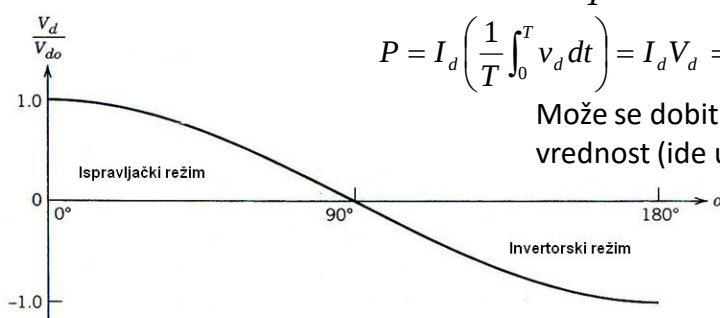
$$V_{d\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} V_s \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_s \cos \alpha \approx 0,9 V_s \cos \alpha$$

- Srednja snaga na izlazu:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T v_d i_d dt$$

$$P = I_d \left(\frac{1}{T} \int_0^T v_d dt \right) = I_d V_d = 0,9 V_s I_d \cos \alpha$$

Može se dobiti i negativna vrednost (ide unazad)!



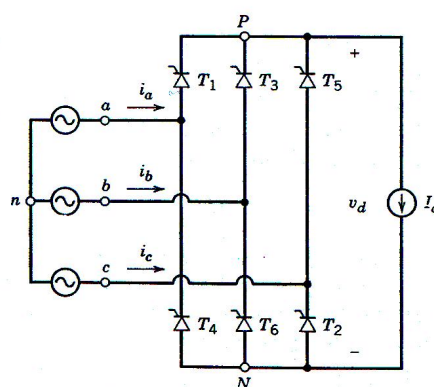
9

2.1.2.d REGULISANI USMERAČI - ANALIZA TROFAZNE PUNOTALASNE VARIJANTE

- Maksimalna srednja vrednost izlaznog napona se dobija kada se tiristori zamene diodama:

$$V_{do} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \approx 1,35 V_{LL}$$

- Ako zakasnimo uključanje tiristora u odnosu na prirodnu komutaciju, prvo dolazi do smanjenja srednje vrednosti izlaznog napona, zatim napon postaje negativan:
- Izlazna snaga se ponaša na sličan način (reguliše se uglom paljenja tiristora i može da menja smer):

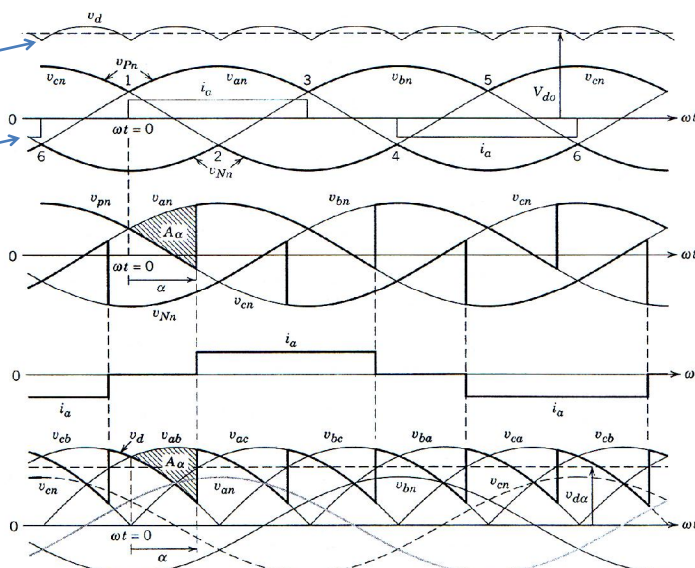


$$V_{d\alpha} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos \alpha \approx 1,35 V_{LL} \cos \alpha$$

$$P = V_{d\alpha} I_d \approx 1,35 V_{LL} I_d \cos \alpha$$

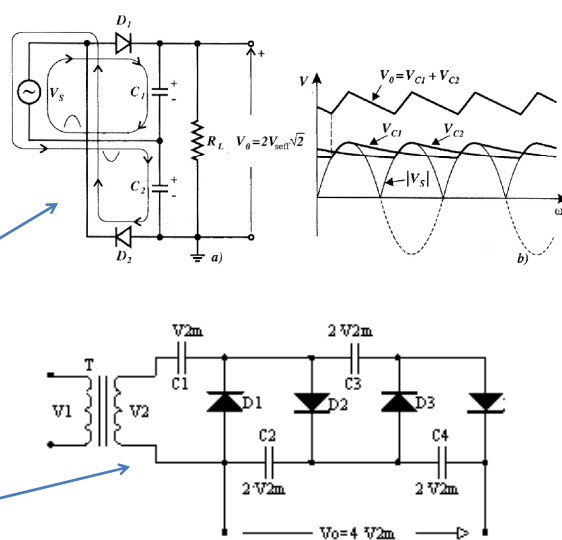
2.1.2.e REGULISANI USMERAČI - VREMENSKI DIJAGRAMI ZA TROFAZNU PUNOTALASNU VARIJANTU

- Izlazni (usmereni) napon u slučaju diodnog usmerača:
- Ulazni trofazni naponi:
- Prikazivanje efekta kašnjenja paljenja tiristora (fazna regulacija) na faznim naponima:
- Ulazna struja jedne faze:
- Prikazivanje uticaja fazne regulacije:



2.1.3 KOLA ZA UDVOSTRUČIVANJE I UMNOŽAVANJE NAPONA

- Udvostručivanje se često koristi kada želimo napajati uređaj projektovan na 230V na 110V. Danas za to postoji i drugo rešenje: podizanje napona pomoću PFC-a (tačka 5.4.1).
- Umnožavači služe za dobijanje velikog napona (i male struje).



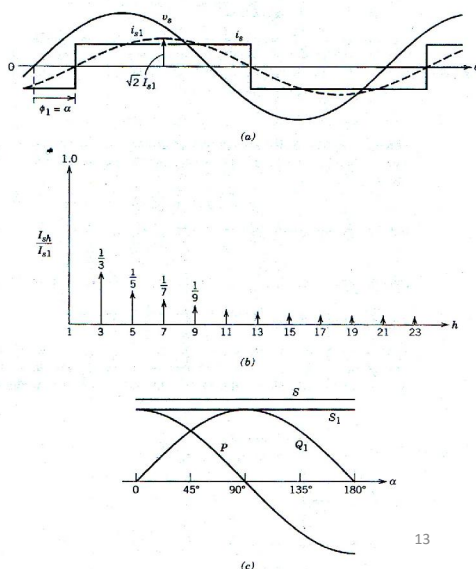
12

2.1.4.a KARAKTERISTIKE USMERAČA SA STRANE IZVORA - JEDNOFAZNA VARIJANTA

- Ulazni napon je redovno sinusnog oblika ali ulazna struja niti je sinusna, niti je u fazi sa ulaznim naponom (kasni).

$$I_{s1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d \approx 0,9 I_d$$

$$\%THD = 100 \times \frac{\sqrt{I_s^2 - I_{s1}^2}}{I_{s1}} = 48,43\%$$

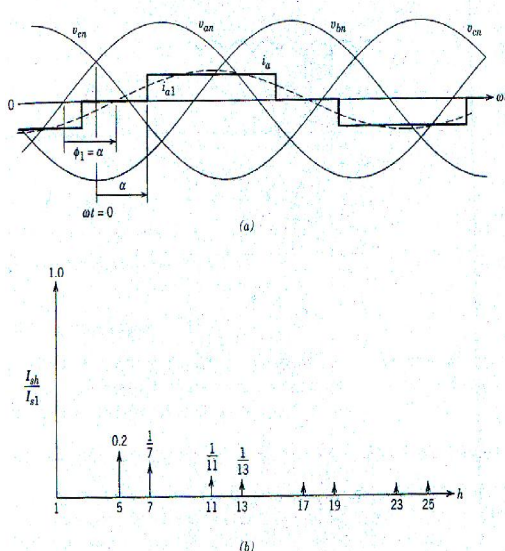


2.1.4.b KARAKTERISTIKE USMERAČA SA STRANE IZVORA - TROFAZNA VARIJANTA

- Fazne struje su i u ovom slučaju pravougaonog oblika i kasne u odnosu na ulazni napon ali imaju i pauzu.

$$I_{s1} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \approx 0,78 I_d$$

$$THD = 31,08\%$$



2.2 PRETVARAČI JEDNOSMERNOG NAPONA

- Iz jednog **jednosmernog napona** proizvode **drugi**, manji ili veći **jednosmerni napon**.
- Obično se primenjuje i **regulacija**: time se kompenzuju uticaji promene ulaznog napona i struje potrošača na izlazni napon.
- **Izlazna snaga** je uvek nešto **manja** od ulazne snage - javljaju se gubici.
- Ipak se često uzima da su te dve snage jednake (dobra aproksimacija): $V_1 I_1 = V_2 I_2$, odnosno $V_1/V_2 = I_2/I_1$ (kao kod **idealnog transformatora**, ali ovi rade na jednosmerni napon).

<http://ecee.colorado.edu/ecen4517/materials/Encyc.pdf>

15

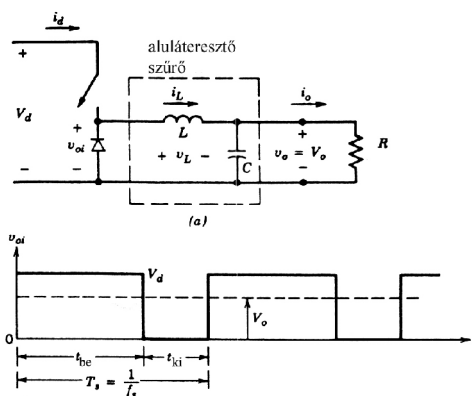
2.2.1 KLASIFIKACIJA JEDNOSMERNIH PRETVARAČA

- **Osnovni pretvarači:**
 - pretvarač za smanjivanje napona (*buck* pretvarač),
 - pretvarač za povećanje napona (*boost* pretvarač).
- **Izvedeni pretvarači:**
 - pretvarač za smanjivanje-povećanje napona (*buck-boost* pretvarač),
 - Ćukov pretvarač,
 - polumostni i mostni pretvarač.
- **Pretvarači dopunjeni sa transformatorom:** u sve navedene pretvarače može se povezati transformator. Zahvaljujući transformatoru napon i struja se mogu menjati u proizvoljnom odnosu, iz jednog pretvarača možemo formirati više izlaza i može se ukinuti galvanska sprega ulaza sa izlazom (izlazom).

16

2.2.2 PRETVARAČ ZA SMANJIVANJE NAPONA (BUCK PRETVARAČ) - OSNOVNI POJMOVI

- $V_o < V_i$.
- Ulazni napon se prekida tranzistorskim prekidačem, zatim se filtrira LC filtrom (peglanje).
- Pored prekidača potrebna je i dioda jer struja kalema neće stati kada se isključi tranzistor.



https://en.wikipedia.org/wiki/Buck_converter

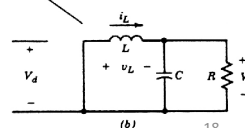
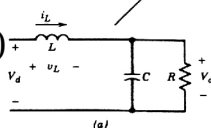
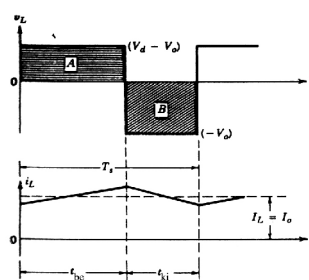
17

2.2.2.1 ANALIZA PRETVARAČA ZA SMANJIVANJE NAPONA (BUCK PRETVARAČ) PRI KONTINUALNOJ STRUJI PRIGUŠNICE

- Vremenski dijagrami napona i struje prigušnice.
- Ekvivalentne šeme:
 - pri **uključenom** prekidaču: $v_L = V_d - V_o$
 - pri **isključenom** prekidaču: $v_L = -V_o$
- **Proračun** izlaznog napona ($\int v_L dt = 0$):

$$(V_d - V_o)t_{be} = V_o(T_s - t_{be})$$

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{t_{be}}{T_s} = D; \quad \frac{I_o}{I_d} = \frac{1}{D}$$



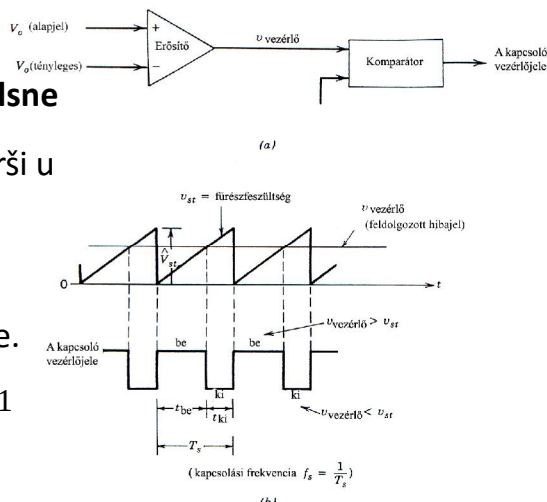
18

2.2.2.2 PRETVARAČ ZA SMANJIVANJE NAPONA - OBJAŠNJENJE IMPULSNO-ŠIRINSKE MODULACIJA

- Upravljačke impulse prekidačkog tranzistora dobijamo pomoću **impulsne širinske modulacije**.
- Uključenje se redovno vrši u jednakim intervalima, a momenat isključenja se menja.
- Konstantna frekvencija, promenljivi faktor ispune.

$$D = \frac{t_{be}}{T_s} = \frac{v_{vezérlo}}{\hat{v}_{st}}, \quad 0 \leq D \leq 1$$

- Ima i drugih postupaka modulacije ali se oni retko koriste.



https://en.wikipedia.org/wiki/Buck_converter

19

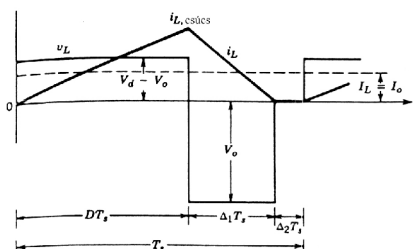
2.2.2.3 ANALIZA PRETVARAČA ZA SMANJIVANJE NAPONA PRI DISKONTINUALNOJ STRUJI PRIGUŠNICE

- Nakon isključenja tranzistora **struja prigušnice** teče još neko vreme, zatim **stoji na nuli** do sledećeg uključenja prekidača.
- To se dešava ili kada je pretvarač slabo opterećen ili kada je prigušnica nedovoljne induktivnosti.
- Izlazni napon je veći** nego u kontinualnom režimu:

$$(V_d - V_o)DT_s + (-V_o)\Delta_1 T_s = 0$$

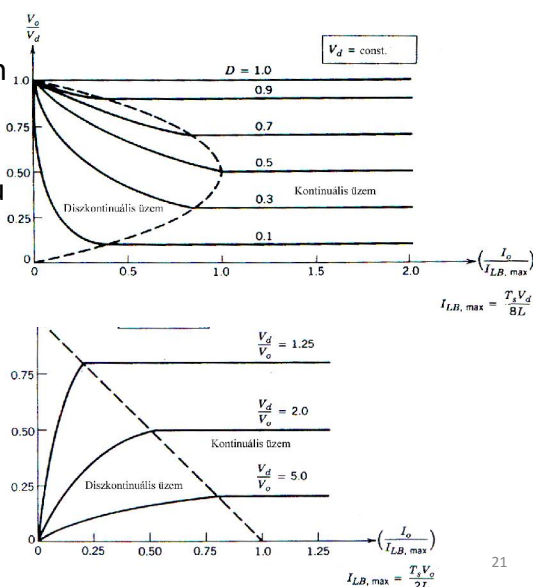
$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{D + \Delta_1}$$

$$D + \Delta_1 < 1$$



2.2.2.4 PRETVARAČ ZA SMANJIVANJE NAPONA - IZLAZNE I UPRAVLJAČKE KARAKTERISTIKE

- Pri kontinualnoj struji izlazni napon je srazmeran sa ulaznim naponom i sa faktorom ispunje.
- U diskontinualnom režimu dobija se veći napon.
- Radi dobijanja konstantnog izlaznog napona potrebno je smanjiti faktor ispunje.
- Regulacija napona je redovno automatska - postoji pojačavač greške.



21

2.2.2.5 PERETVARAČ ZA SMANJIVANJE NAPONA - PRORAČUN TALASNOSTI IZLAZNOG NAPONA

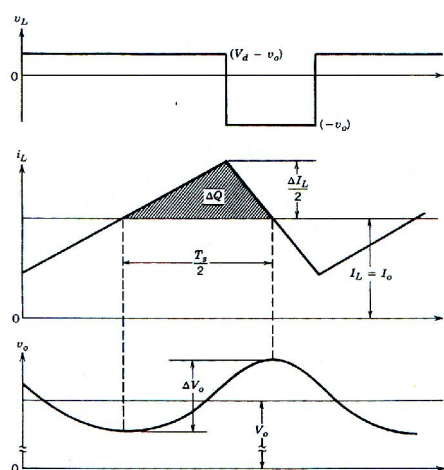
- Struja prigušnice je redovno trougaonog oblika.
- Kondenzator vrši integraljenje tog napona - dobijemo segmente parabole.
- Talasnost izlaznog napona merena od vrha do vrha ima vrednost:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q_c}{C} = \frac{1}{C} \frac{1}{2} \frac{\Delta I_L T_s}{2}$$

$$\Delta I_L = \frac{V_o}{L} (1-D) T_s$$

$$\Delta V_o = \frac{T_s V_o}{8C L} (1-D) T_s$$

$$\therefore \frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1}{8} \frac{T_s^2 (1-D)}{LC} = \frac{\pi^2}{2} (1-D) \left(\frac{f_c}{f_s} \right)^2$$

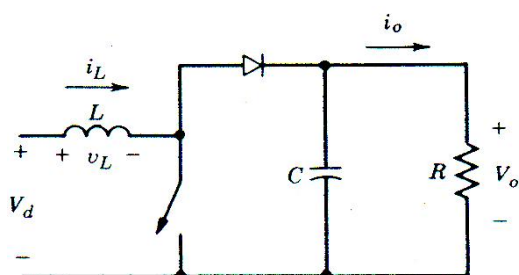


$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

22

2.2.3 PRETVARAČ ZA POVEĆANJE NAPONA (BOOST PRETVARAČ) - OSNOVNI POJMOVI

- Konstruisan je od istih komponenti kao *buck* pretvarač samo je drugačiji raspored.
- Ovaj tip pretvarača može da poveća ulazni napon nekoliko puta - ako nam je potrebno više, treba konstruisati pretvarač sa transformatorom.



https://en.wikipedia.org/wiki/Boost_converter

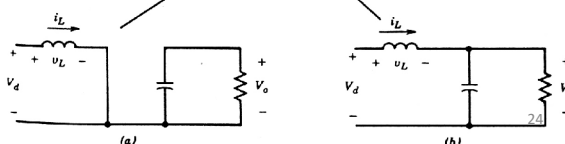
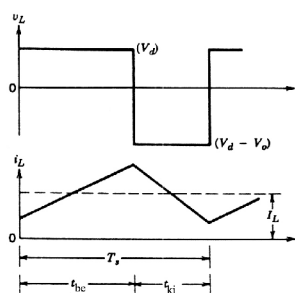
23

2.2.3.1 PRETVARAČ ZA POVEĆANJE NAPONA (BOOST PRETVARAČ) - PRORAČUN PRENOSNOG ODNOSA PRI KONTINUALNOJ STRUJI PRIGUŠNICE

- Polazimo od oblika napona i struje prigušnice.
- Ekvivalentne šeme:
 - za slučaj **uključenog tranzistora** (a): $v_L = V_d$
 - pri **isključenom tranzistoru** (b): $v_L = V_d - V_o$
- Proračun **izlaznog napona** ($\int v_L dt = 0$):

$$V_d \cdot t_{be} + (V_d - V_o) t_{ki} = 0$$

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{1}{1-D}; \quad \frac{I_o}{I_d} = 1-D.$$

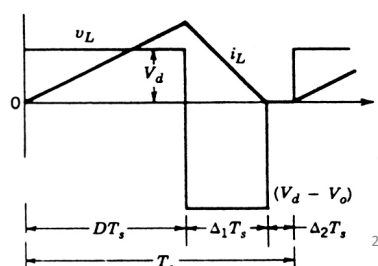


2.2.3.2 PRETVARAČ ZA POVEĆANJE NAPONA (BOOST PRETVARAČ) - PRORAČUN PRENOSNOG ODNOSA PRI DISKONTINUALNOJ STRUJI PRIGUŠNICE

