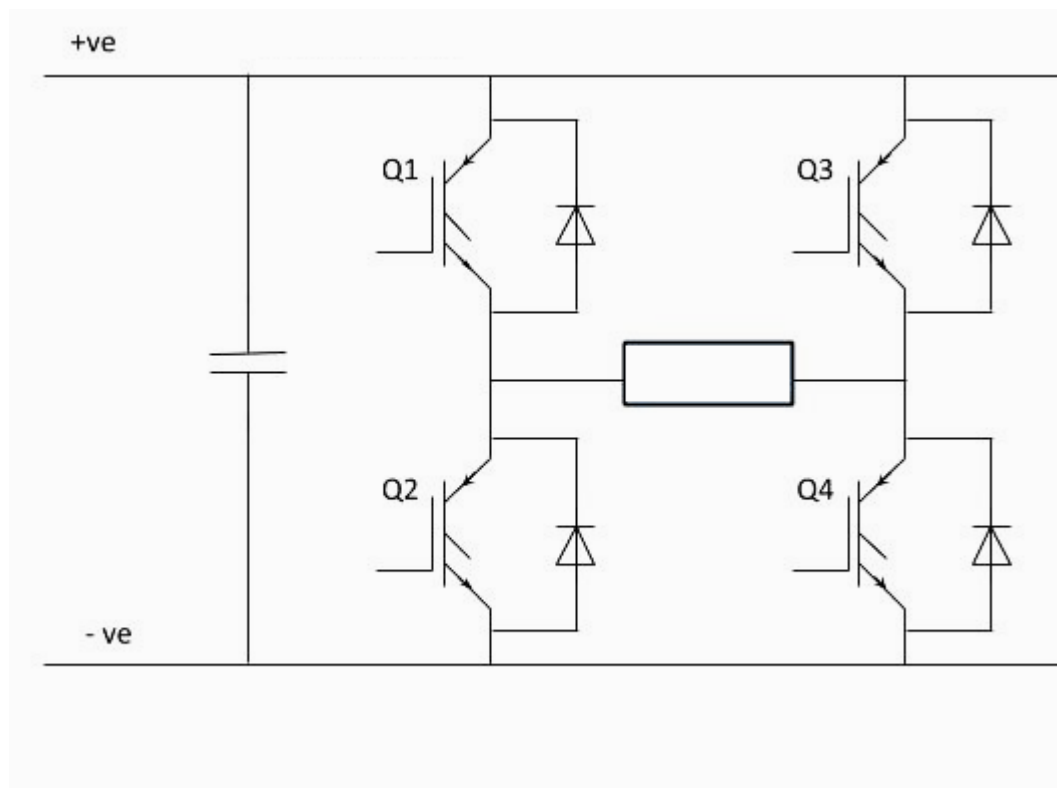




DC/AC pretvarači - INVERTORI

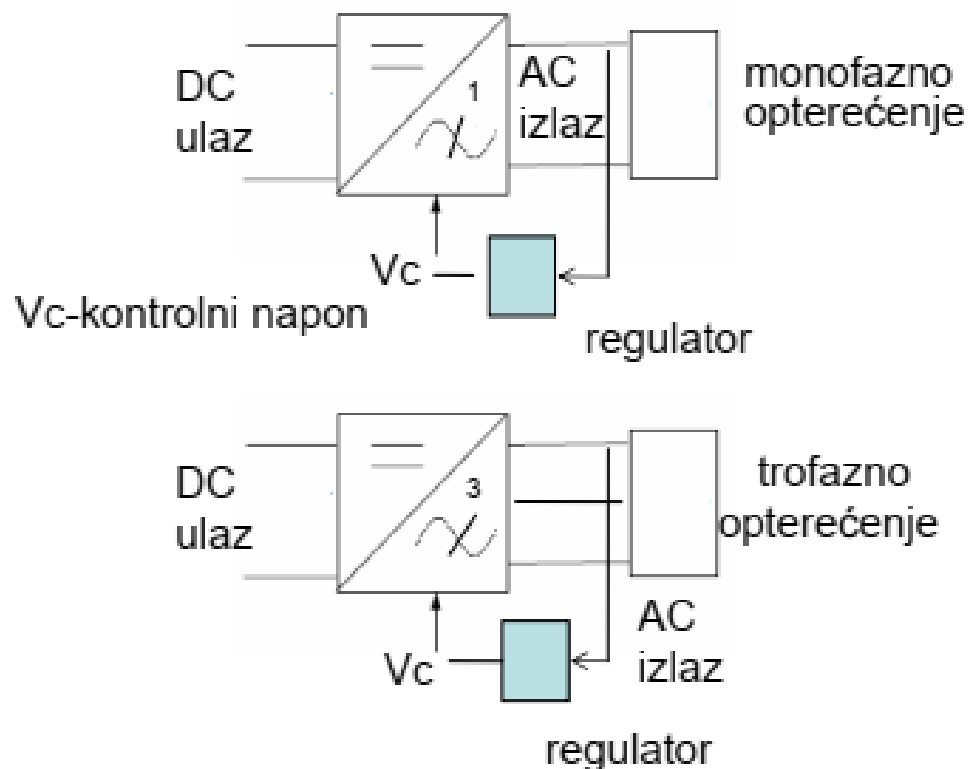


UVOD

- Invertori su DC/AC prekidački elektroenergetski pretvarači koji se koriste za napajanje potrošača naizmeničnim naponom promenljive efektivne vrednosti i/ili promenljive učestanosti.
- Prema načinu napajanja opterećenja invertori mogu biti naponski (*voltage source inverters* – VSI) ili strujni (*current source inverters* – CSI).
- U ovoj prezentaciji su analizirane topologije i funkcionisanje naponskih invertora.
- Izlazni napon naponskog invertora sastoji se od povorke bipolarnih naponskih impulsa koji se oblikuju procesom modulacije trajanja impulsa
- Upotrebom prostoperiodičnog modulišućeg signala, spektar izlaznog napona invertora će se sastojati od osnovnog harmonika, što je ustvari željeni napon na opterećenju, i niza viših harmonika koji se odstranjuju filtrom propusnikom opsega niskih učestanosti.
- Oblast primene invertora je veoma široka a najčešće se koriste u regulaciji elektromotornih pogona, u sistemima besprekidnog napajanja, za napajanje potrošača iz baterijske banke sistema ili iz obnovljivih izvora energije, za prenos energije iz obnovljivih izvora energije u distributivnu mrežu itd.