- Nakon isključenja tranzistora **struja prigušnice** teče još neko vreme, zatim **stoji na nuli** do sledećeg uključenja prekidača.
- To se dešava ili kada je pretvarač slabo opterećen ili kada je prigušnica nedovoljne induktivnosti.
- Izlazni napon je veći** nego u kontinualnom režimu:

$$V_d DT_s + (V_d - V_o) \Delta_1 T_s = 0$$

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{\Delta_1 + D}{\Delta_1}$$



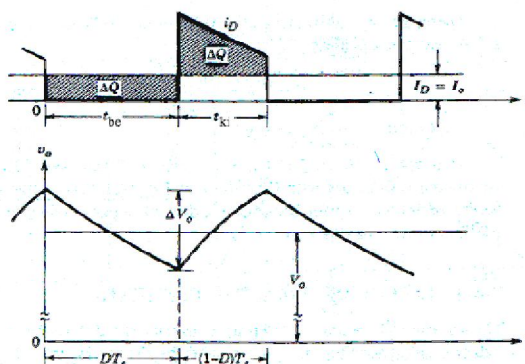
25

2.2.3.3 PRETVARAČ ZA POVEĆANJE NAPONA - PRORAČUN TALASNOSTI IZLAZNOG NAPONA

- Izlazni kondenzator se puni i prazni impulsnim strujama.
- Napon kondenzatora je srazmeran integralu struje kondenzatora: $v_c = \frac{1}{C} \int i_c dt$:

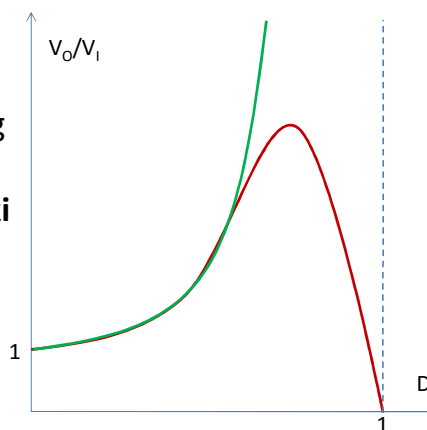
$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_o DT_s}{C} = \frac{V_o DT_s}{RC}$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{DT_s}{RC} = D \frac{T_s}{\tau}$$



2.2.3.2 PRETVARAČ ZA POVEĆANJE NAPONA - PONAŠANJE PRI VELIKIM FAKTORIMA ISPUNE

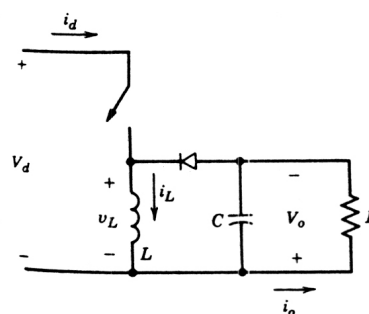
- U principu dobija se $V_o \rightarrow \infty$ ako $D \rightarrow 1$ (zeleni dijagram).
- Kod stvarnih pretvarača ponašanje je bitno drugačije kod velikih faktora ispunje zbog **gubitaka** (crveni dijagram).
- **Ne smeju se dozvoliti preveliki faktori ispunje**, jer dolazi do zaglavljivanja regulacije: povratna sprega se trudi da dalje povećava faktor ispunje, ali to ne doprinosi daljem povećanju napona.



27

2.2.4 PRETVARAČ ZA SMANJIVANJE/POVEĆANJE NAPONA (BUCK-BOOST PRETVARAČ) - OSNOVNI POJMOVI

- Konstruisan je od istih komponenti kao *buck* pretvarač samo je drugačiji raspored.
- Moguće je i smanjenje i povećanje napona.
- Ako je $D < 1/2$, $V_o < V_i$.
- Ako je $D > 1/2$, $V_o > V_i$.
- Obrne se polaritet napona!
- Polazeći od uslova $\int v_L dt = 0$: $V_d t_{be} - V_o (T_s - T_{be}) = 0$
- Odavde: $\frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{1-D}$



https://en.wikipedia.org/wiki/Buck%E2%80%93boost_converter

28

2.2.4.1 PRETVARAČ ZA SMANJIVANJE/POVEĆANJE NAPONA - DODATNE ANALIZE

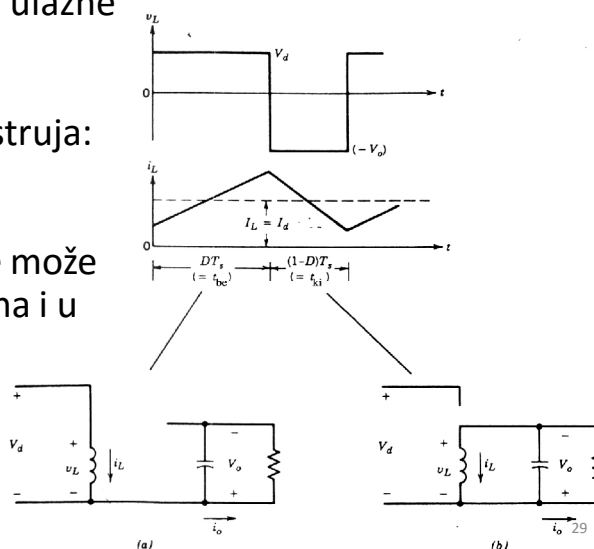
- Izjednačavanjem ulazne i izlazne snage:

$$P_d = P_o$$

dobija se odnos struja:

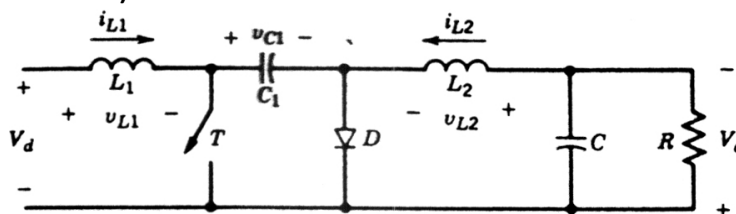
$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{1-D}{D}$$

- Struja prigušnice može biti diskontinualna i u ovom slučaju.



2.2.5 ĆUKOV PRETVARAČ - OSNOVNI POJMOVI

- Komplikovaniji od dosadašnja tri pretvarača.
- Opravdanje: nije ni ulazna ni izlazna struja impulsnog oblika - manje su smetnje.
- Može se konstruisati sa magnetno spregnutim prigušnicama. Pri određenom koeficijentu sprege jedna od struja može da bude skroz ravna (bez talasnosti).



https://en.wikipedia.org/wiki/%C4%86uk_converter

30

2.2.5.1 ĆUKOV PRETVARAČ - ANALIZA

- Uslov $\int v_L dt = 0$ primenimo na oba kalema:

$$V_d DT_s + (V_d - V_{c1})(1-D)T_s = 0$$

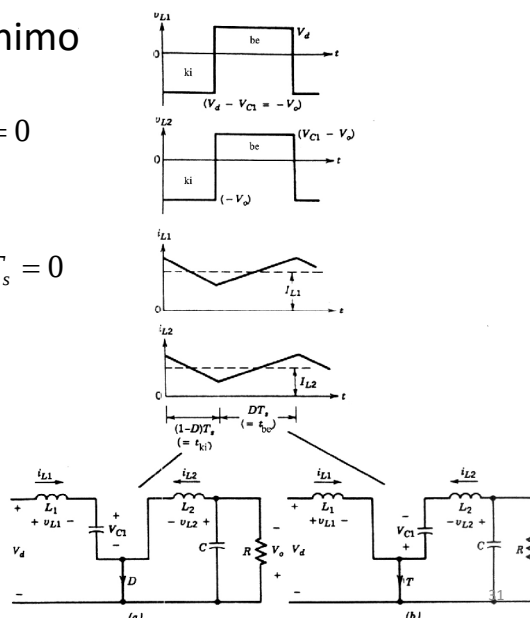
$$V_{c1} = \frac{1}{1-D} V_d$$

$$(V_{c1} - V_o)DT_s + (-V_o)(1-D)T_s = 0$$

$$V_{c1} = \frac{1}{D} V_o$$

- Odavde:

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{1-D}; \quad \frac{I_o}{I_d} = \frac{1-D}{D}$$

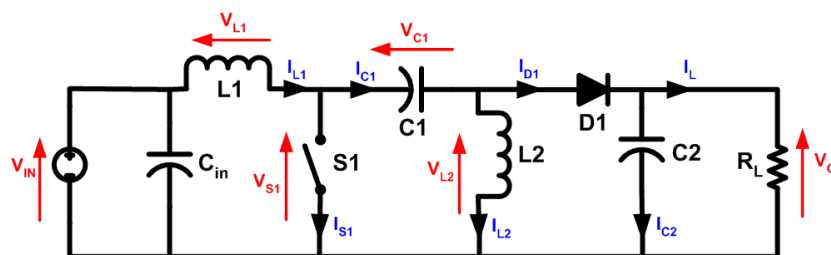


2.2.5.2 ĆUK-OV PRETVARAČ - DODATNE ANALIZE

- I ovaj pretvarač daje napon obrnutog polariteta kao što je bio slučaj kod buck-boost pretvarača.
- I ovde postoji kontinualni i diskontinualni režim.
- I pri radu sa Ćukovim pretvaračem ne sme se dozvoliti preveliki faktor ispune jer dolazi do zaglavljivanja regulacije, a snaga gubitaka može da dostigne veliku vrednost.
- I Ćukov pretvarač može da se konstruiše sa transformatorom - time se dobija mogućnost promene napona u velikom odnosu.

2.2.6 SEPIC PRETVARAČ

- SEPIC - *single ended primary inductor converter*
- Može i da povećava i da smanjuje napon.
- Naponski prenosni odnos je isti kao kod buck-boost ili kod Čukovog pretvarača.
- Ne obrće predznak napona.
- Sadrži isti broj komponenti kao Čukov pretvarač, ali je filtracija izlaznog napona slabija.



https://en.wikipedia.org/wiki/Single-ended_primary-inductor_converter

33

2.2.7. POLUMOSTNI PRETVARAČ - OSNOVI

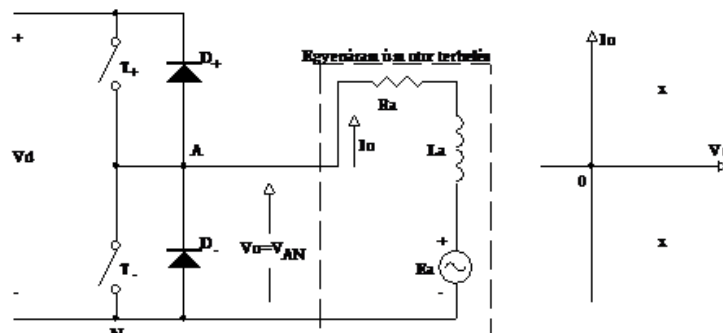
- Jedno te isto kolo, različite kontrole.
- Oblasti primene:
 - Pogon i kočenje jednosmernih motora u jednom smeru,
 - Sinhroni buck pretvarači (za smanjenje napona),
 - DC-AC pretvaranje kod jednofaznih invertora,
 - DC-AC pretvaranje kod prekidačkih izvora napajanja sa transformatorom.
- Uloga u prva tri slučaja: regulacija napona u opsegu $0 < V_O < V_d$ (kao kod buck pretvarača).
- Razlika u odnosu na buck pretvarač:
 - Izlazna struja može da teče u oba smera (dvokvadrantni režim, moguće je generatorsko kočenje),
 - Ne javlja se prekidni režim čak ni kod malih struja.

<http://www.ti.com/lit/an/slyt358/slyt358.pdf>

34

2.2.7.1 POLUMOSTNI PRETVARAČ– PRINCIP RADA

- Dva upravljiva prekidača (tranzistor).
- Potrebne su zamajne diode zbog eventualnih kontra struja kroz prekidače.
- Prekidači se uključuju naizmenično (uvek je uključen jedan i samo jedan prekidač – time je obezbeđeno da je napon u tački A uvek definisan i da ne zavisi od smera izlazne struje).
- U praksi je potrebno ostaviti malu pauzu između provođenja dva prekidača (radi izbegavanja kratkih spojeva).



35

2.2.7.2 POLUMOSTNI PRETVARAČ – PRORAČUN IZLAZNOG NAPONA

- Ako je uključen tranzistor T_+ (nezavisno od smera struje), važi:

$$v_{AN} = V_d$$

- Ako je uključen tranzistor T_- (nezavisno od smera struje), važi:

$$v_{AN} = 0$$

- Srednja vrednost izlaznog napona će biti:

$$V_o = V_{AN} = \frac{V_d t_{be} + 0 \cdot t_{ki}}{T_s} = V_d \cdot D_+$$

- D_+ je faktor ispunje definisan za gornji tranzistor. Pošto je $0 < D_+ < 1$, važi $0 < V_o < V_d$.

36

2.2.8 MOSTNI PRETVARAČ - OSNOVI

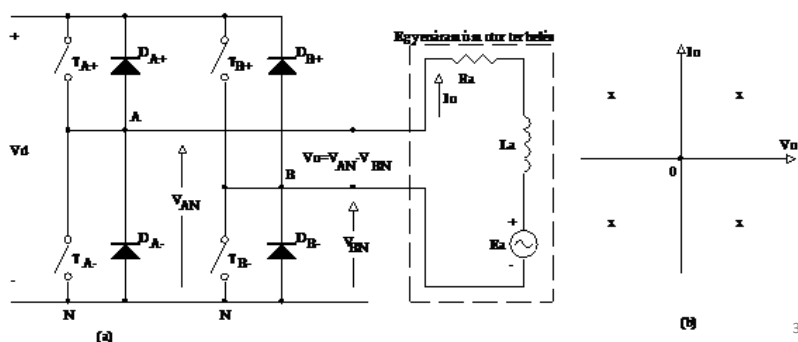
- Jedna te isto kolo, različite kontrole.
- Oblasti primene:
 - pogon i kočenje DC motora u oba smera (četvorokvadrantni rad),
 - DC-AC pretvaranje kod jednofaznih invertora,
 - DC-AC pretvaranje kod prekidačkih izvora napajanja sa transformatorom.
- Uloga u prva dva slučaja: regulacija napona u opsegu $-V_d < V_O < V_d$.
- Prekidačka napajanja sa transformatorom će se obraditi posebno.

http://www.euedia.tuiasi.ro/lab_ep/ep_files/Lab_no_20_c1.pdf

37

2.2.8.1 MOSTNI PRETVARAČ – PRINCIP RADA

- Četiri upravljiva prekidača (tranzistor).
- Potrebne su zamajne diode zbog eventualnih kontra struja kroz prekidače.
- Prekidači se načelno mogu uključivati u raznim kombinacijama ali se ne sme praviti kratak spoj i treba izbegavati kombinacije kod kojih izlazni napon nije jednoznačno definisan.
- Ako uključimo samo jedan ili nijedan prekidač, vrednost izlaznog napona će zavisiti od smera struje.
- U praksi su se odomačila dva modulaciona postupka: bipolarna i unipolarna.



38

2.2.8.2 MOSTNI PRETVARAČ – PRORAČUN IZLAZNOG NAPONA

- Most se može razdvojiti na dva polumosta. Napajanje je isto, izlazne tačke su A i B.
- I ovde važi za tranzistore istog polumosta, da može biti uključen jedan i samo jedan prekidač.
- Za jedan polumost proračun izlaznog napona ide kao kod polumostnog pretvarača.
- Ako je uključen tranzistor T_{A+} (nezavisno od smera struje) važi:

$$V_{AN} = V_d$$
- Ako je uključen tranzistor T_{A-} (nezavisno od smera struje) važi:

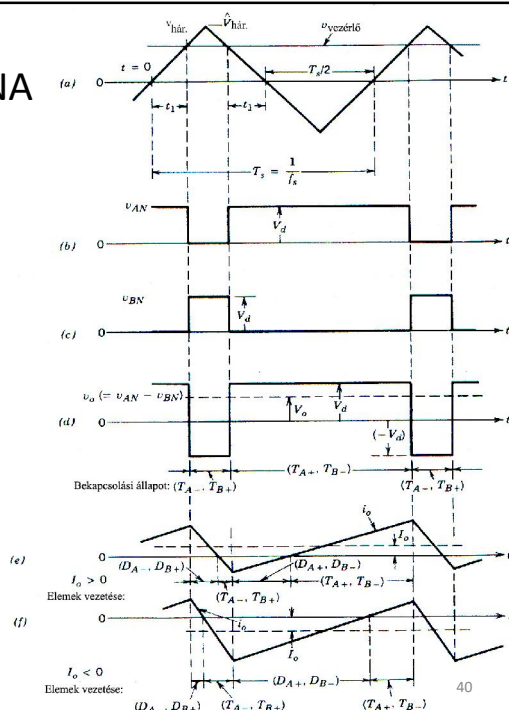
$$V_{AN} = 0$$
- Srednja vrednost izlaznog napona je:
$$V_{AN} = \frac{V_d t_{be} + 0 \cdot t_{ki}}{T_s} = V_d \cdot D_{A+}$$
- D_{A+} je faktor ispunje za gornji tranzistor. Pošto je $0 < D_{A+} < 1$, važi $0 < V_{AN} < V_d$.
- Za polumost B dobija se sličan rezultat: $V_{BN} = V_d \cdot D_{B+}$
- Rezultantni napon je razlika izlaznih napona dva polumosta:

$$V_o = V_{AN} - V_{BN}$$

39

2.2.8.3 MOSTNI PRETVARAČ – BIPOLARNA MODULACIJA

- Modulacija pojedinih polumostova u većini slučajeva nije međusobno nezavisna.
- Kod bipolarne modulacije dva polumosta rade u protivfazi – tranzistori se uvek uključuju dijagonalno: T_{A+}, T_{B-} ili T_{A-}, T_{B+} .



2.2.8.4 MOSTNI PRETVARAČ – BIPOLARNA MODULACIJA – JEDNAČINE

- Formula za trougaoni napon koji se koristi pri modulaciji:

$$v_{hár.} = \hat{V}_{hár.} \frac{t}{T_s / 4} \quad 0 < t < T_s / 4$$

- Proračun momenta uključenja: $t_1 = \frac{v_{vezérlő}}{\hat{V}_{hár.}} \frac{T_s}{4}$
- Vreme uključenosti dijagonale (T_{A+}, T_{B-}): $t_{be} = 2t_1 + \frac{T_s}{2}$

- Faktor ispune za T_{A+}, T_{B-} : $D_1 = \frac{t_{be}}{T_s} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_{vezérlő}}{\hat{V}_{hár.}} \right)$

- Faktor ispune za (T_{B+}, T_{A-}): $D_2 = 1 - D_1$

- Rezultantni izlazni napon je:

$$V_o = V_{AN} - V_{BN} = D_1 V_d - D_2 V_d = (2D_1 - 1)V_d, \quad 0 \leq D_1 \leq 1$$

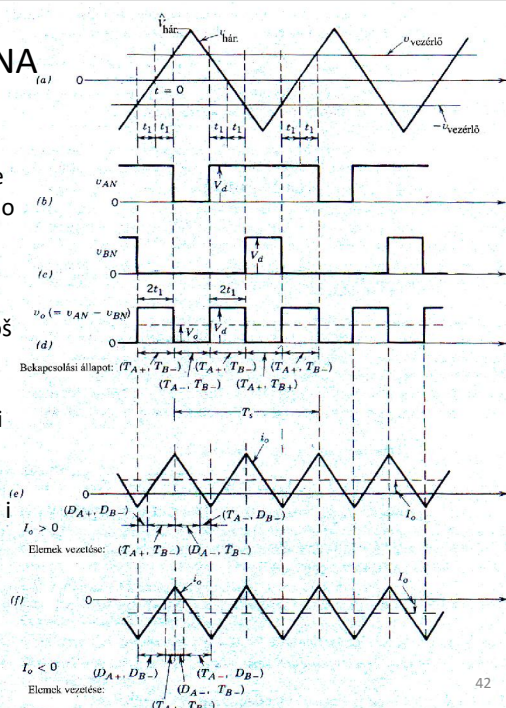
- Ili: $V_o = \frac{V_d}{\hat{V}_{hár.}} v_{vezérlő} = k v_{vezérlő}$

41

2.2.8.5 MOSTNI PRETVARAČ – UNIPOLARNA MODULACIJA

- Upravljanje sa prekidačima pojedinih polumostova ni ovde nije nezavisno, ali se ne vrši istovremeno uključivanje/isključivanje.
- Pored dijagonalnih kombinacija prekidača (T_{A+}, T_{B-} ili T_{A-}, T_{B+}) kod unipolarne modulacije koriste se još i kombinacije T_{A+}, T_{B+} és a T_{A-}, T_{B-} .
- U takvim situacijama izlazni napon V_{AB} je jednak nuli – to se isto koristi za regulaciju napona.
- Pozitivan izlazni napon se dobija usrednjavanjem pozitivnih impulsa i pauza, kod negativnog izlaznog napona usrednjavaju se negativni impulsi i pauze.