PRIMENA-osnovne blok šeme

DC/AC pretvarači-INVERTORI

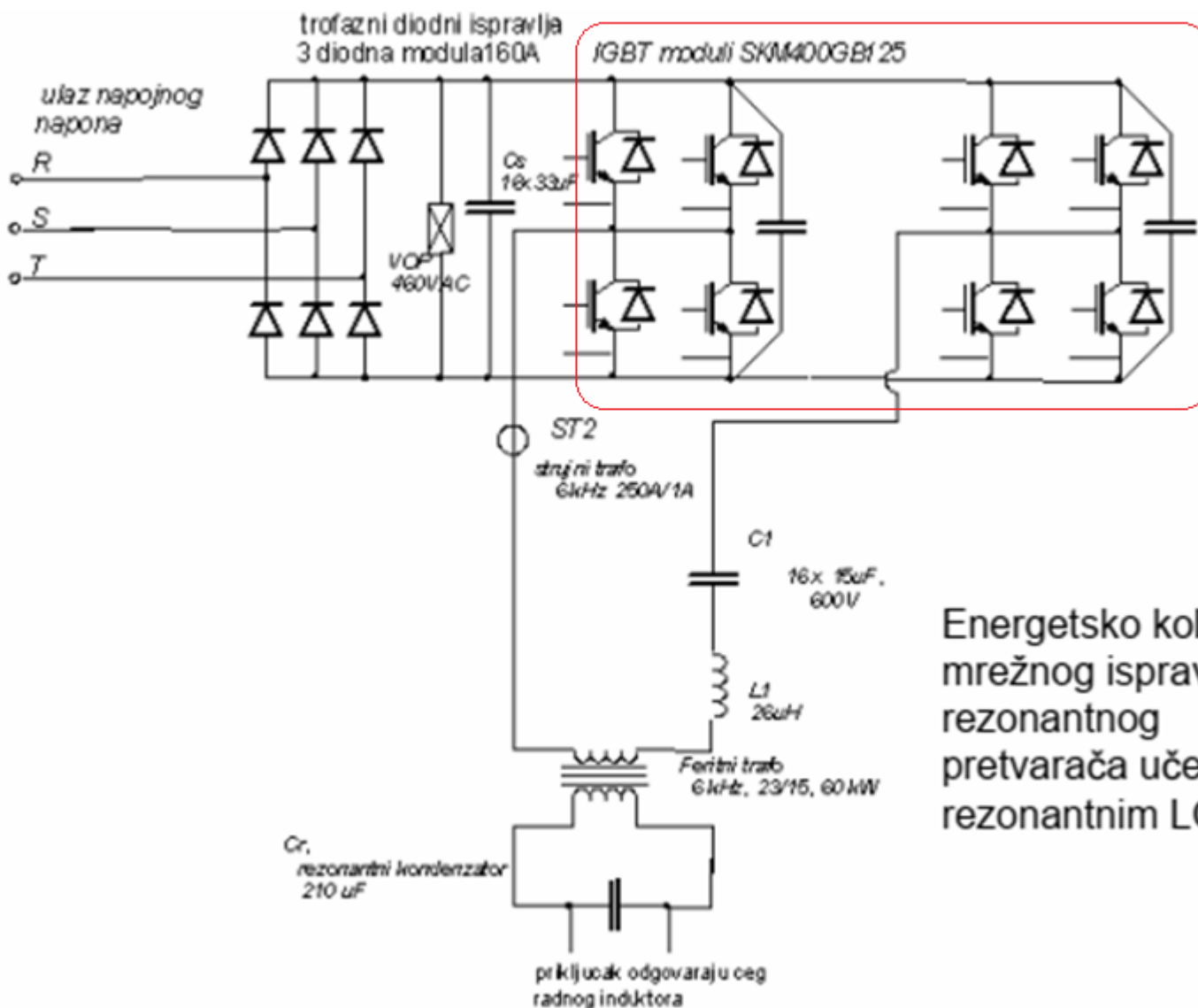


PRIMENA:

- regulisani motorni pogoni
- kućne aplikacije
- el.vuča
- DC transmisije

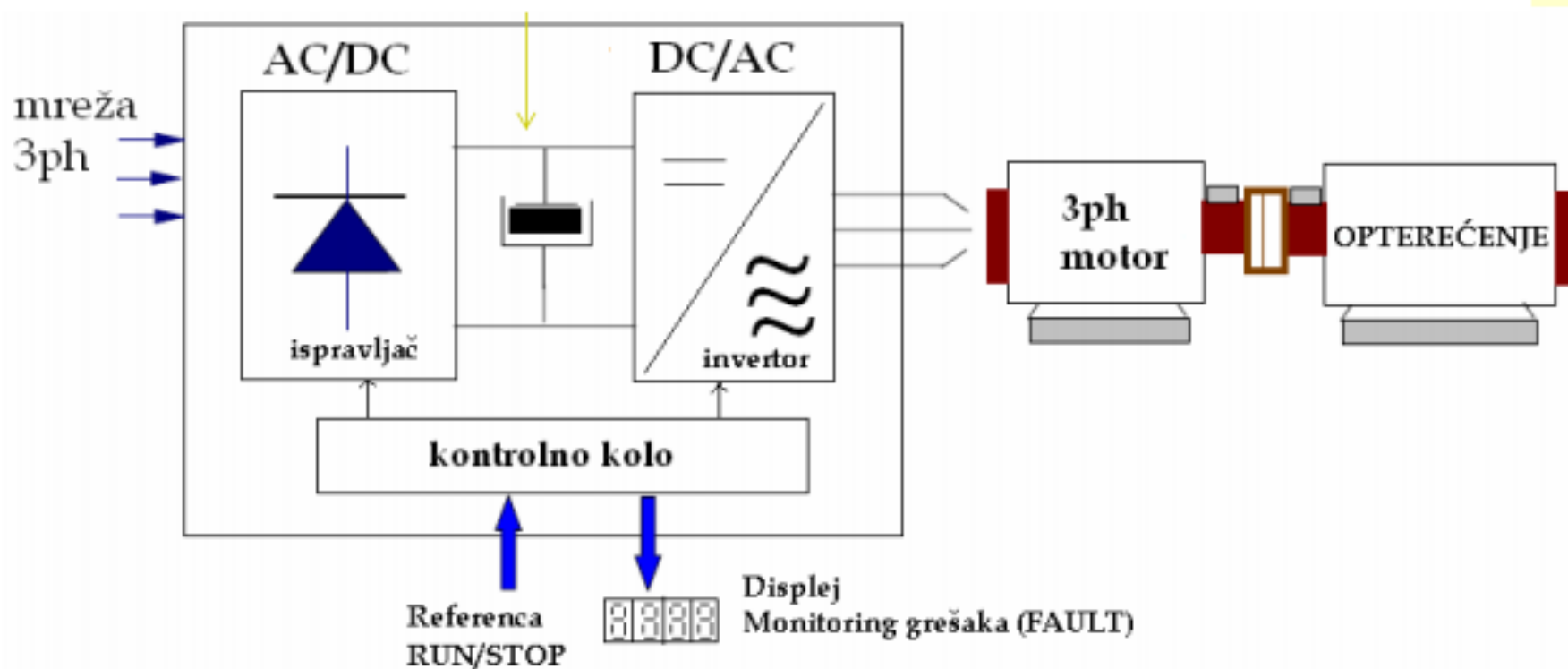
DC ulaz: jednosmerni izvori napajanja, izlaz ispravljačkih jedinica, solarne ćelije, DC vetrogeneratori, baterije, gorivne ćelije

REZONANTNI MONOFAZNI INVERTOR ZA INDUKCONO ZAGREVANJE



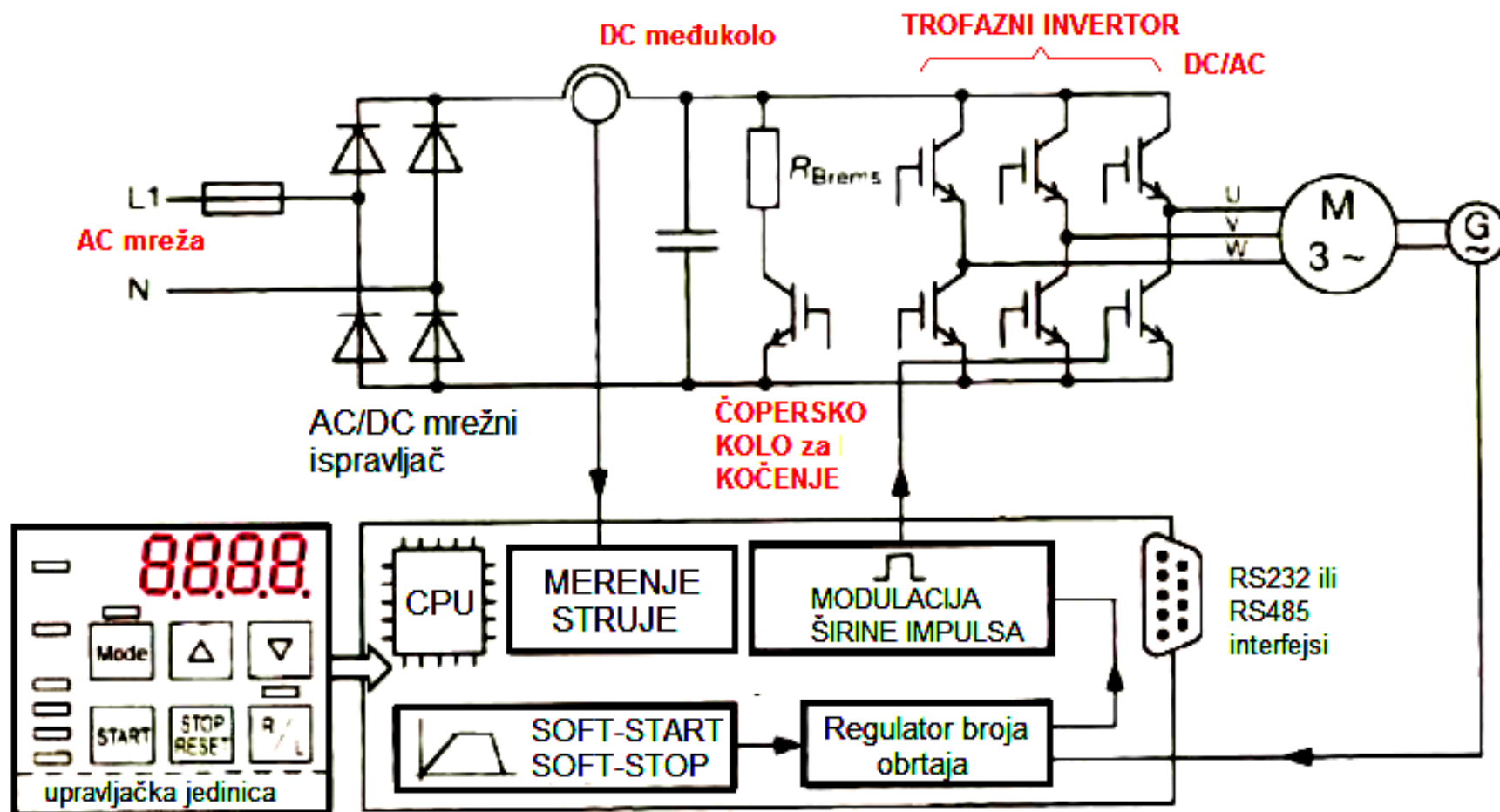
Energetsko kolo trofaznog mrežnog ispravljača i rezonantnog pretvarača učestanosti sa rezonantnim LC kolom