<http://www.freepatentsonline.com/5428522.pdf>



42

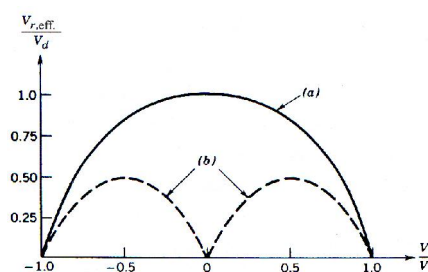
2.2.8.6 MOSTNI PRETVARAČ – UNIPOLARNA MODULACIJA – JEDNAČINE

- T_{A+} se uključuje ako: $V_{vezérló} > V_{hár.}$
- T_{B+} se uključuje ako: $-V_{vezérló} > V_{hár.}$
- Faktor ispune za T_{A+} : $D_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{vezérló}}{\hat{V}_{hár.}} + 1 \right)$
- Faktor ispune za T_{B+} : $D_2 = 1 - D_1$
- Rezultantni izlazni napon: $V_o = (2D_1 - 1)V_d = \frac{V_d}{\hat{V}_{hár.}} V_{vezérló}$
- U pogledu jednosmernog napona dobili smo istu vrednost kao kod bipolarne modulacije.
- Razlika se javlja u spektru izlaznog signala.

43

2.2.8.7 MOSTNI PRETVARAČ – UPOREĐENJE BIPOLARNE I UNIPOLARNE MODULACIJE

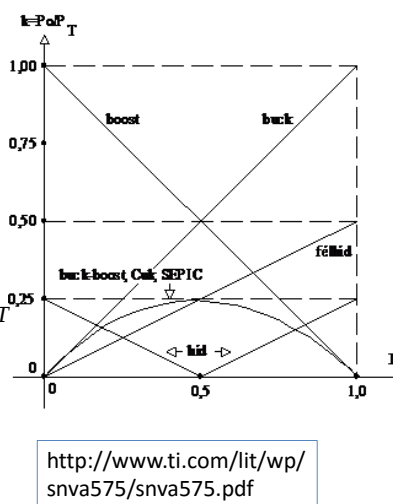
- Ako se od izlaznog napona mosta oduzme jednosmerna komponenta, dobija se **naizmenični signal**.
- Efektivna vrednost te naizmenične komponente se bitno razlikuje kod bipolarne modulacije (puna linija) i unipolarne modulacije (isprekidana linija)
- Lakša je filtracija napona dobijenog unipolarnom modulacijom.
- Nema razlike u prekidačkim gubicima tranzistora pošto je frekvencija ista u oba slučaja.



44

2.2.9 UPOREĐENJE DC-DC PRETVARAČA

- Kriterijumi: broj aktivnih i pasivnih komponenti, njihovi gabariti, stepen iskorišćenja pretvarača, nivo smetnji...
- Jedna dobra metoda - upoređenje stepena iskorišćenja prekidača: $k = \frac{P_O}{P_T}$.
- P_T je prividna snaga prekidača (nije snaga koja gubitaka niti snaga koja prolazi kroz prekidač!) $P_T = V_T I_T$
- Gde je V_T maksimalni napon koji se pojavljuje na prekidaču, a I_T je maks. struja.
- U stvarnosti retko imamo izbora!



45

2.2.10 POSTAVLJANJE TRANSFORMATORA U KOLA PRETVARAČA

- Kod dosadašnjih pretvarača (osnovni i izvedeni) postoji **galvanska sprega** između ulaza i izlaza (zajedničko uzemljenje).
- **Postavljanjem transformatora:**
 - može se **ukinuti galvanska sprega** (ostvarivanje izolovanog izlaza iz razloga bezbednosti),
 - može da se **poboljša stepen iskorišćenja tranzistora**,
 - iz jednog pretvarača se može dobiti **više izlaza** (za različite napone i struje).

46

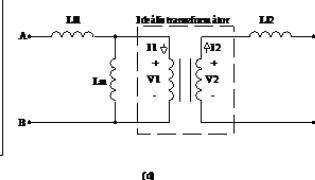
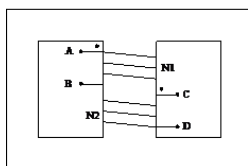
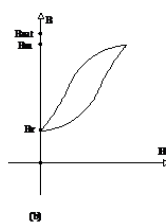
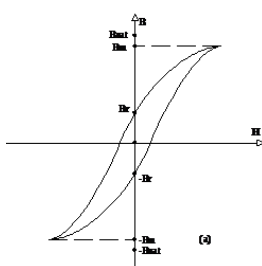
2.2.10.1 OSOBINE TRANSFORMATORA KOJI SE PRIMENUJU U PRETVARAČIMA

- Uglavnom se proračunavaju za visoke frekvencije: 20kHz-1MHz, jer se na taj način mogu smanjiti gabariti.
- Prenešenu snagu limitiraju dva faktora:
 - zasićenje (zbog nelinearnosti jezgra),
 - zagrevanje (usled gubitaka).
- Mehanizmi zagrevanja:
 - **Gubici u bakru:** potiču od otpornosti namotaja. Na visokim frekvencijama dolazi do povećanja tih gubitaka, jer se struja neravnomerno raspoređuje na preseku provodnika (skin effect, proximity effect).
 - **Gubici u jezgru:** usled histereze i vrtložnih struja. Kod ferita vrtložne struje nisu izražene.

47

2.2.10.2 KARAKTERIZACIJA TRANSFORMATORA KORIŠĆENIH U PRETVARAČIMA

- Magnetizacija može biti simetrična (a) i asimetrična (b) zavisno od načina pobuđivanja.
- Korišćenjem simetrične magnetizacije načelno se može preneti veća snaga, ali neki načini pobuđivanja ipak nisu simetrični.
- Namotaji se mogu postaviti na feromagnetno jezgro na različite načine (c), parametri transformatora a u velikoj meri zavise od rasporeda namotaja (d).



48

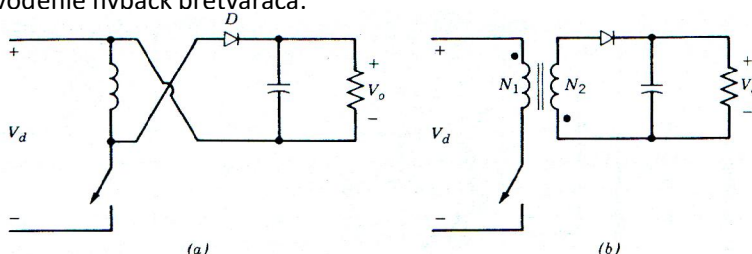
2.2.10.3 TIPOVI DC-DC PRETVARAČA SA TRANSFORMATOROM

- Varijante sa asimetričnom magnetizacijom:
 - flyback pretvarač - izvodi se iz buck-boost pretvarača.
 - forward pretvarač – izvodi se iz buck pretvarača.
- Varijante sa simetričnom magnetizacijom (svi su izvedeni iz buck pretvarača):
 - push-pull pretvarač,
 - polumostni pretvarač sa transformatorom,
 - mostni pretvarač sa transformatorom.

49

2.2.10.4a FLYBACK PRETVARAČ - UVOD

- Popularan je jer sadrži samo jednu induktivnu komponentu (jedno feritno jezfro) a ipak obezbeđuje izolovan izlaz.
- Transformator u stvari nije pravi transformator, više se može okarakterisati kao spregnuta prigušnica.
- Energija se prenosi tako što se prvo akumulira u jezgru preko primara, zatim se isprazni prema izlazu preko sekundara.
- Ovaj pretvarač se često koristi u prekidnom režimu.
- Kod drugih pretvarača sa transformatorom nagomilavanje energije u transformatoru je minimalno, a ovde je naglasak na tome.
- Izvođenje flyback pretvarača:

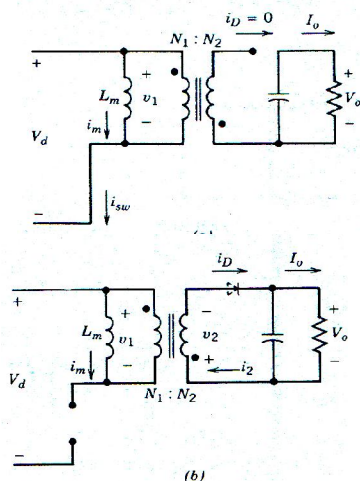


<http://ecee.colorado.edu/ecen4517/materials/flyback.pdf>

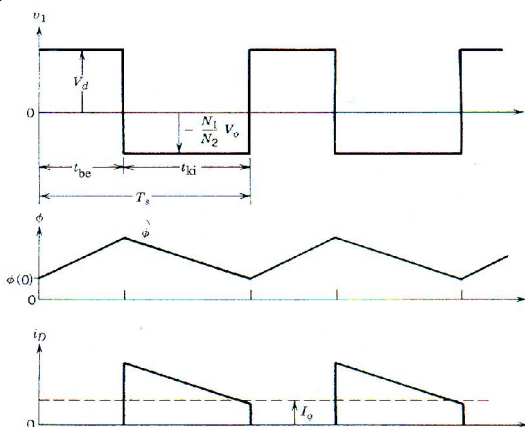
50

2.2.10.4b FLYBACK PRETVARAČ – MODEL I DIJAGRAMI

- Model pretvarača pri uključenom prekidaču (a) i pri isključenom prekidaču (b):



- Odgovarajući dijagrami:



51

2.2.10.4.c FLYBACK PRETVARAČ – JEDNAČINE

- Pratimo promene magnetnog fluksa u jezgru.
- Pri uključenom prekidaču: $\phi(t) = \phi(0) + \frac{V_d}{N_1} t$
- Na kraju uključenja: $\hat{\phi} = \phi(t_{be}) = \phi(0) + \frac{V_d}{N_1} t_{be}$
- Nakon isključenja prekidača u sekundaru se pokreće struja, a fluks počinje postepeno da pada: $\phi(t) = \hat{\phi} - \frac{V_o}{N_2} (t - t_{be})$
- Na kraju periode važi: $\phi(T_s) = \hat{\phi} - \frac{V_o}{N_2} (T_s - t_{be}) = \phi(0) + \frac{V_d}{N_1} t_{be} - \frac{V_o}{N_2} (T_s - t_{be})$
- Pretpostavljajući ustaljeno stanje: $\phi(T_s) = \phi(0)$
- Odatle se dobija naponski prenosni odnos: $\frac{V_o}{V_d} = \frac{N_2}{N_1} \frac{D}{1-D}$
- U prekidnom režimu (više se koristi kod flyback pretvarača) dobija se veći napon od ovoga.

52

2.2.10.4.d FLYBACK PRETVARAČ – DODATNE JEDNAČINE

- Primarna struja raste linearno za vreme uključenosti tranzistora:
- Vršna vrednost pre isključenja je:
- Struja magnećenje nakon isključenja :
- Struja preslikana u sekundar odnosno struja diode:
- Ako se zna željena srednja vrednost izlazne struje, možemo izračunati vršnu vrednost struje prekidača:
- Vršna vrednost napona prekidača je:
- Ovi podaci su potrebni za izbor prekidača.

$$i_m(t) = i_{kaps.}(t) = I_m(0) + \frac{V_d}{L_m} t$$

$$\hat{I}_m = \hat{I}_{kaps.} = I_m(0) + \frac{V_d}{L_m} t_{be}$$

$$i_m(t) = \hat{I}_m - \frac{V_o(N_1/N_2)}{L_m}(t - t_{be})$$

$$i_D(t) = \frac{N_1}{N_2} i_m(t) = \frac{N_1}{N_2} \left[\hat{I}_m - \frac{V_o(N_1/N_2)}{L_m}(t - t_{be}) \right]$$

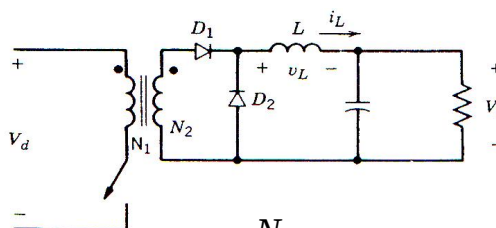
$$\hat{I}_m = \hat{I}_{kaps.} = \frac{N_2}{N_1} \frac{1}{1-D} I_o + \frac{N_1}{N_2} \frac{(1-D)T_s}{2L_m} V_o$$

$$v_{kaps.} = V_d + \frac{N_1}{N_2} V_o = \frac{V_d}{1-D}$$

53

2.2.10.5.a FORWARD PRETVARAČ – PRINCIP RADA

- Principijelna šema – liči na buck pretvarač samo se naponski impulsi ne dovode direktno na ulaz LC filtra, već preko jednog transformatora.
- Transformator se ne može koristiti tačno na ovaj način jer odlazi u zasićenje (kasnije će još biti reči o ovom).
- Napon kalema pri uključenom prekidaču je:
- Napon kalema pri isključenom prekidaču je:
- Korišćenjem uslova $\int v_L dt = 0$ dobija se formula za naponski prenosni odnos:



$$v_L = \frac{N_2}{N_1} V_d - V_o$$

$$v_L = -V_o$$

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{N_2}{N_1} D$$

[http://www.nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Power%20Electronics/PDF/L-23\(DP\)\(PE\)%20\(\(EE\)NPTEL\).pdf](http://www.nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Power%20Electronics/PDF/L-23(DP)(PE)%20((EE)NPTEL).pdf)

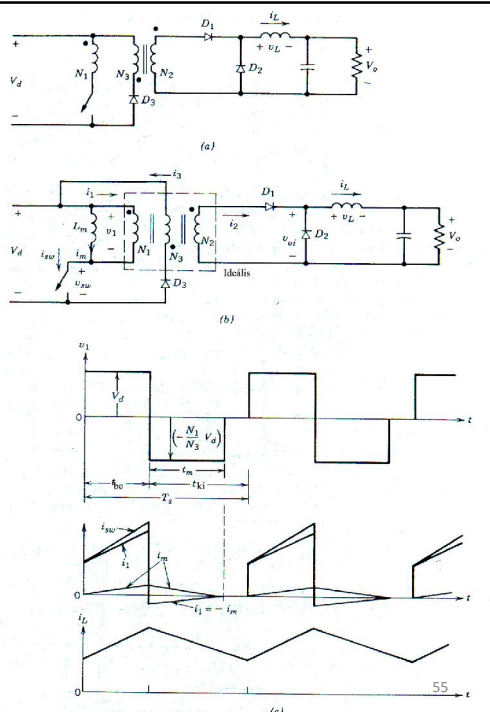
54

2.2.10.5.b FORWARD PRETVARAČ – DEMAGNETIZACIJA

- Potreban je jedan pomoćni namotaj preko kojeg se u svakoj periodi energija magnećenja transformatora vraća u izvor.
- Maksimalni faktor ispune impulsa za pobuđivanje tranzistora može biti:

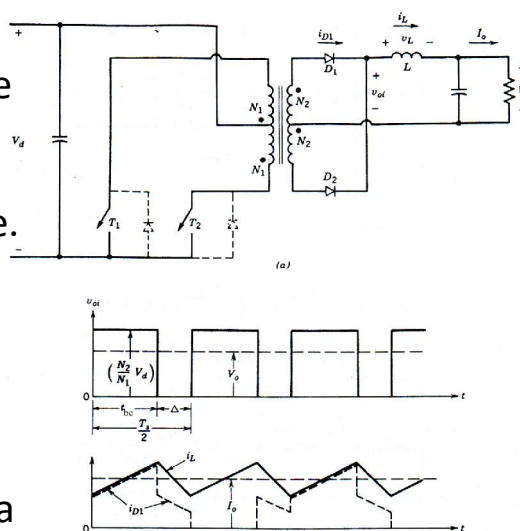
$$D_{\max} = \frac{1}{1 + N_3 / N_1}$$

- U većini slučajeva je $N_3 = N_1$, odavde: $D_{\max} = 0,5$.



2.2.10.6.a PUSH-PULL PRETVARAČ – PRINCIP RADA

- Pravougaoni impulsi za pobudu primara se dobijaju preko prikazane dvotranzistorske veze.
- Tranzistori se uključuju naizmenično, sa manjim ili većim pauzama između pojedinih uključivanja (zavisno od željenog faktora ispune).



http://powerelectronics.com/site-files/powerelectronics.com/files/archive/powerelectronics.com/power_semiconductors/Feature2_0309.pdf

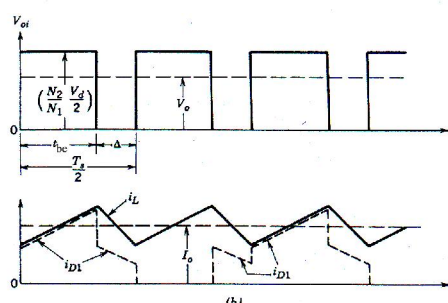
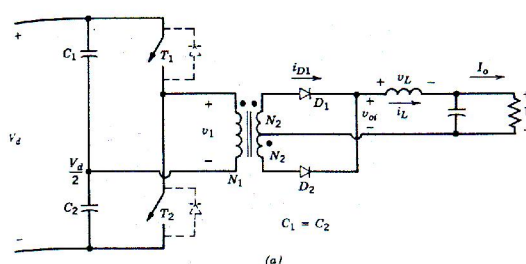
2.2.10.6.b PUSH-PULL PRETVARAČ – JEDNAČINE

- Napon kalema pri uključivanju jednog od tranzistora: $v_L = \frac{N_2}{N_1} V_d - V_o$
- Napon kalema u pauzama između provođenja pojedinih tranzistora: $v_L = -V_o$
- Korišćenjem uslova $\int v_L dt = 0$ dolazimo do izraza za naponski prenosni odnos:
- Važi $D_{max} = 0,5$.
- Push-pull pretvarač je sklon asimetriji (nastaje razlika između primarnih struja što dovodi do zasićenja transformatora).
- Maksimalni napon na prekidačkim tranzistorima je dvostruki ulazni napon.
- Pogodno je što su oba tranzistora vezana na masu.

57

2.2.10.7.a POLUMOSTNI PRETVARAČ SA TRANSFORMATOROM – PRINCIP RADA

- Pravougaoni impulsi za pobudu primara se dobijaju preko polumostne veze.
- Tranzistori se uključuju naizmenično, sa manjim ili većim pauzama između pojedinih uključivanja (zavisno od željenog faktora ispunje).



http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/application_note/CD00157315.pdf

2.2.10.7.b POLUMOSTNI PRETVARAČ SA TRANSFORMATOROM – JEDNAČINE

- Napon kalema pri uključivanju jednog od tranzistora :
- Napon kalema u pauzama između provođenja pojedinih tranzistora :
- Korišćenjem uslova $\int v_L dt = 0$ dolazimo do izraza za naponski prenosni odnos :
- I ovde važi $D_{\max} = 0,5$.
- Kod polumostnog pretvarača ne dolazi do asimetrije (eventualno za vreme tranzijenata) zahvaljujući kapacitivnom razdelniku na ulazu – ne može da se formira jednosmerna komponenta struje primara – ne dolazi do zasićenja.
- Prekidači su opterećeni samo jednostrukim ulaznim naponom, ali je struja dva puta veća nego kod push-pull pretvarača.

$$v_L = \frac{N_2}{N_1} \left(\frac{V_d}{2} \right) - V_o$$

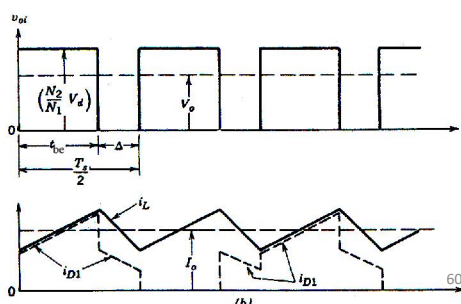
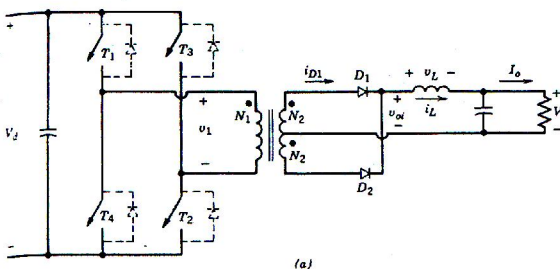
$$v_L = -V_o$$

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{N_2}{N_1} D$$

59

2.2.10.8.a MOSTNI PRETVARAČ SA TRANSFORMATOROM – PRINCIP RADA

- Pravougaoni impulsi za pobudu primara se dobijaju preko mostne veze.
- Tranzistori se uključuju u dijagonalnim parovima, sa manjim ili većim pauzama između pojedinih uključivanja (zavisno od željenog faktora ispunje).