PRIMENA u AC REGULISANIM POGONIMA



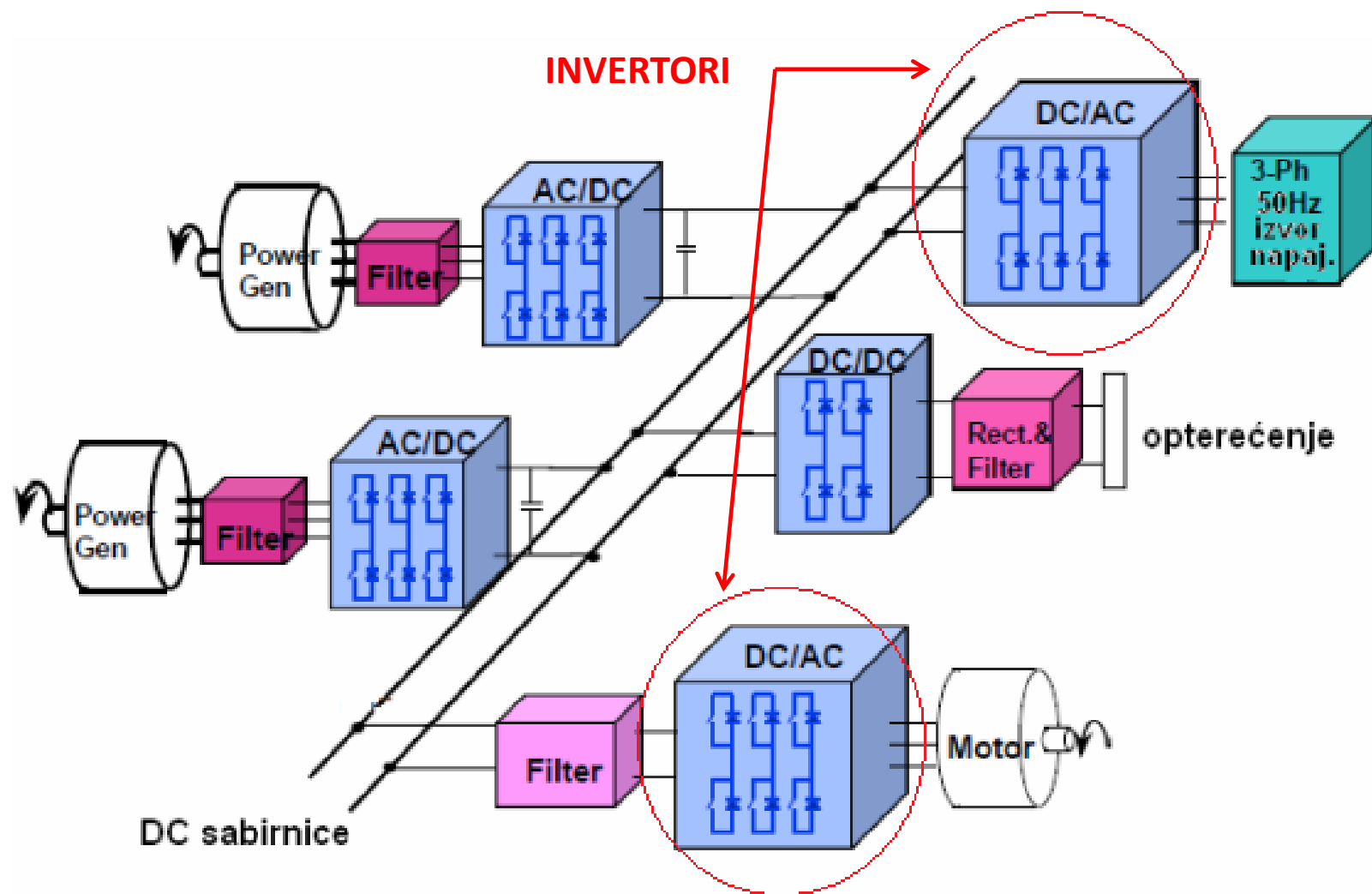
- DVA PRETVARANJA ENERGIJE AC-DC i **DC/AC** ISPRAVLJAČ, DC MEĐUKOLO, **INVERTOR**
- Pored toga, reakcija invertora na promene regulacionog zahteva je toliko brza da se može smatrati da odgovara na trenutne vrednosti naizmenične reference.

TROFAZNI INVERTOR(frekventni regulator) ZA REGULACIJU BRZINE ASINHRONOG MOTORA

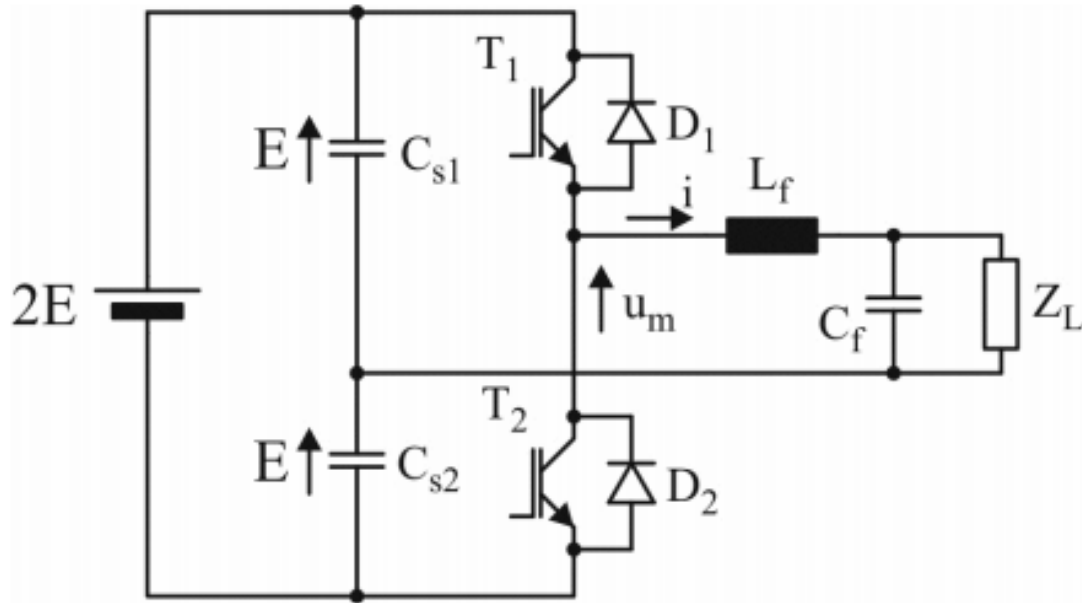


PRIMENA U SISTEM U ENERGETSKIH PRETVARAČA-

Koncentrisani DC BUS sistem

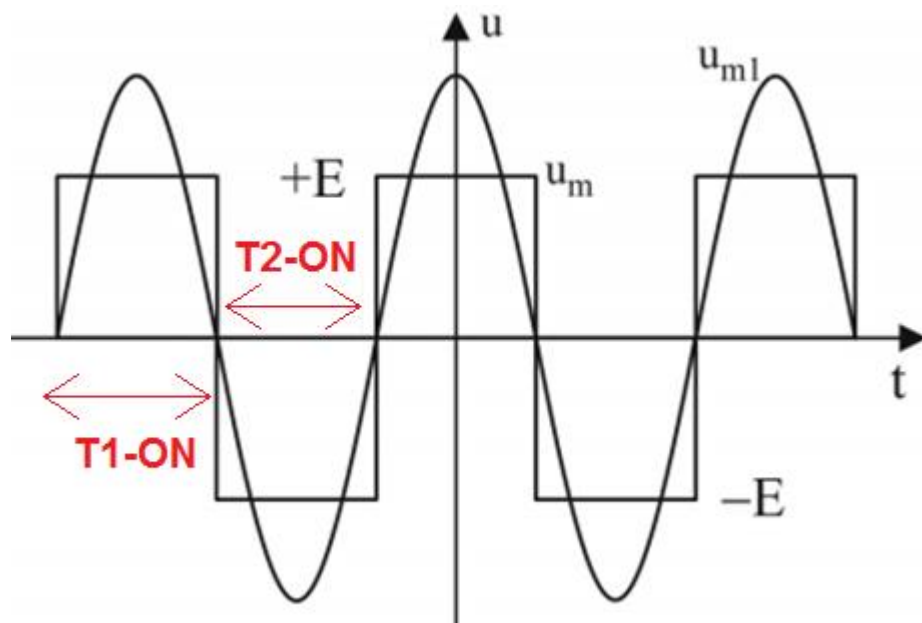
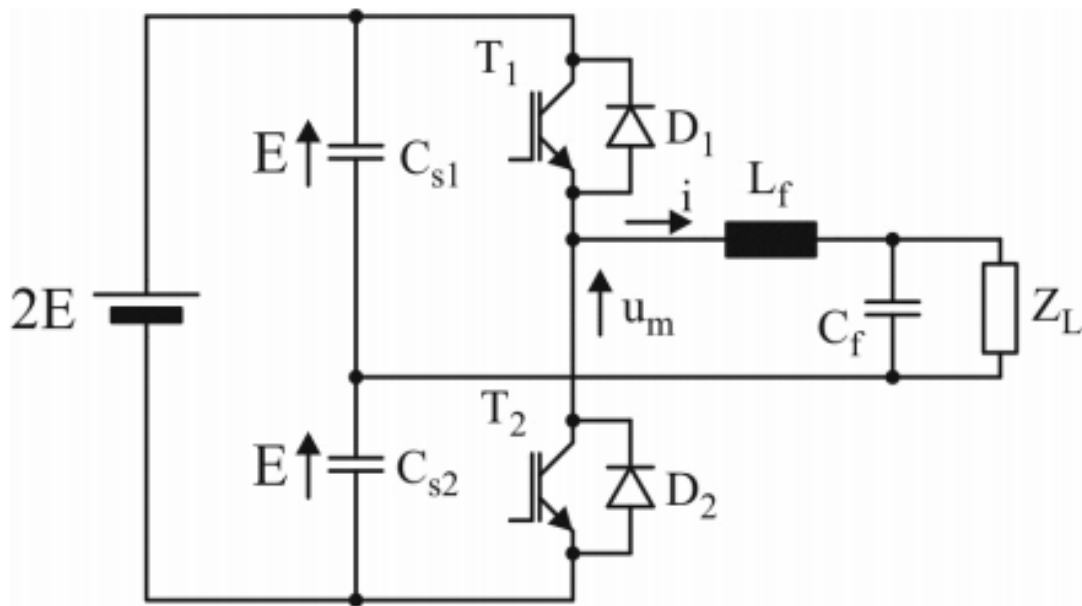


MONOFAZNI POLUMOSNI NAPONSKI INVERTOR-topologija



- U jednosmernom međukolu, na izvor jednosmernog napajanja ($2E$), priključena su dva redno vezana kondenzatora (C_{s1} i C_{s2}) čime se dobijaju dva naponska generatora napona „ E “.
- Uključenjem tranzistora T_1 izlazni napon invertora je $u=E$. Ako je izlazna struja i pozitivna, provodiće tranzistor T_1 , a ako je negativna, provodiće dioda D_1 .
- Uključenjem tranzistora T_2 izlazni napon invertora je $u=-E$. Ako je izlazna struja i pozitivna, provodiće dioda D_2 , a ako je negativna, provodiće tranzistor T_2 .