<https://www.ece.nus.edu.sg/stfpage/akr/PSFB.pdf>

2.2.10.8.b MOSTNI PRETVARAČ SA TRANSFORMATOROM – JEDNAČINE

- Napon kalema pri uključenju jedne dijagonale:
- Napon kalema u pauzama kada nije uključena ni jedna ni druga dijagonala:
- Korišćenjem uslova $f_{vdt}=0$:
- I ovde važi $D_{max}=0,5$.
- Mostna sprega je sklona asimetriji – preporučuje se vezivanje kondenzatora na red sa primarem.
- Prekidači su opterećeni samo sa jednostrukim ulaznim naponom, struja je upola manja nego kod polumostnog pretvarača.
- Složeno rešenje, zato ga je racionalno primeniti samo pri većim snagama.

$$v_L = \frac{N_2}{N_1} V_d - V_o$$

$$v_L = -V_o$$

$$\frac{V_o}{V_d} = 2 \frac{N_2}{N_1} D$$

61

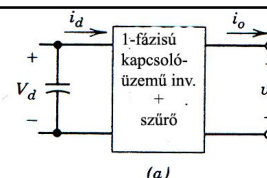
2.3. INVERTORI

- Iz jednosmernog napona (struje) formira se naizmenični napon (struja).
- Prema današnjem stanju tehnike može se proizvesti signal bilo koje amplitude, frekvencije i oblika korišćenjem odgovarajućeg invertora.
- **Izvor energije** na ulazu može biti neki originalni jednosmerni izvor (hemijski izvor, fotonaponski element, obrtna mašina), ali se potreban jednosmerni napon može proizvesti i iz raspoloživog naizmeničnog napona ispravljanjem.
- Mnoga različita rešenja. Mogući principi **podele**:
 - prema broju izlaznih faza (uglavnom jednofazni i trofazni invertori),
 - prema tipu ulaznog signala: strujni inverter, naponski inverter,
 - prema algoritmu upravljanja prekidačima: PWM invertori, pravougaoni invertori i invertori sa poništavanjem napona.

<http://www.site.uottawa.ca/~rhabash/ELG4139DCtoACConverters.pdf>

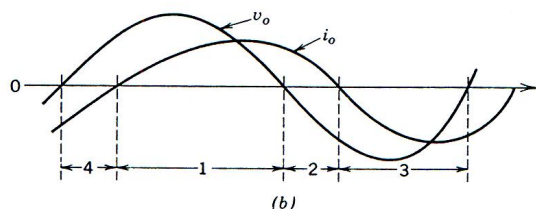
62

2.3.1. POLUMOSTNI INVERTOR

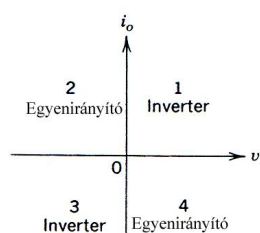


(a)

- Generalni zahtev prema svakom invertoru: četvorokvadrantni izlaz.
- Smerovi napona i struje se menjaju periodično, takođe i smer trenutne snage.
- Invertor treba da se konstruiše tako da bi mogao da napaja i (delimično) induktivno ili kapacitivno opterećenje.



(b)

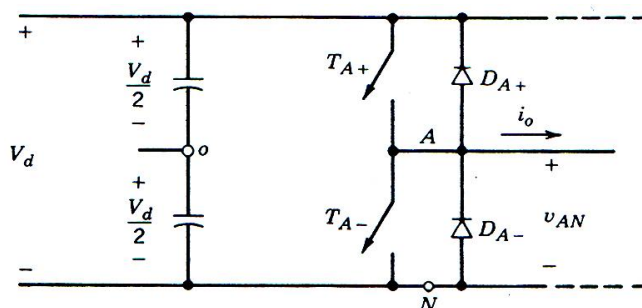


(c)

63

2.3.1.1. POLUMOSTNI INVERTOR - KONSTRUKCIJA

- Polumostni DC-DC pretvarač (poglavlje 2.2.7.) može da radi u dva kvadranta.
- Četvorokvadrantni rad se može dobiti, ako se na ulazu koristi kapacitivni razdelnik ili izvor napona sa srednjim izvodom.
- Jedan izlaz invertora je tačka O, a drugi je tačka A.



64

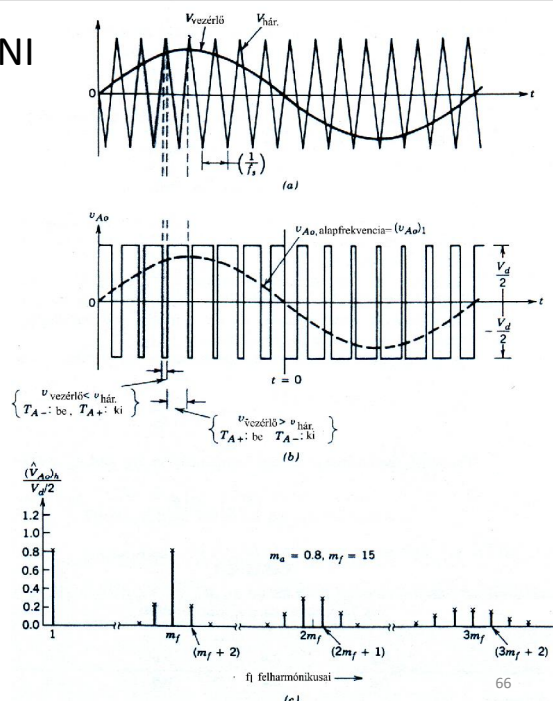
2.3.1.2. POLUMOSTNI INVERTOR - KONTROLA

- Radi formiranja izlaznog napona potrebno je primeniti impulsno-širinsku modulaciju.
- Modulacija se vrši na sličan način kao kod DC-DC pretvarača sa polumostnom i mostnom spregom (poglavlja 2.2.7. i 2.2.8.).
- U ovom slučaju trougaoni nosilac se ne upoređuje sa jednosmernim signalom već sa naizmeničnim signalom niske frekvencije koji odgovara amplitudi, frekvenciji i obliku željenog naizmeničnog signala.
- Odgovarajući vremenski dijagrami signala se mogu videti na sledećem slajdu.

65

2.3.1.3. POLUMOSTNI INVERTORI- OBLICI SIGNALA

- f_s – frekvencija prekidanja (noseća frekvencija),
- f_1 – modulišuća učestanost,
- $\hat{V}_{\text{hár}}$ - amplituda trougaonog signala.
- $V_{\text{vezérlő}}$ – modulišući signal.
- $\hat{V}_{\text{vezérlő}}$ - amplituda modulišućeg signala.



66

2.3.1.4. POLUMOSTNI INVERTOR – JEDNAČINE

- Koeficijent modulacije po amplitudi (amplitudni indeks):

$$m_a = \frac{\hat{V}_{vezérő}}{\hat{V}_{hár.}}$$

- Koeficijent modulacije po frekvenciji:

$$m_f = \frac{f_s}{f_1}$$

- Ako je $v_{vezérő} < v_{hár.}$, T_{A-} se uključi, T_{A+} se isključi:

$$v_{Ao} = -\frac{V_d}{2}$$

- Ako je $v_{vezérő} > v_{hár.}$, T_{A+} se uključi, T_{A-} se isključi:

$$v_{Ao} = \frac{V_d}{2}$$

67

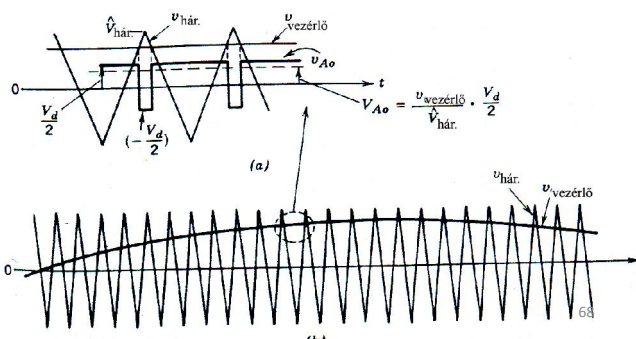
2.3.1.4. POLUMOSTNI INVERTOR – ANALIZA IZLAZNOG SIGNALA

- Izlazni signal invertora je pravougaoni signal fiksne amplitude i frekvencije ali promenljivog faktora ispunje.
- Razvojem u Fourier-ov red dobija se komponenta na osnovnoj učestanosti:

$$(\hat{V}_{Ao})_1 = m_a \cdot (V_d / 2)$$

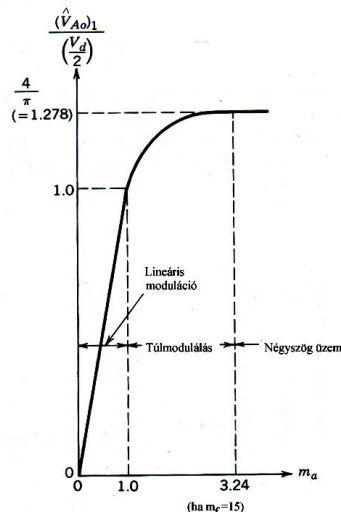
- Dobija se beskonačan spektar sa višim harmonicima oko prekidačke frekvencije i celobrojnog umnoška te frekvencije.
- Viši harmonici se mogu odstraniti (ublažiti) odgovarajućom filtracijom.
- Viša frekvencija

prekidanja:
lakša filtracija.



2.3.1.5. POLUMOSTNI INVERTOR – LINEARNI I NELINEARNI OPSEG MODULACIJE

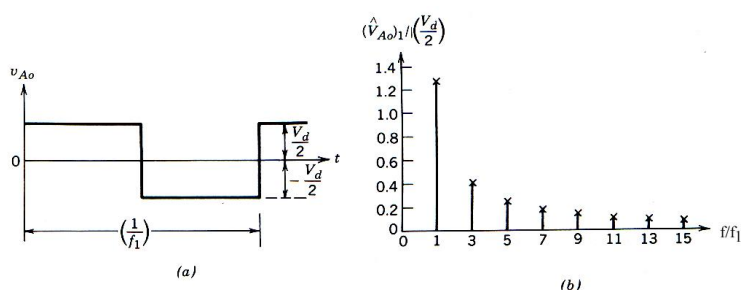
- Za dobijanje sinusnog izlaza $m_a \leq 1,0$ - to se zove linearna modulacija.
- Ako kontrolni signal i dalje povećavamo, i dalje će da raste efektivna vrednost izlaznog signala ali se dobija izobličeni signal (spljošti se vrh).



69

2.3.1.6. POLUMOSTNI INVERTOR – PRAVOUGAONI REŽIM

- Pri dovoljno velikoj vrednosti m_a frekvencija izlaznog pravougaonog signala se poklapa sa frekvencijom modulišućeg signala (na pr. 50Hz) – nema visokofrekvencijskog prekidanja.
- Amplituda osnovnog harmonika dobijenog $(V_{AO})_1 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{V_d}{2}$ pravougaonog signala:
- Dobija se veliki broj viši harmonika sa značajnim amplitudama (teško filtrirati).



70

2.3.1.7. POLUMOSTNI INVERTOR – OPŠTE PRIMEDBE

- Zahvaljujući kapacitivnom razdelniku na ulazu, ne može da se formira jednosmerna komponenta struje na izlazu invertora – može se neposredno vezati na transformator.
- Maksimalni napon koji se pojavljuje na prekidačkim tranzistorima je jednak ulaznom naponu:

$$V_T = V_d$$

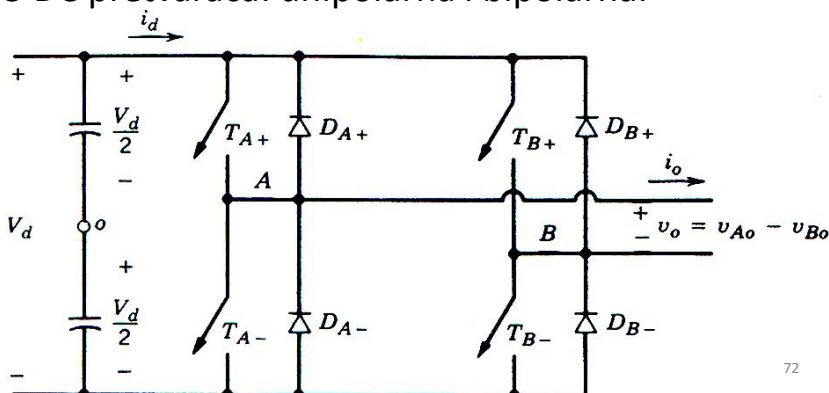
- Maksimalna vrednost struje tranzistora je:

$$I_T = i_{o,csúcs}$$

71

2.3.2. MOSTNI INVERTOR

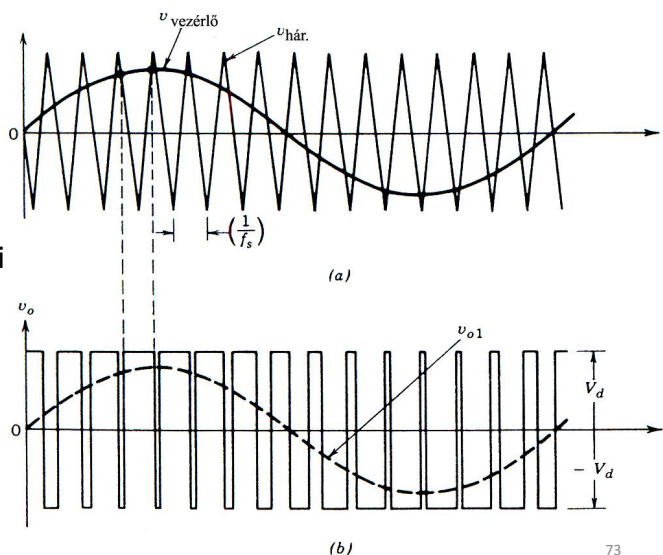
- Sadrži dva pumosta (četiri prekidača).
- Dobija se signal dva puta veće amplitude.
- Nije potreban kapacitivni razdelnik na ulazu.
- Moguće su dve vrste modulacije, kao kod mostnog DC-DC pretvarača: unipolarna i bipolarna.



72

2.3.2.1. MOSTNI INVERTOR – BIPOLARNA MODULACIJA

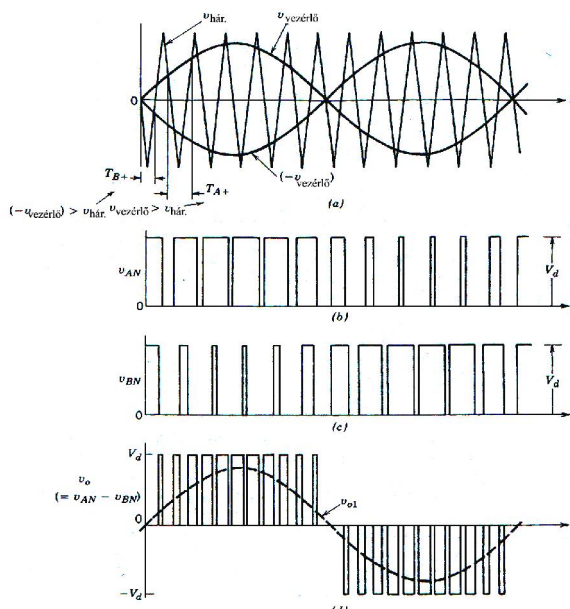
- Kontrolni signal se upoređuje sa trougaonim signalom visoke frekvencije (prekidačka učestanost).
- Uvek se uključuju dijagonalni parovi tranzistora.
- Izlazni signal invertora skače između $\pm V_d$.
- Viši harmonici se odstranjuju (ublažuju) filtracijom.



73

2.3.2.2. MOSTNI INVERTOR – UNIPOLARNA MODULACIJA

- Pored dijagonalnih parova povremeno se uključuju i dva gornja ili dva donja tranzistora – u takvim intervalima izlazni napon ima nultu vrednost.
- U jednoj poluperiodi modulišućeg signala izlazni signal osciluje između 0 i V_d , u drugoj poluperiodi između 0 i $-V_d$.



2.3.2.3. MOSTNI INVERTOR – PRAVOUGAONI REŽIM

- Pri linearnoj modulaciji važi:

$$\hat{V}_{o1} = m_a V_d$$

- Za slučaj $m_a > 1$:

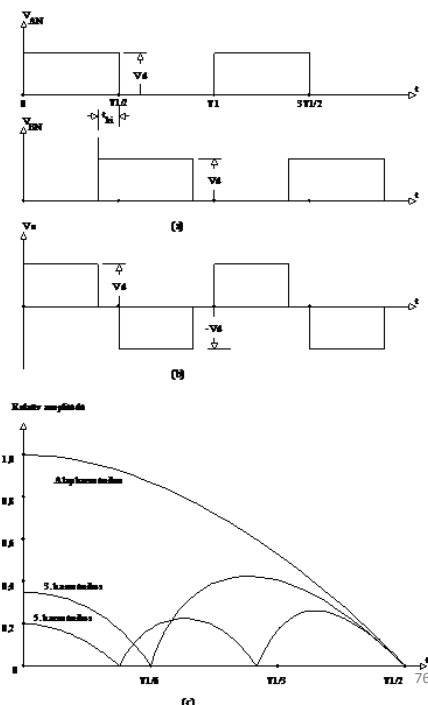
$$V_d < \hat{V}_{o1} < \frac{4}{\pi} V_d$$

- Na gornjoj granici prelazi se u pravougaoni režim.
- Isti rezultat se dobija i pri unipolarnoj i pri bipolarnoj modulaciji.
- Izlaz sadrži veliki broj viših harmonika sa značajnim amplitudama.

75

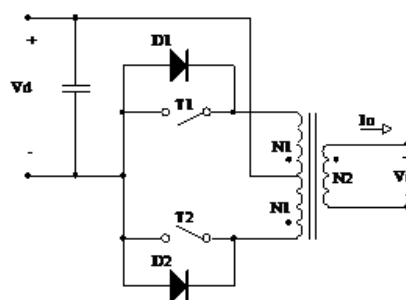
2.3.2.4. MOSTNI INVERTOR – INVERTOR SA PONIŠTAVANJEM NAPONA

- Oba polumosta rade sa faktorom ispunje od 50% na frekvenciji željenog izlaznog signala
- Uvodi se kašnjenje između prekidanja u pojedinim polumostovima.
- U vremenskom intervalu koji odgovara kašnjenju (pauza) dobija se nulti napon.
- Varijacijom kašnjenja može se regulisati efektivna vrednost izlaznog signala.
- Amplituda je konstantna.
- Izlaz sadrži veliki broj viših harmonika sa značajnim amplitudama



2.3.3. PUSH-PULL INVERTOR

- Polumostni i mostni invertori se smatraju za standardna rešenja ali kod prostih jednofaznih primena koristi se i push-pull rešenje.
- Modulacija: kao kod polumostnog invertora, tranzistori T_1 i T_2 provode naizmenično sa faktorima ispunе D i $(1-D)$.