POLUMOSNI NAPONSKI INVERTOR-osnovni princip rada



Najjednostavniji način da se ostvari naizmenični napon na opterećenju jeste da se u toku jedne poluperiode drži uključen jedan tranzistor a u toku druge poluperiode drugi tranzistor tako da će izlazni napon invertora i njegov osnovni harmonik imati pravougaoni bipolarni talasni oblik.

$T_1 \rightarrow \text{ON} \text{ i } T_2 \rightarrow \text{OFF} \Rightarrow U_{\text{out}} = +E$

$T_2 \rightarrow \text{ON} \text{ i } T_1 \rightarrow \text{OFF} \Rightarrow U_{\text{out}} = -E$

HARMONICI

Osnovni harmonik izlaznog napona invertora je:

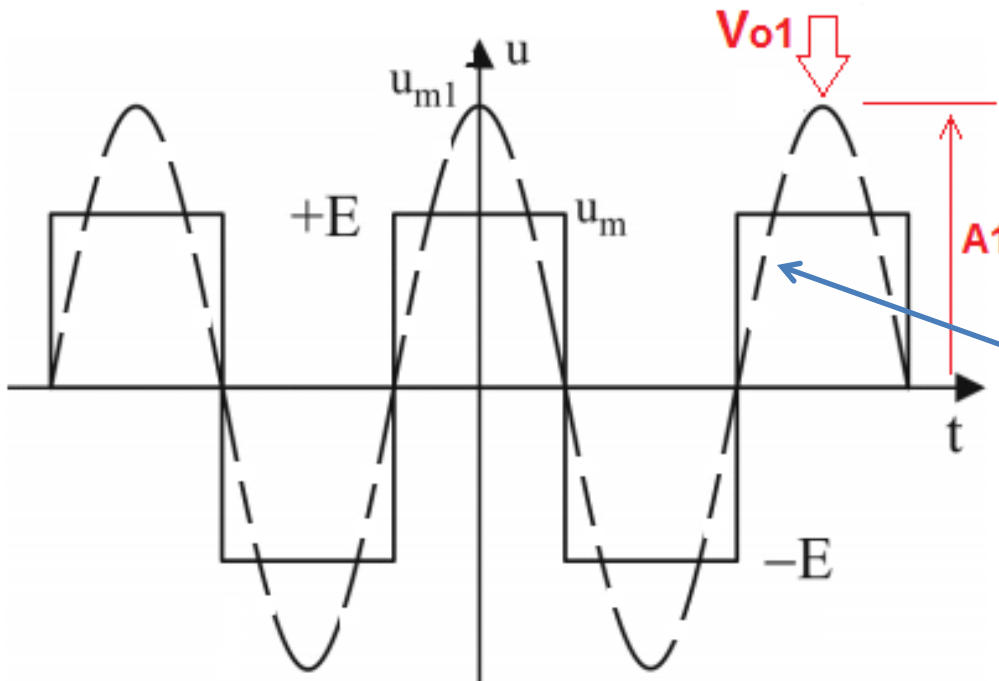
$$V_{01} = A_1 \cos(\omega t)$$

Amplituda osnovnog harmonika je:

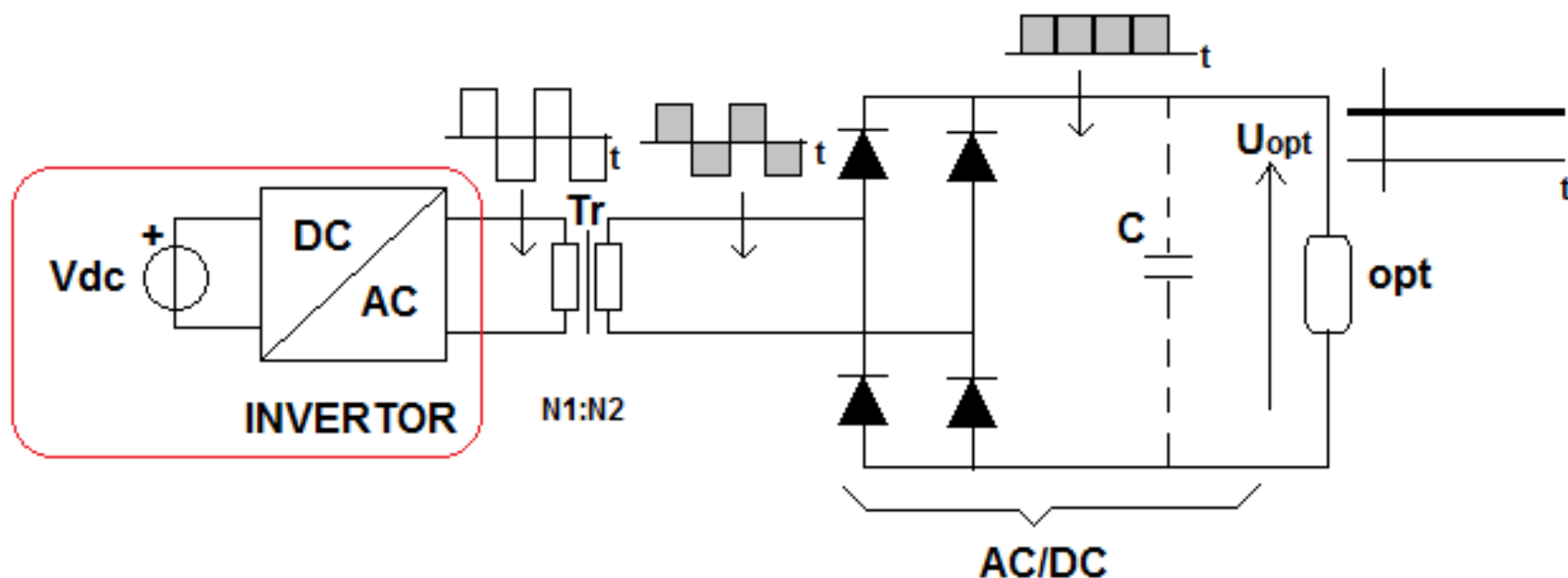
$$A_1 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} E \cos(x) dx = \frac{2}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} E \cos(x) dx = \frac{2E}{\pi} \sin(x) \Big|_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} = \frac{4E}{\pi}$$