2.3.3.1. PUSH-PULL INVERTOR - PRORAČUNI

- Trenutna vrednost izlaznog napona je: $v_o = V_d(N_2/N_1)$
- Amplituda osnovnog harmonika je:

$$\hat{V}_{o1} = m_a V_d \frac{N_2}{N_1}$$
- Opseg regulacije osnovnog harmonika u slučaju premodulacije je:

$$V_d \frac{N_2}{N_1} < \hat{V}_{o1} < \frac{4}{\pi} V_d \frac{N_2}{N_1}$$
- Maksimalna opterećenja tranzistora su:

$$V_T = 2V_d \quad I_T = \frac{N_2}{N_1} i_{o,csúcs}$$
- Transformator se magnetiše na niskoj učestanosti – rešenje sa čeličnim jezgrom, veliki gabariti.
- U slučaju velikog koeficijenta modulacije po amplitudi i push-pull inverter prelazi u pravougaoni režim.

78

2.3.3.2. INVERTORI – STEPEN ISKORIŠĆENJA PREKIDAČA

- Za sve dosad prikazane jednosmerne invertore dobija se stepen iskorišćenja prekidača.

$$k = \frac{V_{o1} I_{o,\max}}{q V_T I_T}$$

- Polazi se od formule:
- Kod mostnih invertora u pravougaonom režimu važe sledeće vrednosti:

$$V_T = V_d, \quad I_T = \sqrt{2} I_{o,\max}, \quad V_{o1} = \frac{4}{\pi\sqrt{2}} V_d, \quad q = 4.$$

- Dakle, u pravougaonom režimu je:

$$k_{\max, \text{négyyszög}} = \frac{1}{2\pi} \approx 0,16$$

- U slučaju linearne modulacije:

$$k_{\max, \text{szinusz}} = \frac{1}{8} m_a = 0,125 m_a$$

79

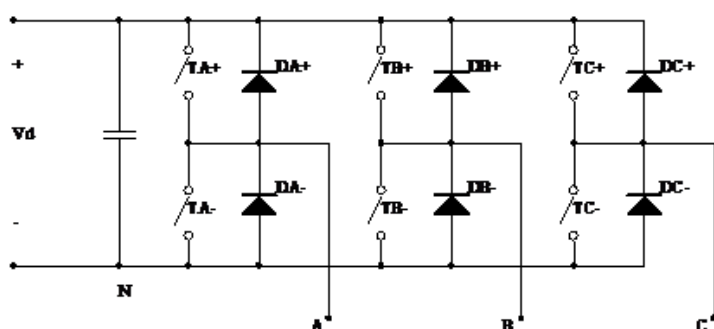
2.3.4. TROFAZNI I VIŠEFAZNI INVERTORI - OSNOVI

- Naizmenični potrošači veće snage su redovno trofaznog tipa.
- Trofazni inverter omogućava napajanje trofaznog potrošača uz promenljivu amplitudu, frekvenciju i oblik napona.
- Načelno bi se mogao formirati trofazni inverter od tri jednofazna invertora, ali bi se oni morali napajati iz nezavisnih izvora ili bi došlo do kratkih spojeva preko prekidača.
- Pravo rešenje je trofazni most koji se dobija spajanjem tri polumosta.

80

2.3.4.1. TROFAZNI I VIŠEFAZNI INVERTORI - KONSTRUKCIJA

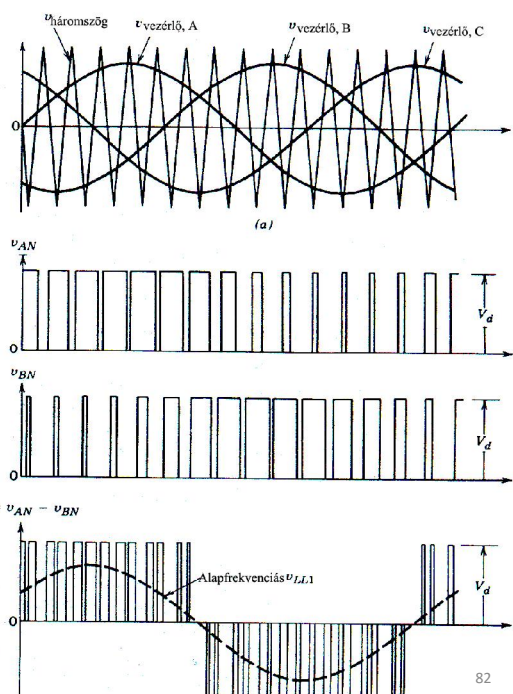
- Tri polumosta sa istim napajanjem (ulazom).
- Izlazi pojedinih polumostova će biti izlazne faze.



81

2.3.4.2. TROFAZNI I VIŠEFAZNI INVERTORI - UPRAVLJANJE

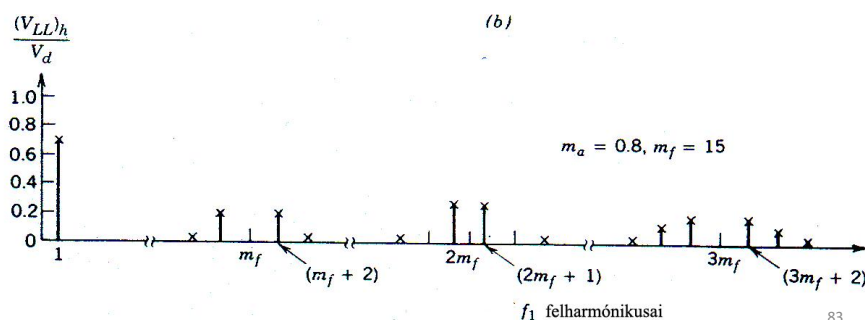
- Jedan visokofrekvencijski trougaoni signal kompariramo sa tri niskofrekvencijska sinusna signala.
- Sinusni signali su međusobno pomereni za 120° .
- Signali v_{AN} i v_{BN} sadrže jednosmernu komponentu, ali napon v_{AB} koji se smatra za izlaz, ne sadrži jednosmernu komponentu zahvaljujući oduzimanju (razlika napona).



82

2.3.4.3. TROFAZNI I VIŠEFAZNI INVERTORI - SPEKTAR

- Spektar linijskog napona je sličan spektru izlaznog napona kod polumostnog i mostnog invertora.
- Odgovarajućim izborom m_f mogu se eliminisati izvesni harmonici.



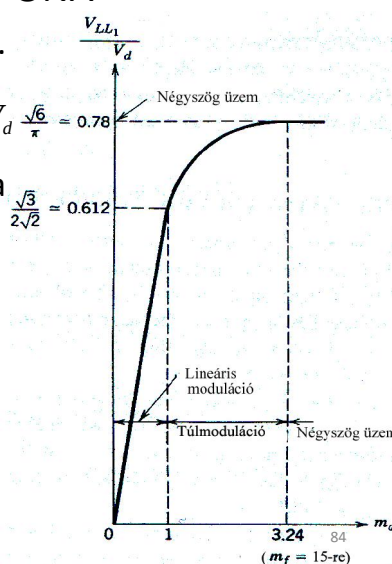
2.3.4.4. TROFAZNI I VIŠEFAZNI INVERTORI – PRORAČUN EFEKTIVNE VREDNOSTI IZLAZNOG LINIJSKOG NAPONA

- Linerna modulacija – sinusni izlaz.

$$V_{LL} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (\hat{V}_{AN})_1 = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} (m_a V_d) \approx 0,612 m_a V_d \frac{\sqrt{6}}{\pi} \approx 0,78$$

- U slučaju premodulacije efektivna vrednost raste ali se dobija izobličeni signal.
- U krajnjem slučaju i tu se dobija pravougaoni signal.
- Efektivna vrednost pravougaonog signala je:

$$V_{LL} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \frac{4}{\pi} \frac{V_d}{2} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_d \approx 0,78 V_d$$



2.3.4.5. TROFAZNI I VIŠEFAZNI INVERTORI – PRORAČUN STEPENA ISKORIŠĆENJA PREKIDAČA

- Stepenn iskorišćenja prekidača se dobija kao odnos prividne snage trofaznog izlaza i prividne snage prekidača: $k = \frac{(VA)_{3-fázis}}{6V_T I_T}$
- U najboljem slučaju dobijaju se sledeći odnosi: $V_T = V_d, I_T = \sqrt{2}I_{o,max}, (VA)_{3-fázis} = \sqrt{3}V_{LL1}I_{o,max}$
- U slučaju linearne modulacije maksimalni stepenn iskorišćenja je: $k = \frac{\sqrt{3}V_{LL1}I_{o,max}}{6V_d\sqrt{2}I_{o,max}} = \frac{1}{2\sqrt{6}} \frac{V_{LL1}}{V_d},$
- U pravougaonom režimu važi: $k = \frac{1}{2\sqrt{6}} \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a = \frac{1}{8} m_a$
- I kod ranije prikazanih invertora smo dobili iste rezultate. $k = \frac{1}{2\pi} \approx 0,16.$

85

2.4. PRETVARAČI NAIZMENIČNOG NAPONA

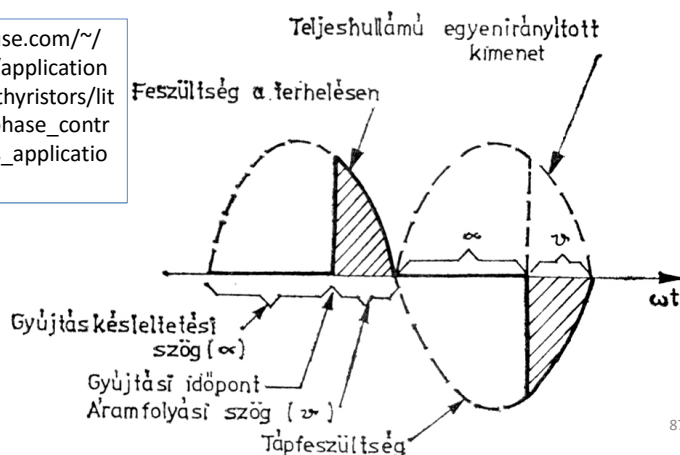
- Različiti sklopovi.
- Jedan naizmennični napon (ili struju) pretvaraju u drugi.
- Šta se može menjati:
 - amplituda (efektivna vrednost) i/ili
 - frekvencija i/ili,
 - oblik signala.
- Tipovi:
 - fazni regulatori
 - regulatori brojem celih perioda,
 - kontinualni regulatori naizmenničnog napona,
 - pretvarači frekvencije,
 - ciklokonvertori.

86

2.4.1. FAZNI REGULATORI - OSNOVI

- Na ulazu je naizmenični napon.
- Pokretanje struje kasni u odnosu na prolaz mrežnog napona kroz nulu unutar svake poluperiode.

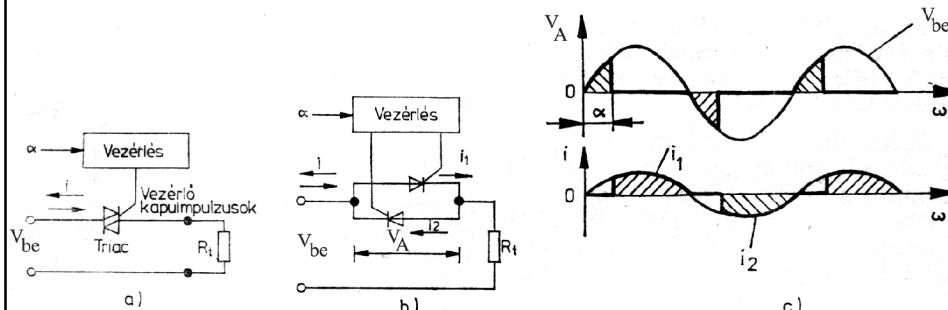
http://www.littelfuse.com/~media/electronics/application_notes/switching_thyristors/littelfuse_thyristor_phase_control_using_thyristors_application_note.pdf.pdf



87

2.4.1.1. FAZNI REGULATORI - KONSTRUKCIJA

- Rešavaju se tiristorskim dva tiristora ili jedan triac).
- Uključenje: pomoću impulsa za paljenje.
- Isključenje: pri prolascima ulaznog napona kroz nulu (prirodna komutacija).



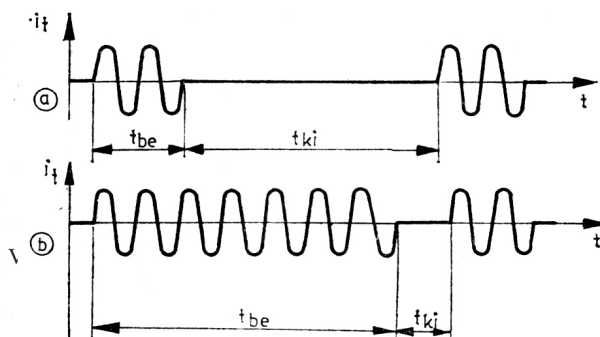
2.4.1.2. FAZNI REGULATORI- KARAKTERISTIKE

- Srednja snaga potrošača se može regulisati u celokupnom opsegu (od nule do maksimuma).
- I pri čisto ohmskom potrošaču troši se reaktivna snaga (kasni osnovni harmonik struje u odnosu na ulazni napon).
- Na potrošač se dovodi napon u svakoj poluperiodi ili periodu, samo u kratkim intervalima ostaje bez napajanja, zato je fazna regulacija pogodna za regulaciju osvetljenja.
- Na potrošač dolazi signal sa istom osnovnom frekvencijom kao na ulazu ali su značajna izobličenja.
- Omogućava regulaciju sa malim gubicima.
- Ne koriste se pasivne komponente značajnih gabarita.
- Izobličava se i ulazni napon i značajne su radiofrekvencijske smetnje.

89

2.4.2. REGULATORI BROJEM CELIH PERIODA

- Propuštaju se ili se ne propuštaju cele periode .
- Ne proizvodi se značajan nivo izobličenja i RF smetnji.



90

2.4.2.1. REGULATORI BROJEM CELIH PERIODA - KARAKTERISTIKE

Mane:

- napon koji dolazi na potrošač se ne može menjati kontinualno,
- u dužem intervalu potrošač ne dobija energiju, zato o srednjoj snazi potrošača može se govoriti tek ako je vremenska konstanta potrošača velika,
- opterećenje mreže se menja u vremenu.

Prednosti:

- na potrošač se uvek dovode cele periode (eventualno poluperiode),
- ne postoji nagli skok napona kao kod fazne regulacije, zato nema radiofrekvencijskih smetnji,
- zahtevi prema tiristorima su manji (skok struje nije tako nagli),
- ne uzima se reaktivna snaga iz izvora.

91

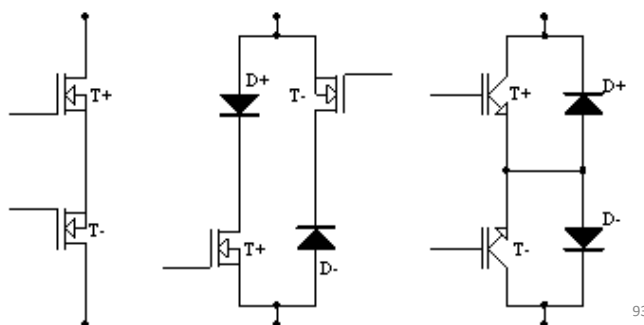
2.4.3. KONTINUALNI REGULATORI NAIZMENIČNOG NAPONA - OSNOVI

- Pomoću regulacionog transformatora moguće je regulisati napon kontinualno u opsegu $0 \dots V_{\max}$ (frekvencija, broj faza i oblik signala se ne menjaju).
- Regulacioni transformator je velikih dimenzija, težak, skup i kratkog radnog veka (zbog kliznog kontakta).
- Razvijene su ideje za elektronsku regulaciju naizmeničnog napona ali zasad nema takvih uređaja na tržištu.
- Načelno svaki pretvarač jednosmernog napona u drugi jednosmerni napon (buck, boost, buck-boost, Ćukov) može da reguliše naizmenični napon ako se obični (jednokvadrantni, unilateralni) prekidači u pretvaraču zamene sa bilateralnim (četvorokvadrantnim) prekidačima.

92

2.4.3.1. KONTINUALNI REGULATORI NAIZMENIČNOG NAPONA – BILATERALNI PREKIDAČI

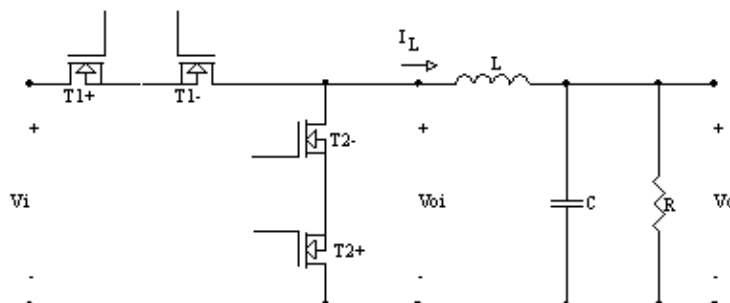
- U uključenom stanju mogu da provode struju u oba smeru, u isključenom stanju mogu da podnose napone oba smeru (neće proteći struja).



93

2.4.3.2. KONTINUALNI REGULATORI NAIZMENIČNOG NAPONA – BUCK REGULATOR

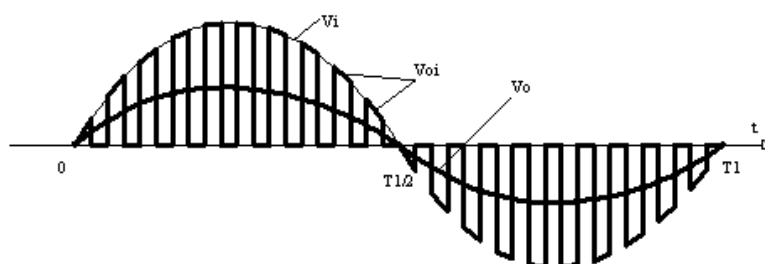
- I prekidački tranzistor i dioda je zamenjena bilateralnim prekidačima.
- Dva bilateralna prekidača se uključuju naizmenično sa faktorima ispunе D i $1-D$.



94

2.4.3.3. KONTINUALNI REGULATORI NAIZMENIČNOG NAPONA – DIAJGRAMI

- Na ulazu izlaznog LC filtra se formira pravougaoni signal modulisan po amplitudi.
- Na izlazu filtra dobijemo sinusni napon, amplituda tog napona se može menjati kontinualno promenom faktora ispunje.



95

2.4.3.4. KONTINUALNI REGULATORI NAIZMENIČNOG NAPONA – PROBLEMI OKO BEZBEDNOG RADA PREKIDAČA

- U principu prekidači se uključuju naizmenično.
- Pri promeni stanja ne može biti niti preklapanja niti prekid u provođenju – to je u praksi nemoguće – kod svih dosadašnjih višetranzistorskih pretvarača bilo je bar malo pauze između provođenja dva tranzistora.
- Unutrašnje tranzistore bilateralnog prekidača treba uključivati/isključivati ponaosob, uz poštovanje određenog redosleda (višestepeno prekidanje).
- Redosled zavisi od trenutnog smera struje kalema.

96

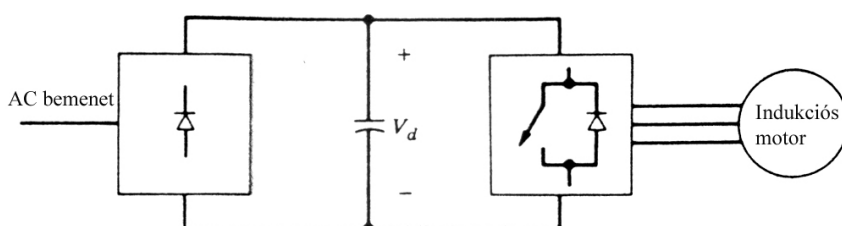
2.4.4. PRETVARAČI FREKVENCije

- Dva stepena: usmerač + inverter.
- Između ta dva stepena postoji međukolo sa jednosmernim naponom (kondenzator) ili sa jednosmernom strujom (kalem)
- Pretvarač frekvencije može da menja:
 - amplitudu,
 - frekvenciju,
 - broj faza,
 - oblik signala.

<http://www.gohz.com/3-kva-three-phase-static-frequency-converter>
<http://www.programmablepower.com/brands/california-instruments.htm>

97

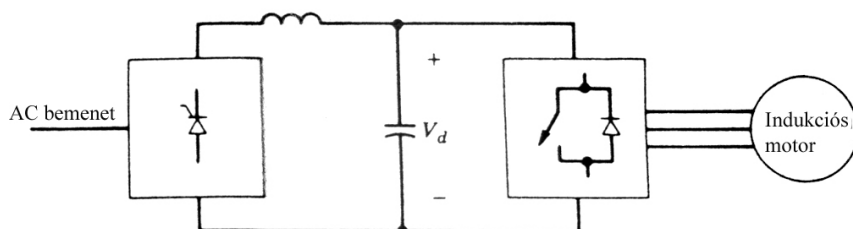
2.4.4.1. PRETVARAČI FREKVENCije – KONSTRUKCIJA BR. 1.



- Diodni usmerač + PWM inverter.
- Napon međukola nije potrebno regulisati pošto PWM inverter može da menja sve parametre izlaznog signala.
- Na velikim snagama se javljaju veliki gubici, pogotovu a ko se koristi visoka frekvencija za PWM.
- Danas se skoro isključivo koristi ovo rešenje na malim i srednjim snagama.

98

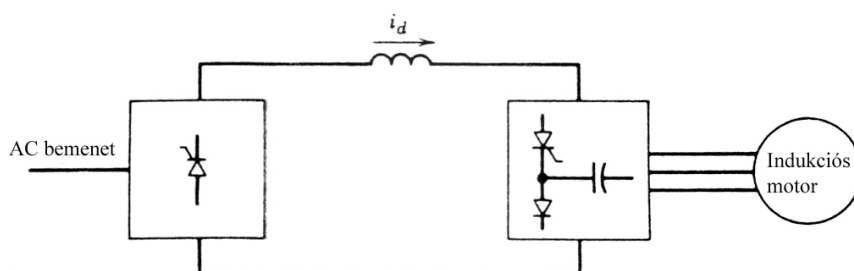
2.4.4.2. PRETVARAČI FREKVENCije – KONSTRUKCIJA BR. 2.



- Tiristorski usmerač + pravougaoni inverter.
- Umesto tiristorskog usmerača možemo koristiti diodni usmerač u kombinaciji sa buck pretvaračem.
- Tiristorski ispravljač reguliše napon međukola. Pravougaoni inverter ne može da menja amplitudu izlaznog signala.
- Pogodan je za velike snage zbog malih prekidačkih gubitaka (prekidači u invertoru rade na niskoj frekvenciji).

99

2.4.4.3. PRETVARAČI FREKVENCije – KONSTRUKCIJA BR. 3.



- Inverter vođen sa potrošača (napon motora omogućava prirodnu komutaciju) napaja potrošač.
- Ulazni tiristorski usmerač reguliše struju.
- Danas se ovo rešenje smatra zastarelim.

100

2.4.5. CIKLOKONVERTORI

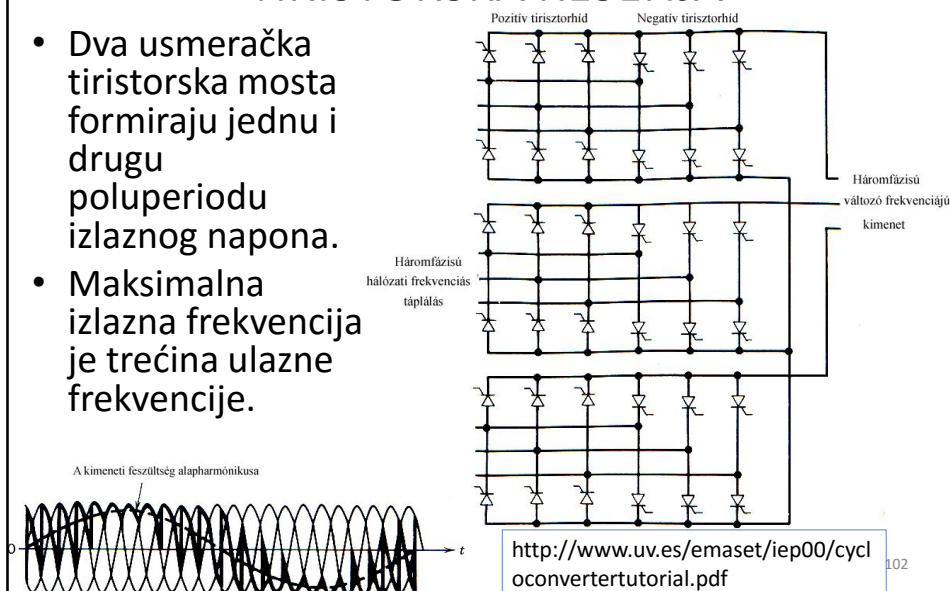
- Pretvaranje naizmeničnog napona bez jednosmernog međukola (nema dela sa jednosmernim naponom ili jednosmernom strujom).
- Dva tipa:
 - tiristorski ciklokonvertori sa prirodnom komutacijom,
 - tranzistorski (PWM) ciklokonvertori sa prisilnom komutacijom.

https://en.wikipedia.org/wiki/AC/AC_converter

101

2.4.5.1. CIKLOKONVERTORI – TIRISTORSKA REŠENJA

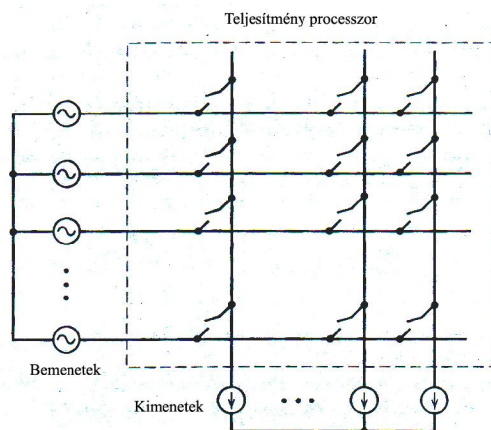
- Dva usmeračka tiristorska mosta formiraju jednu i drugu poluperiodu izlaznog napona.
- Maksimalna izlazna frekvencija je trećina ulazne frekvencije.



102

2.4.5.2. CIKLOKONVERTORI– TRANZISTORSKA REŠENJA

- Koristi matrično raspoređene bilateralne prekidače.
- Broj prekidača je $m \times n$, gde je m broj ulaznih faza, n broj izlaznih faza.
- Uključivanju/isključivanju prekidača treba posvetiti veliku pažnju: ne sme da dođe ni do kratkog spoja ulaznih napona ni do prekidanja izlazne struje (videti tačku 2.4.3.4).



https://www.researchgate.net/publication/3217962_Matrix_Converters__A_Technology_Review

103

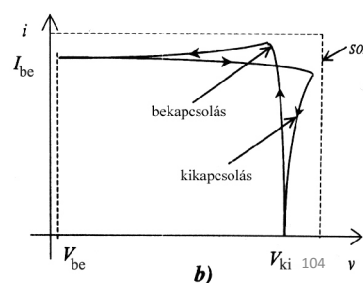
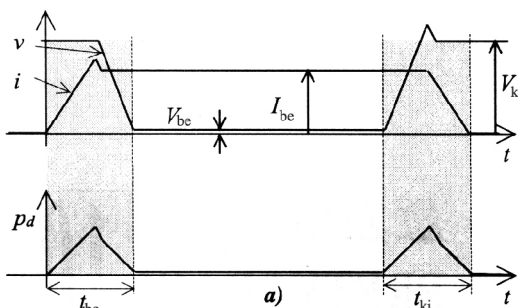
2.5.a REZONANTNI PRETVARAČI - ROBLEMI

Kod pretvarača koja smo dosad proučavali, usled naglih promena stanja prekidača dolazi do velikih skokova napona i struje (pravougaoni oblici signala).

Posledice toga su:

- velike smetnje,
- značajni gubici.

<http://www.ti.com/lit/an/slua159/slua159.pdf>



2.5.b REZONANTNI PRETVARAČI– REŠENJA ZA NAVEDENE PROBLEME

Za smanjenje smetnji i gubitaka redovno se primenjuju dva rešenja:

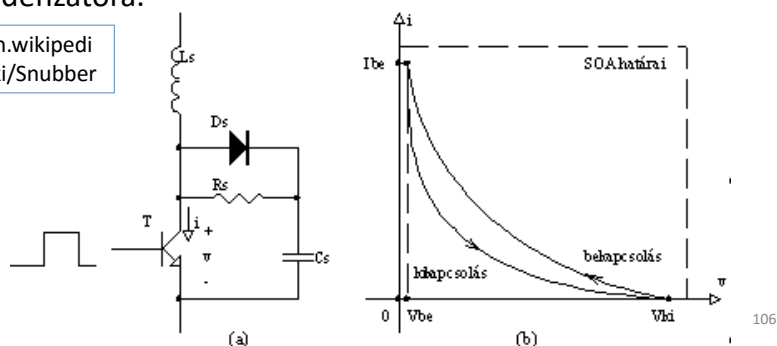
- kola za olakšanje komutacije (snubber-i) – **pružaju malu pomoć,**
- rezonantni pretvarači – predstavljaju **radikalno rešenje.**

105

2.5.c REZONANTNI PRETVARAČI – SNUBBER-I

- Na red sa tranzistorom se povezuje kalem male induktivnosti. To je dovoljno za smanjenje brzine porasta struje tranzistora. U međuvremenu napon padne na malu vrednost – uključanje sa malim gubicima.
- Pri isključenju se struja tranzistora, preko diode, preusmerava u jedan kondenzator. Pre nego što napon poraste, struja tranzistora je već pala na malu vrednost – dobija se uključanje sa malim gubicima. Potreban je jedan otpornik za pražnjenje kondenzatora.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Snubber>



106

2.5.d REZONANTNI PRETVARAČI – RADIKALNO REŠENJE

- Korišćenjem odgovarajućih LC elemenata napon i struja prekidača se uobličava u sinusoidu.
- Prekidanje se vrši pri prolasku napona i/ili struje kroz nulu.
- Tipovi rezonantnih pretvarača:
 - pretvarači sa rezonantnim opterećenjem,
 - pretvarači sa rezonantnim prekidačem,
 - invertori sa rezonantnim međukolom,
 - pretvarači sa visokofrekvencijskim međukolom i regulacijom pomoću broja celih perioda.

http://thesis.library.caltech.edu/1308/1/Vorperian_v_1984.pdf

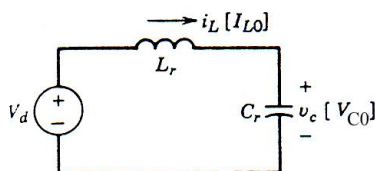
107

2.5.1.a PONAŠANJE REZONANTNIH KOLA – UKLJUČENJE NEOPTEREĆENOG REDNOG REZONANTNOG KOLA

- Svaki rezonantni pretvarač sadrži neko rezonantno kolo.
- Analiziramo ponašanje **rednog rezonantnog kola** pri uključenju naponskog generatora.
- U opštem slučaju potrebno je uzeti u obzir i akumulisanu energiju u momentu uključenja.
- Polazne jednačine su:

$$L_r \frac{di_L}{dt} + v_C = V_d$$

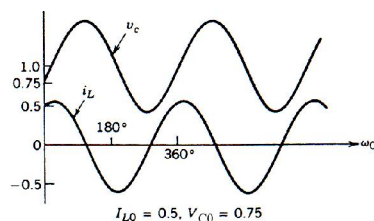
$$C_r \frac{dv_C}{dt} = i_L$$



108

2.5.1.b PONAŠANJE REZONANTNIH KOLA – NAPON I STRUJA REDNOG REZONANTNOG KOLA

- Ponašanja zavisi i od akumulisane energije u $t=0$.
- Posle uključenja generatora javlja se sledeća struja kabela i napon kondenzatora:



$$i_L(t) = I_{L0} \cos \omega_0(t - t_0) + \frac{V_d - V_{C0}}{Z_0} \sin \omega_0(t - t_0)$$

$$v_C(t) = V_d - (V_d - V_{C0}) \cos \omega_0(t - t_0) + Z_0 I_{L0} \sin \omega_0(t - t_0)$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$

109

2.5.1.c PONAŠANJE REZONANTNIH KOLA – UKLJUČENJE REDNOG REZONANTNOG KOLA – OPTEREĆENJE STRUJNIM GENERATOROM PARALELNO VEZANIM SA KONDENZATOROM

- Polazne jednačine su:

$$v_C = V_d - L_r \frac{di_L}{dt}$$

$$i_L - i_C = I_o \quad i_C = C_r \frac{dv_C}{dt} = -L_r C_r \frac{d^2 i_L}{dt^2}$$

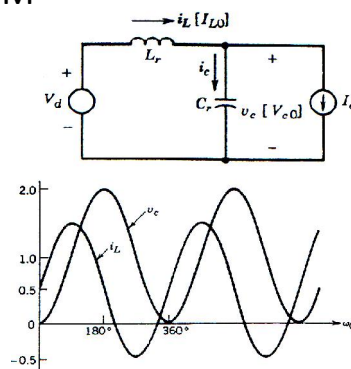
- Treba da se reši sledeća diferencijalna jednačina:

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + \omega_0^2 i_L = \omega_0^2 I_o$$

- Struja kabela i napon kondenzatora se dobija u sledećoj formi:

$$i_L(t) = I_o + (I_{L0} - I_o) \cos \omega_0(t - t_0) + \frac{V_d - V_{C0}}{Z_0} \sin \omega_0(t - t_0)$$

$$v_C(t) = V_d - (V_d - V_{C0}) \cos \omega_0(t - t_0) + Z_0 (I_{L0} - I_o) \sin \omega_0(t - t_0)$$



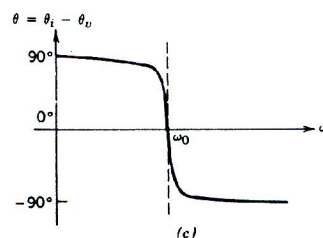
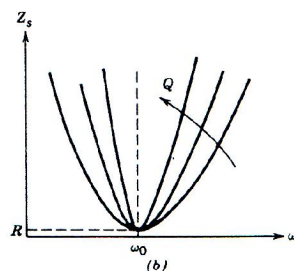
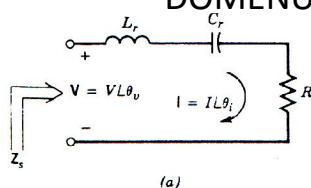
110

2.5.1.d PONAŠANJE REZONANTNIH KOLA – REDNO REZONANTNO KOLO – OPŠTE KARAKTERISTIKE

- Struje i naponi u rednom rezonantnom kolu su uglavnom sinusnog oblika, ponekad se javlja i jednosmerna komponenta.
- Amplituda dobijenih signala zavisi od skoka napona generatora i od količine akumulirane energije.
- Jednosmerno opterećenje ne menja oblik signala.
- Priključivanjem otpornog opterećenja dobijemo prigušene sinusoide (pseudoperiodične signale).

111

2.5.1.e PONAŠANJE REZONANTNIH KOLA – REDNO REZONANTNO KOLO – ANALIZA U FREKVENCIJSKOM DOMENU



- Ulazna impedansa zavisi od frekvencije.
- Na rezonantnoj frekvenciji ulazna impedansa je čisto ohm-ska ($=R$), ispod toga je kapacitivna, iznad induktivna.
- Faktor dobrote ima važnu ulogu:

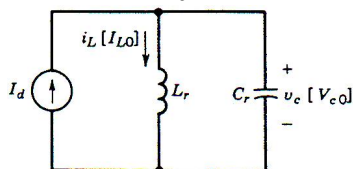
$$Q = \frac{\omega_0 L_r}{R} = \frac{1}{\omega_0 C_r R} = \frac{Z_0}{R}$$

112

2.5.1.f PONASANJE REZONANTNIH KOLA – PARALELNO REZONANTNO KOLO – UKLJUČENJE STRUJE NA NEOPTEREČENO KOLO

- Pobuda je u vidu strujnog generatora.
- U $t=t_0$ struja generatora skače sa 0 na I_d .
- Polazne jednačine:

$$i_L + C_r \frac{dv_c}{dt} = I_d \quad v_c(t) = L_r \frac{di_L}{dt}$$



- Rezultantna struja kalema:

$$i_L(t) = I_d + (I_{L0} - I_d) \cos \omega_0(t - t_0) + \frac{V_{C0}}{Z_0} \sin \omega_0(t - t_0)$$

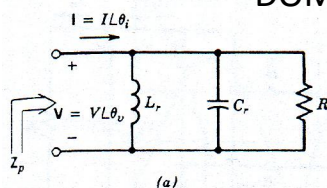
- Napon kondenzatora:

$$v_C(t) = Z_0(I_d - I_{L0}) \sin \omega_0(t - t_0) + V_{C0} \cos \omega_0(t - t_0)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$

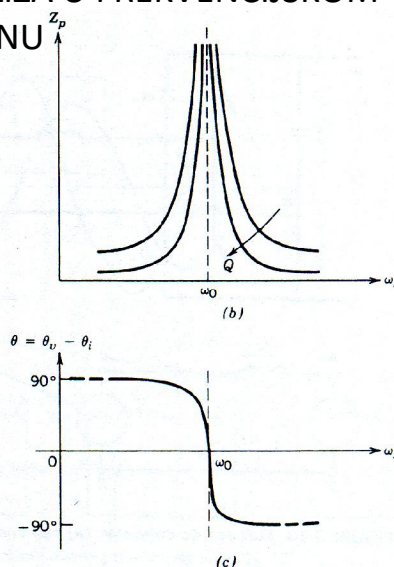
113

2.5.1.g PONAŠANJE REZONANTNIH KOLA – PARALELNO REZONANTNO KOLO – ANALIZA U FREKVENCIJSKOM DOMENU



- Ulazna impedansa zavisi od frekvencije.
- Na rezonantnoj frekvenciji ulazna impedansa je čisto ohm-ska ($=R$), ispod toga je induktivna, iznad je kapacitivna.
- Faktor dobrote igra važnu ulogu:

$$Q = \omega_0 R C_r = \frac{R}{\omega_0 L_r} = \frac{R}{Z_0}$$



114

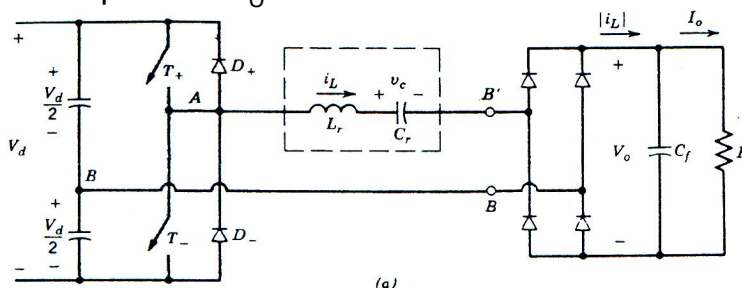
2.5.2. OSNOVNI PRETVARAČI SA REZONANTNIM OPETEREĆENJEM – OSNOVI

- Koristimo redno rezonantno kolo.
- Potrošač se vezuje na red sa rezonantnim kolom ili paralelno sa kondenzatorom rezonantnog kola.
- Zahvaljujući rezonantnom kolu dobijaju se sinusni naponi i struje – rad prekidača sa malim gubicima.
- Analize ćemo vršiti u ustaljenom režimu, sa odgovarajućim opterećenjem.
- Razmatraćemo dva kola:
 - SLR – *series load resonant* – rezonantni pretvarač sa rednim opterećenjem,
 - PLR – *parallel load resonant* – rezonantni pretvarač sa paralelnim opterećenjem.

115

2.5.2.1. REZONANTNI PRETVARAČ SA REDNIM OPETEREĆENJEM – OSNOVI

- L_r , C_r – čine rezonantno kolo.
- Pobuđivanje polumostom ili mostom (u slučaju većih opterećenja).
- Moguće je ubaciti transformator pre ili posle rezonantnog kola (izolovani izlaz, skaliranje napona po želji).
- Struja rezonantnog kola se preslikava ispravljeno na izlaz.
- Izlazni napon (V_o) se može smatrati čisto jednosmernim. Preko diodnog mosta se preslikava pravougaoni napon amplitude $\pm V_o$.

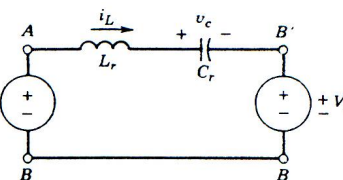


<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a547914.pdf>

116

2.5.2.1.a REZONANTNI PRETVARAČ SA REDNIM OPETERČENJEM – MODEL I JEDNAČINE

- Model uzima u obzir rad prekidača u polumostu ($\pm V_d/2$) i preslikavanje izlaznog napona ($\pm V_o$).