Amplituda k-tog (višeg) harmonika je :

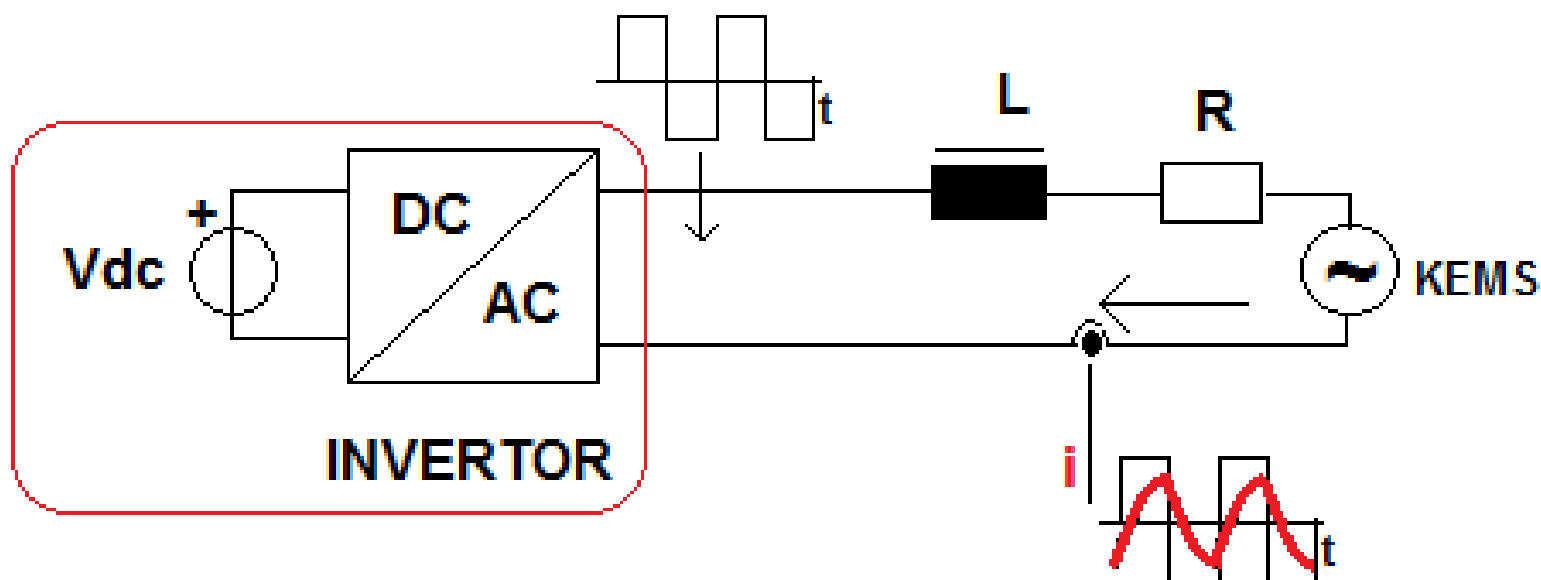
$$A_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} E \cos(kx) dx = \frac{1}{k} \cdot \frac{4E}{\pi} \quad k = 1, 3, 5, \dots \infty$$



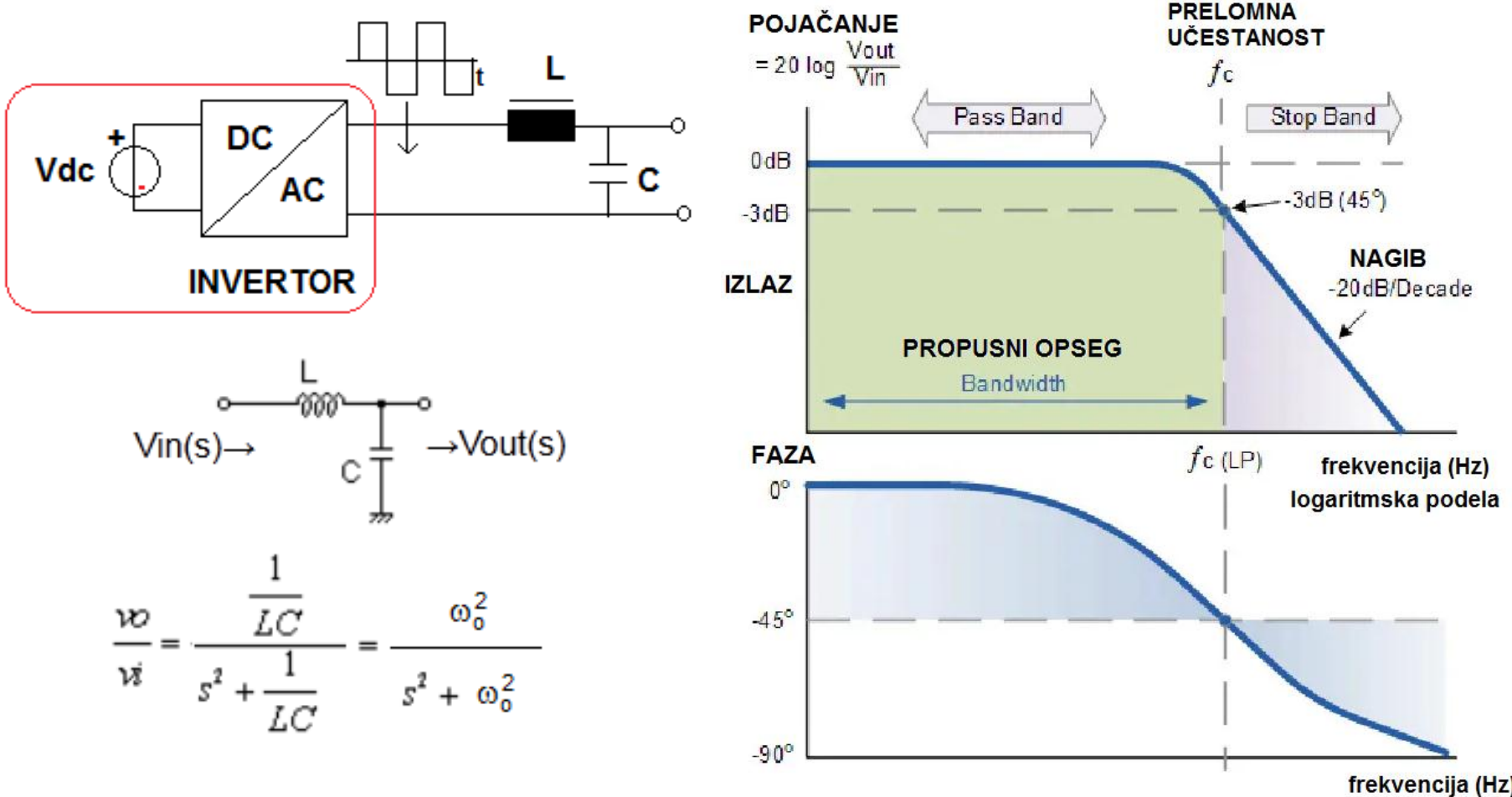
Pravougaoni, bipolarni izlazni napon invertora pogodan je za potrošače koji se na napajanje priključuju preko transformatora i diodnog ispravljača.