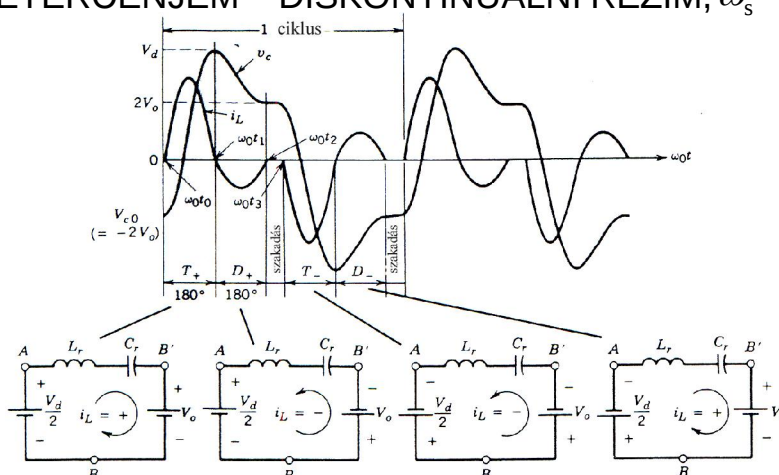


- Ako je $i_L > 0$:

provodi T_+	$v_{AB} = +\frac{V_d}{2}$	$v_{AB'} = +\frac{V_d}{2} - V_o$
provodi D_-	$v_{AB} = -\frac{V_d}{2}$	$v_{AB'} = -\frac{V_d}{2} - V_o$
- Ako je $i_L < 0$:

provodi T_-	$v_{AB} = -\frac{V_d}{2}$	$v_{AB'} = -\frac{V_d}{2} + V_o$
provodi D_+	$v_{AB} = +\frac{V_d}{2}$	$v_{AB'} = +\frac{V_d}{2} + V_o$
- Dovoljno je analizirati jednu poluperiodu.

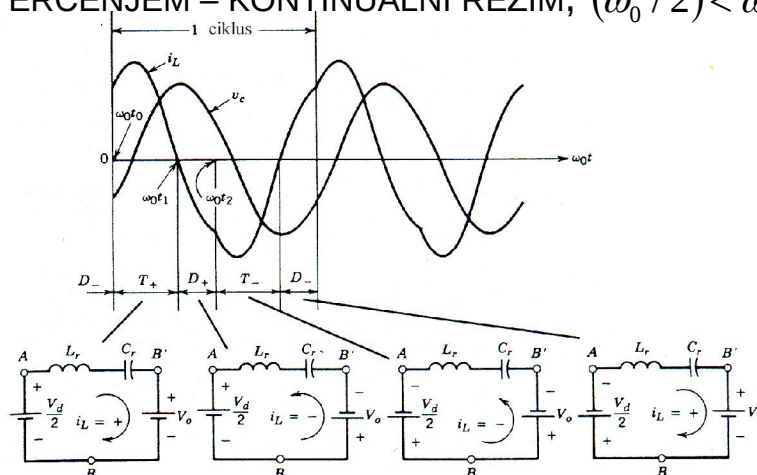
2.5.2.1.b REZONANTNI PRETVARAČ SA REDNIM OPETERČENJEM – DISKONTINUALNI REŽIM, $\omega_s < \omega_0/2$



- Pri uključenju je struja nulta, napon nije nulte vrednosti.
- Pri isključenju prekidača i napon i struja su nulte vrednosti.
- Odavde sledi da se za prekidač može koristiti tiristor.
- Struja dioda prirodno pada na nulu: mogu se koristiti spore diode.
- Regulacija: pomeranjem frekvencije.

118

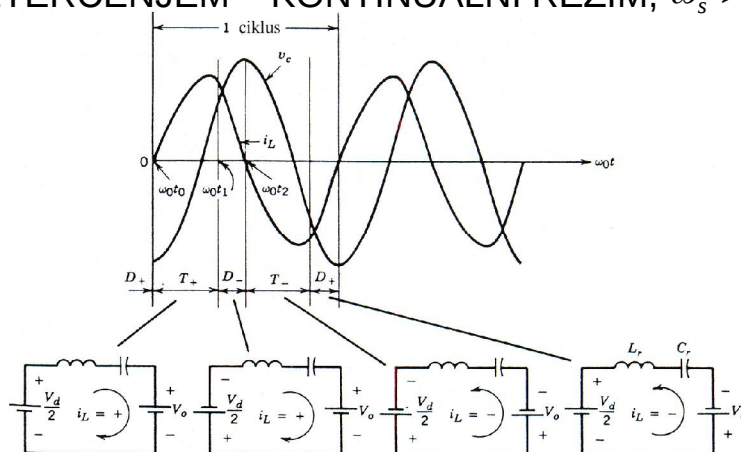
2.5.2.1.c REZONANTNI PRETVARAČ SA REDNIM

OPETERĆENJEM – KONTINUALNI REŽIM, $(\omega_0 / 2) < \omega_s < \omega_0$ 

- U momentu uključanja napon i struja prekidača nisu nulte vrednosti – značajni gubici pri uključanju.
- Isključenje je lako pošto struja prirodno pada na nulu.
- Za prekidače se mogu koristiti tiristori.
- Diode treba da su brze.

119

2.5.2.1.d REZONANTNI PRETVARAČ SA REDNIM

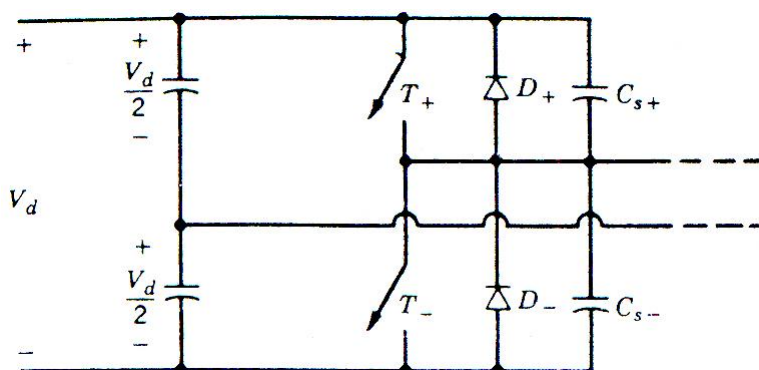
OPETERĆENJEM – KONTINUALNI REŽIM, $\omega_s > \omega_0$ 

- Pri isključenju struja nije nulte vrednosti.
- Uključenje se vrši pri nultom naponu i nultoj struji.
- Ne može se koristiti tiristor kao prekidač (samo neka vrsta tranzistora).
- Isključenje zamajnih dioda nije kritično, pošto tranzistor preuzima struju kod nulte vrednosti.

120

2.5.2.1.e REZONANTNI PRETVARAČ SA REDNIM OPETERČENJEM – SNUBBER BEZ GUBITAKA

- U slučaju kontinualnog režima ($\omega_s > \omega_0$) isključenje se može olakšati paralelnim vezivanjem kondenzatora sa tranzistorima – snubber bez gubitaka.
- Pri uključenju tranzistora neće se javiti strujni udar pošto je dati kondenzator u tom momentu prazan – ima nulti napon na sebi.



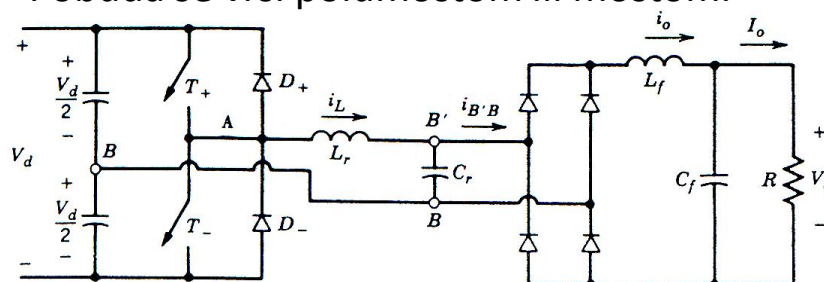
2.5.2.1.f REZONANTNI PRETVARAČ SA REDNIM OPTEREĆENJEM – UPRAVLJANJE

- Izlazni napon/struja se regulišu promenom frekvencije prekidanja.
- U analognoj tehnici se koristi naponom kontrolisani oscilator (VCO).
- U procesorskoj tehnici koristimo tajmer.
- Korišćenje ispravljača na izlazu pretvarača nije obavezno – Na primer, kod indukcionog zagrevanja potrebna je naizmenična struja visoke frekvencije.

122

2.5.2.2. REZONANTNI PRETVARAČI SA PARALELNIM OPTEREĆENJEM – OSNOVI

- I tu se primenjuje redno rezonantno kolo, ali je opterećenje priključeno paralelno kondenzatoru rezonantnog kola (ne redno kao dosad).
- I tu se može koristiti transformator radi skaliranja napona i izolacije izlaza od ulaza.
- Pobuda se vrši polumostom ili mostom.



<http://ecee.colorado.edu/~ecen5817/notes/ch5.pdf>

123

2.5.2.2.a REZONANTNI PRETVARAČI SA PARALELNIM OPTEREĆENJEM – KARAKTERISTIKE

- Izlaz rezonantnog pretvarača sa paralelnim opterećenjem (PLR) se ponaša kao naponski generator, zato je pogodan za formiranje više izlaza sa jednim pretvaračem.
- PLR pretvarač ne poseduje prirodnu zaštitu od kratkog spoja na izlazu. Ako ne ugradimo odgovarajuću zaštitu, u slučaju kratkog spoja struje prekidača mogu da rastu do enormno velike vrednosti.
- PLR može da radi i kao podizač i kao spuštač napona, nasuprot SLR pretvaraču, koji može da se koristi samo kao spuštač napona.

124

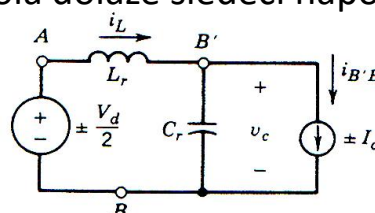
2.5.2.2.b REZONANTNI PRETVARAČI SA PARALELNIM OPTEREĆENJEM – MODELOVANJE

- Napon kondenzatora u rezonantnom kolu, nakon ispravljanja, dolazi na ulaz filtra L_f C_f .
- Na potrošač dolazi srednja vrednost napona.
- Rezonantno kolo se opterećuje strujom $\pm I_o$ polaritet struje zavisi od trenutnog predznaka napona kondenzatora.
- Na ulaz rezonantnog kola dolaze sledeći naponi:
- ako provodi T_+ ili D_+ :

$$v_{AB} = +\frac{V_d}{2}$$

- ako provodi T_- ili D_- :

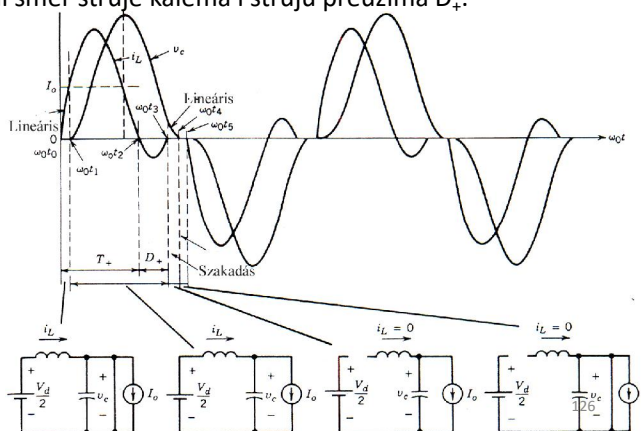
$$v_{AB} = -\frac{V_d}{2}$$



- Postoji veliki broj režima rada, mi tu analiziramo tri režima.

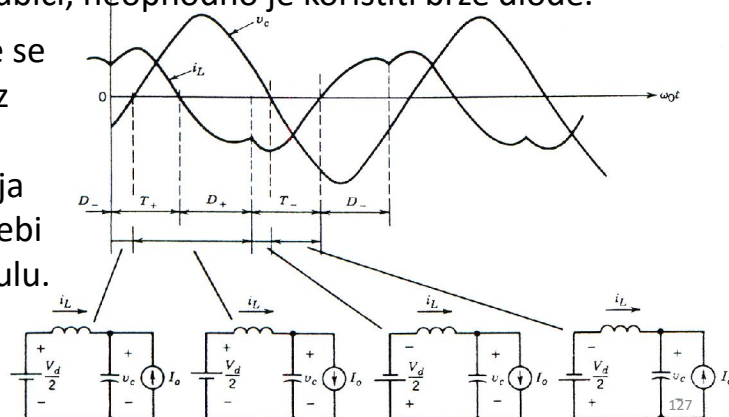
2.5.2.2.c REZONANTNI PRETVARAČI SA PARALELNIM OPTEREĆENJEM – DISKONTINUALNI REŽIM $\omega_s < \omega_0/2$

- Struja kalema i napon kondenzatora su u izvesnom intervalu (pauza) jednaki nuli.
- Uključivanjem T_+ struja kalema počinje da raste.
- Napon kondenzatora počinje da raste tek kada i_L poraste iznad I_o .
- Vremenom se promeni smer struje kalema i struju preuzima D_+ .
- Za to vreme treba da se isključi T_+ .
- Na kraju struja kalema linearno pada na nulu.
- U negativnoj poluperiodi (uključen T_-) dobija se slično ponašanje.
- Izlazni napon se reguliše promenom pauze ($\omega_s < \omega_0/2$).



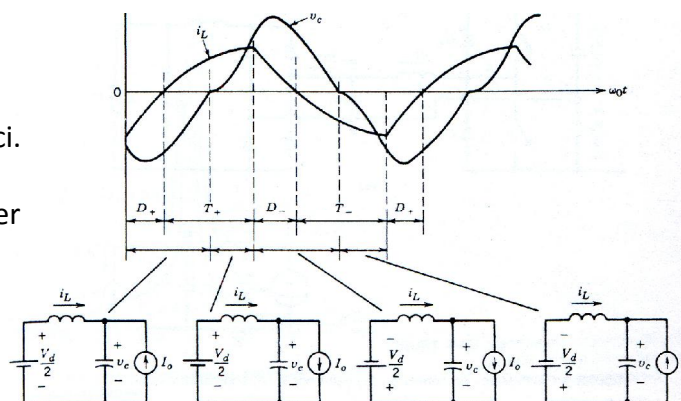
2.5.2.2.d REZONANTNI PRETVARAČI SA PARALELNI OPTEREĆENJEM –KONTINUALNI REŽIM, $\omega_0/2 < \omega_s < \omega_0$

- Struja kalema i napon kondenzatora su u ovom režimu kontinualne.
- Prekidači se uključuju kod nenulte struje: javljaju se značajni gubici, neophodno je koristiti brze diode.
- Isključenje se dešava bez gubitaka pošto struja sama po sebi pada na nulu.



2.5.2.2.e REZONANTNI PRETVARAČI SA PARALELNI OPTEREĆENJEM – KONTINUALNI REŽIM, $\omega_s > \omega_0$

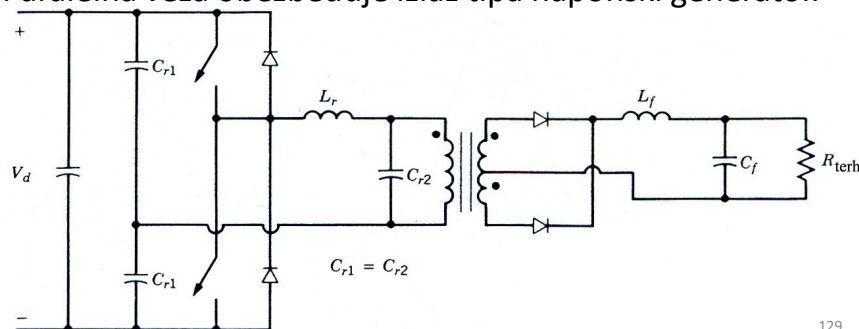
- Struja kalema i napon kondenzatora su i u ovom režimu kontinualne.
- Prekidači se uključuju kod nulte struje – nema značajnih gubitaka.
- Pri isključenju prekidača struja nije nulta – značajni su gubici.
- I tu se može primeniti snubber bez gubitaka (kondenzatori paralelno sa prekidačima).



128

2.5.2.3. HIBRIDNI REZONANTNI PRETVARAČ

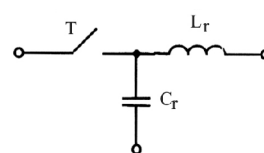
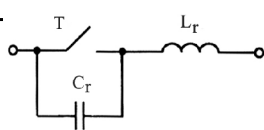
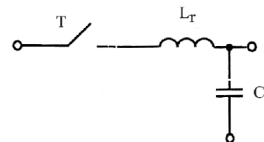
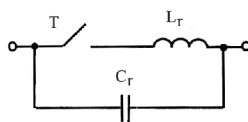
- Kombinuju se redno i paralelno opterećenje na rezonantno kolo.
- Kondenzator rezonantnog kola se formira kao redna veza dva kondenzatora.
- Opterećenje se vezuje paralelno jednom od kondenzatora.
- Redna veza ograničava struju kratkog spoja.
- Paralelna veza obezbeđuje izlaz tipa naponski generator.



129

2.5.3. PRETVARAČI SA REZONANTNIM PREKIDAČIMA – OSNOVI

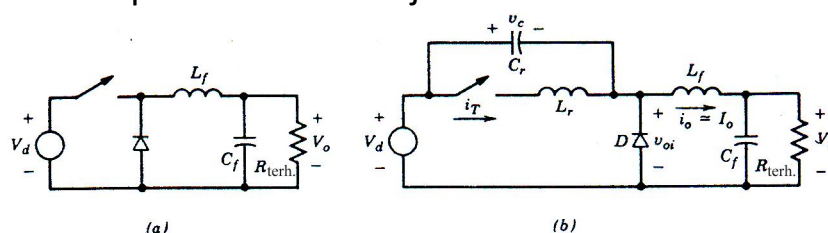
- Ne menja se kompletna struktura pretvarača.
- Postavljaju se LC komponente oko prekidača.
- Prekidanje kod nulte struje – zero current switch (ZCS).
- Prekidanje kod nultog napona – zero voltage switch (ZVS).



130

2.5.3.1.a PRETVARAČI SA REZONANTNIM PREKIDAČIMA – ZCS BUCK PRETVARAČ – KONSTRUKCIJA

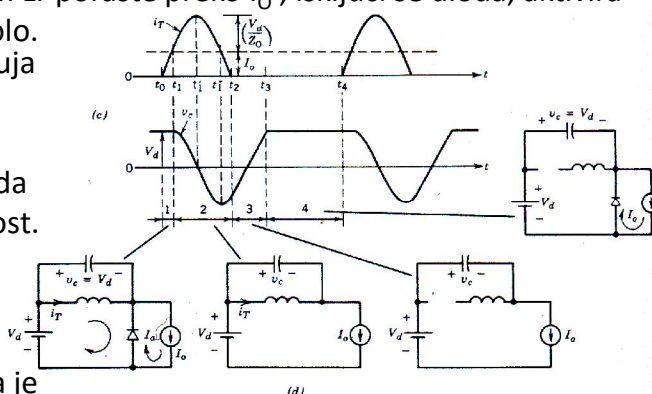
- Polazno kolo: uobičajeno buck kolo (a).
- ZCS buck pretvarač – prekidač je zamenjen sa rezonantnim kolom (b).
- Kalem L_f ima veliku induktivnost, njegova struja se može smatrati konstantnim.
- U ustaljenom režimu, pre uključjenja prekidača, struja kalema prolazi kroz zamajnu diodu.



ftp://ftp.ee.polyu.edu.hk/echeng/Power_Elect_EE4211/ZCS_Note.pdf

2.5.3.1.b PRETVARAČI SA REZONANTNIM PREKIDAČIMA – ZCS BUCK PRETVARAČ – ANALIZA RADA

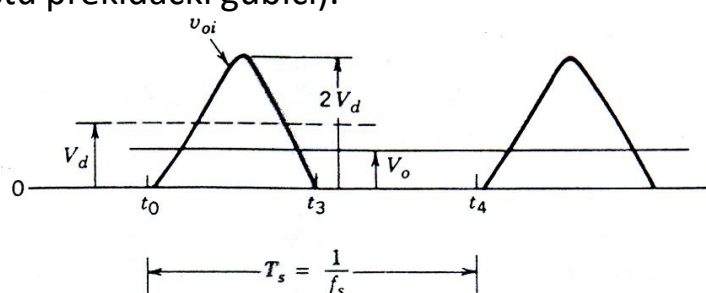
- Nakon uključjenja prekidača struja L_r raste linearno (pošto je napon na drugom kraju kalema: $-V_d = \text{const.}$).
- Kada struja kalem L_r poraste preko I_o , isključi se dioda, aktivira se rezonantno kolo.
- u vremenu t_1 struja postigne vršnu vrednost. Napon kondenzatora tada ima nultu vrednost.
- Napon postiže negativnu vršnu vrednost u trenutku t_1'' , tada je $i_T = I_o$.



- Struja prekidača prirodno pada na nulu u momentu t_2 , moguće je isključenje bez gubitaka.

2.5.3.1.c PRETVARAČI SA REZONANTNIM PREKIDAČIMA – ZCS BUCK PRETVARAČ – REGULACIJA

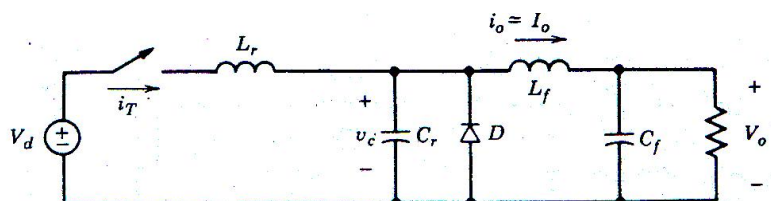
- Na ulaz izlaznog filtra dolazi napon prikazan na slici.
- Srednja vrednost tog napona je izlazni napon.
- Izlazni napon se reguliše dužinom pauze između uključenja.
- U slučaju velikih opterećenja struja se ne vraća prirodno na nulu, potrebno ju je prekinuti prekidačem (rastu prekidački gubici).



133

2.5.3.1.d PRETVARAČI SA REZONANTNIM PREKIDAČIMA – ZCS BUCK PRETVARAČ – KONDENZATOR PARALELNO SA DIODOM - KONSTRUKCIJA

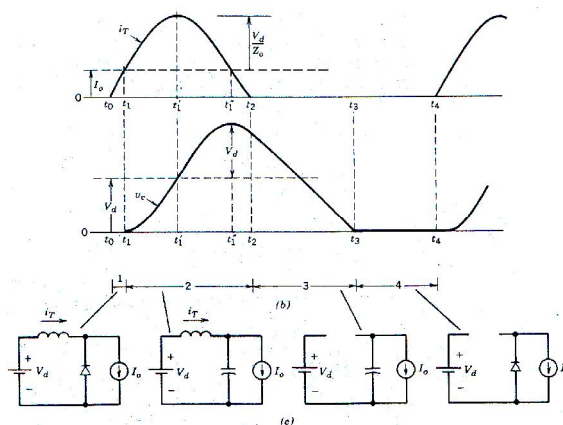
- Kondenzator se premesti u granu paralelno sa diodom (C_r).
- I u ovom slučaju je struja I_o približno konstantne vrednosti.
- Pre uključenja prekidača struja kalema i napon kondenzatora su nulte vrednosti.



134

2.5.3.1.e PRETVARAČI SA REZONANTNIM PREKIDAČIMA – ZCS BUCK PRETVARAČ – KONDENZATOR PARALELNO SA DIODOM – ANALIZA RADA

- U prvom intervalu struja raste linearno.
- U drugom intervalu struja se puni do vrednosti $2V_d$, zatim počinje pražnjenje. Smer struje ne može da se promeni pošto koristimo jednosmerni prekidač.
- U trećem intervalu napon kondenzatora pada linearno, pošto ga prazni struja potrošača.
- U četvrtom intervalu struju potrošača provodi dioda.



- Izlazni napon je jednak srednjoj vrednosti napona kondenzatora.
- Promenom trajanja pauze ($t_4 - t_3$) reguliše se izlazni napon.

135

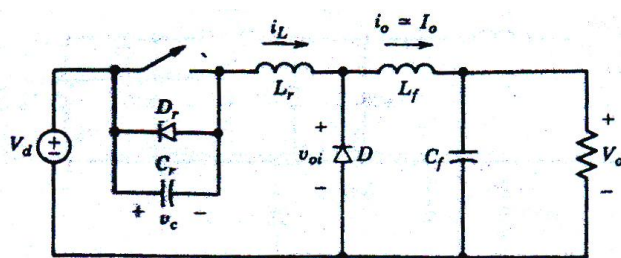
2.5.3.1.f PRETVARAČI SA REZONANTNIM PREKIDAČIMA – ZCS BUCK PRETVARAČ – KONDENZATOR PARALELNO SA DIODOM – KARAKTERISTIKE

- Rezonantnu frekvenciju određuju elementi L_r i C_r .
- Rezonantna frekvencija treba da je velika da bi dobili mogućnost regulacije izlaznog napona u širokom opsegu.
- Uključivanje i isključivanje prekidača se vrši pri nultoj struji, prekidački gubici su mali.
- Struja opterećenja I_o treba da je manja od odnosa V_d/Z_o .
- Antiparalelno sa prekidačem može se povezati dioda: time se dobija mogućnost vraćanja energije u izvor i ujedno se smanjuje zavisnost izlaznog napona od opterećenja.
- Vršna struja je znatno veća od struje potrošača! Iz toga proizilazi da su statički gubici prekidača veći nego kod pretvarača sa pravougaonim naponima i strujama.

136

2.5.3.2.a PRETVARAČI SA REZONANTNIM PREKIDAČIMA – ZVS BUCK PRETVARAČ – KONSTRUKCIJA

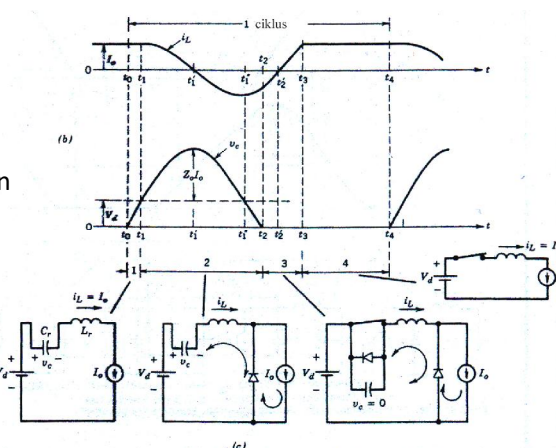
- Napon prekidača, zahvaljujući paralelno vezanom rezonantnom kondenzatoru povremeno pada na nulu – uključivanje i isključivanje se vrši u tim momentima.
- Struja kalema L_f se i u ovom slučaju može smatrati konstantnim.



137

2.5.3.2.b PRETVARAČI SA REZONANTNIM PREKIDAČIMA – ZVS BUCK PRETVARAČ – ANALIZA RADA

- Na početku je prekidač uključen, zato je $I_{L0} = I_o$ i $V_{C0} = 0$.
- Prvi interval počinje sa otvaranjem prekidača, napon kondenzatora raste.
- U drugom intervalu provede dioda, napon kondenzatora dalje raste, struja kalema pada, zatim promeni smer.
- U trećem intervalu napon kondenzatora je nulte vrednosti pošto provodi dioda D_r . U tom intervalu se prekidač može ponovo uključiti.

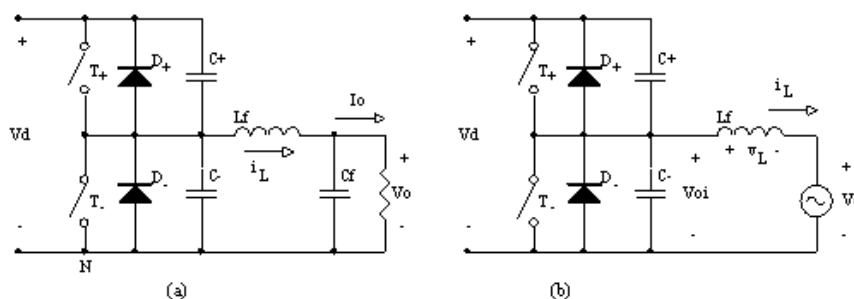


- U četvrtom intervalu isključuje se zamajna dioda (D). Sledi pauza, zatim novo isključenje tranzistora.

138

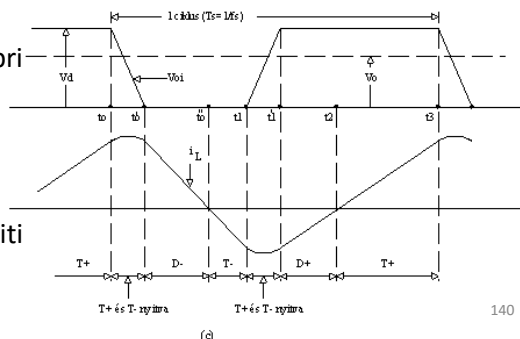
2.5.3.2.c PRETVARAČI SA REZONANTNIM PREKIDAČIMA – PSEUDOREZONANTNI POLUMOSTNI ZVS PRETVARAČ – KONSTRUKCIJA

- ZVS se može koristiti i kod drugih pretvarača, na pr. kod polumosta i mosta.
- Kombinuje se rezonantna i PWM tehnika.



2.5.3.2.d PRETVARAČI SA REZONANTNIM PREKIDAČIMA – PSEUDOREZONANTNI POLUMOSTNI ZVS PRETVARAČ – ANALIZA RADA

- Do trenutka t_0 provodi T_+ , struja raste.
- Isključimo T_+ . Zahvaljujući paralelno vezanom kondenzatoru, isključenje se dešava pri nultom naponu.
- C_+ se napuni, C_- se isprazni zahvaljujući struji u L_f . Rezonantni proces se završava kada je napon na prekidaču T_- jednak nuli. Struja kalema opada.
- Prekidač T_- se uključuje pri nultoj struji. Prekidač će preuzeti struju kalema kada se promeni smer struje.
- U momentu t_1 isključi se prekidač T_- , i to se dešava pri nultom naponu. Kondenzatori se prepune u suprotnom smeru.
- Nakon prepunjavanja prekidač T_+ se može uključiti sa malim gubicima.



140

2.5.3.2.e PRETVARAČI SA REZONANTNIM PREKIDAČIMA – PSEUDOREZONANTNI POLUMOSTNI ZVS PRETVARAČ – KARAKTERISTIKE

- Pseudorezonantni pretvarač se može kontrolisati impulsno-širinskom modulacijom uz konstantnu frekvenciju prekidanja.
- Rezonantni procesi treba da su brzi u odnosu na frekvenciju prekidanja.
- Izlaz pumosta u ovakvom slučaju je približno pravougaonog oblika, važi formula $V_o = DV_d$.
- Pseudorezonantna metoda se može primeniti i na mostnu spregu pretvarača. Uglavnom se primenjuje kod invertora sa poništavanjem napona (na visokoj frekvenciji).

141

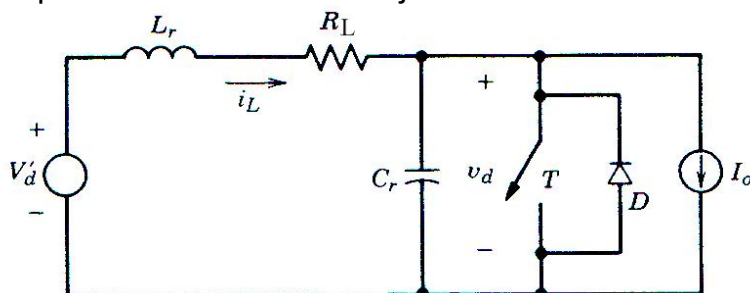
2.5.4.a INVERTORI SA REZONANTNIM MEĐUKOLOM – OSNOVI

- Kod konvencionalnih prekidačkih *PWM* invertora na ulazu je jednosmerni napon.
- Ako se u međukolo ugradi rezonantno kolo, dobiće se sinusne oscilacije na ulazu invertora.
- Prekidači se uključuju/isključuju kada napon međukola prirodno padne na nulu.

142

2.5.4.b INVERTORI SA REZONANTNIM MEĐUKOLOM – KONSTRUKCIJA

- Principna šema: L_r, C_r sačinjavaju rezonantno kolo.
- Prekidač sa antiparalelnom diodom igra ulogu prekidača invertora.
- I_o predstavlja struju potrošača (induktivno opterećenje – približno konstantna struja).



143

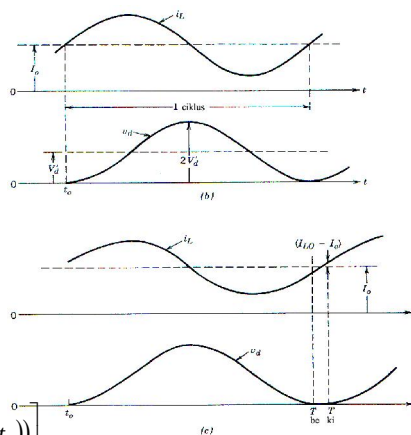
2.5.4.c INVERTORI SA REZONANTNIM MEĐUKOLOM – ANALIZA RADA

- Prekidač provodi razliku struja i_L i I_o , zatim se u $t=t_0$ prekidač otvori uz nulti napon.
- Napon prekidača započinje sinusne oscilacije, nakon jedne periode ponovo se vraća na nultu vrednost. (b).
- Formule za struju kalema i za napon međukola:

$$v_d(t) = V_d' + [\omega_0 L_r (I_{L0} - I_o) \sin \omega_0 t - V_d' \cos \omega_0 t]$$

$$i_L(t) = I_o + \left[\frac{V_d'}{\omega_0 L_r} \sin(\omega_0(t - t_0)) - (I_{L0} - I_o) \cos(\omega_0(t - t_0)) \right]$$

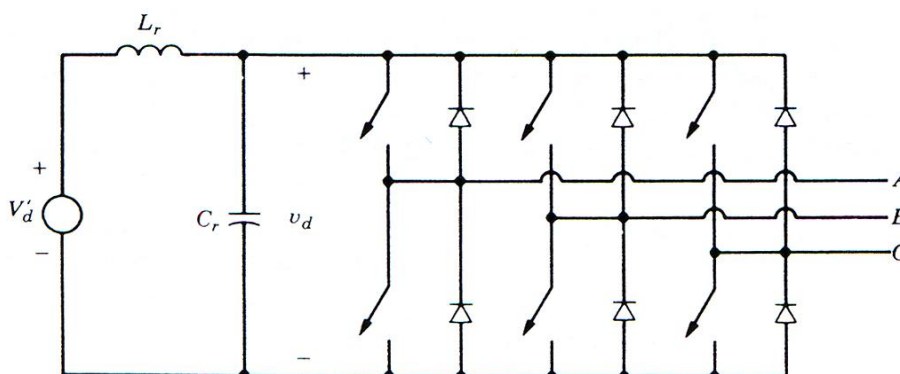
- Ako uzmemo u obzir i gubitke, napon prekidača može da se vrati na nultu vrednost samo ako je u momentu isključenja bila $I_{L0} > I_o$.



144

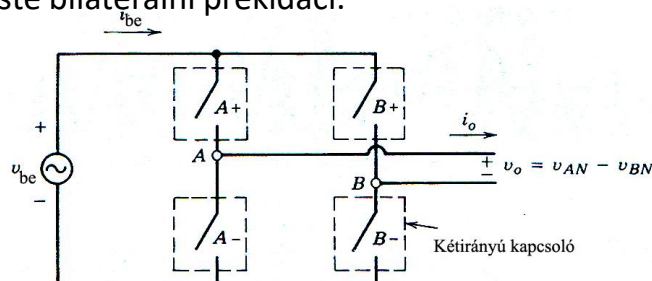
2.5.4.d INVERTORI SA REZONANTNIM MEĐUKOLOM – PRIMENA NA TROFAZNE INVERTORE

- Rezonantne pojave u međukolu se iniciraju istovremenim zatvaranjem i otvaranjem oba prekidača u jednom polumostu.
- I u ovom slučaju prekidanje se vrši pri nultom naponu da bi minimizirali prekidačke gubitke.



2.5.5.a PRETVARAČI SA VISOKOFREKVENCIJSKIM MEĐUKOLOM I REGULACIJOM BROJA CELIH PERIODA – OSNOVI

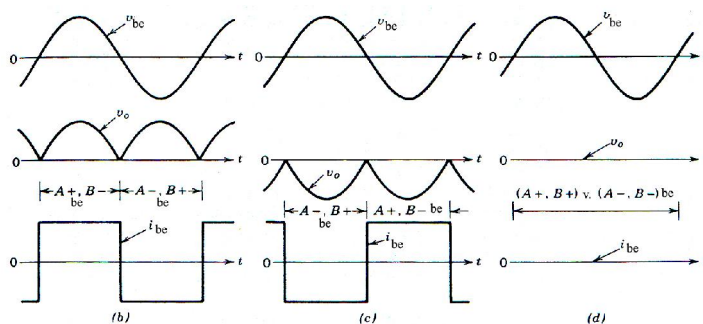
- U ovom slučaju je napon međukola visokofrekvencijski naizmenični napon (ne talasajući jednosmerni napon, kao u prethodnom slučaju).
- Prekidanje se vrši pri prolascima napona međukola kroz nulu radi smanjenja prekidačkih gubitaka.
- S obzirom na naizmenični karakter napona, treba da se koriste bilateralni prekidači.



146

2.5.5.b PRETVARAČI SA VISOKOFREKVENCIJSKIM MEĐUKOLOM I REGULACIJOM BROJA CELIH PERIODA – ANALIZA RADA

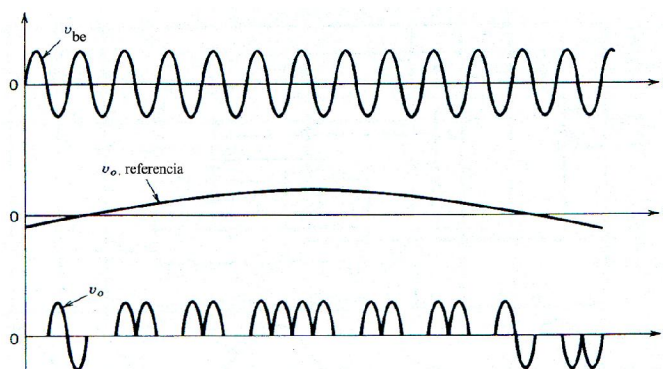
- Ulazni sinusni napon se u jednom intervalu usmerava na jednu stranu, u drugom intervalu na drugu stranu, u trećem intervalu se ne vodi ništa na izlaz.
- Na taj način se može formirati niskofrekvencijski naizmenični napon na izlazu.



147

2.5.5.c PRETVARAČI SA VISOKOFREKVENCIJSKIM MEĐUKOLOM I REGULACIJOM BROJA CELIH PERIODA – REGULACIJA

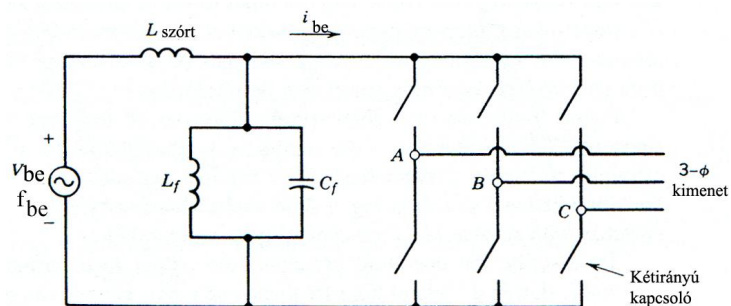
- Koristi se odgovarajući niskofrekvencijski sinusni referentni napon, da bi se odlučilo na koju stranu će se propustiti pojedine poluperiode.



148

2.5.5.d PRETVARAČI SA VISOKOFREKVENCIJSKIM MEĐUKOLOM I REGULACIJOM BROJA CELIH PERIODA – PRIMENA NA TROFAZNI INVERTOR

- Potrebna su šest bilateralnih prekidača.
- Zahvaljujući rezonantnom kolu L_f , C_f visokofrekvencijsku naizmeničnu struju ne treba obezbediti iz ulaznog izvora.



149

Kraj 2. glave

**(OSNOVNI PRETVARAČI -
PRINCIPI RADA)**