Pravougaoni, bipolarni izlazni napon invertora pogodan je za monofazne induktivne potrošače sa kvazi sinusnom strujom (elektromotor cirkulacione pumpe manje snage, elektromotor bušilice, pogoni sa komutatornim elektromotorima i sl.)



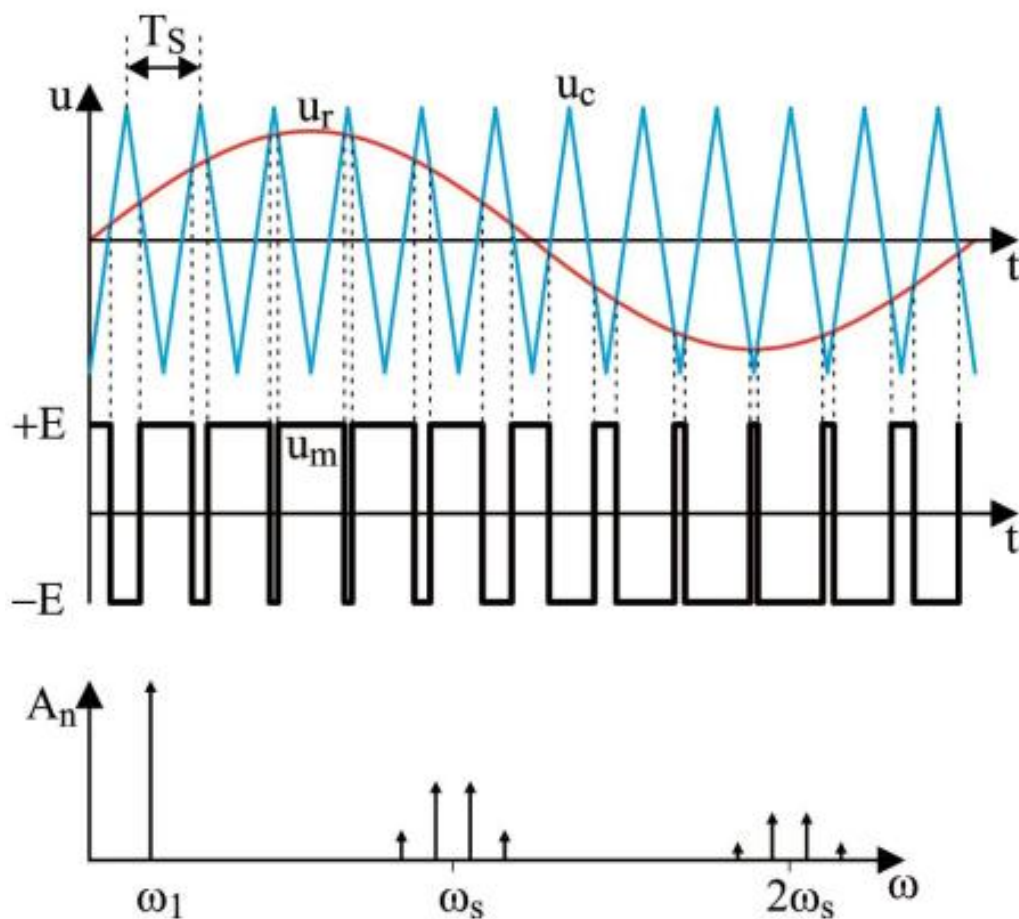
- Za potrošače koji zahtevaju prostoperiodičan napon napajanja prisustvo viših harmonika predstavlja harmonijska izobličenja koja treba odstraniti izlaznim LC filtrom.
- Prelomna učestanost filtra mora biti veća od učestanosti osnovnog harmonika kako ga ne bi oslabila.
- Zbog toga filter ima vrlo malo slabljenje za harmonike niskih učestanosti pa se ovi harmonici moraju otkloniti procesom modulacije trajanja impulsa tj. putem tzv. *Pulse Width Modulation* (PWM).



MODULACIJA TRAJANJA IMPULSA- BIPOLARNA MODULACIJA

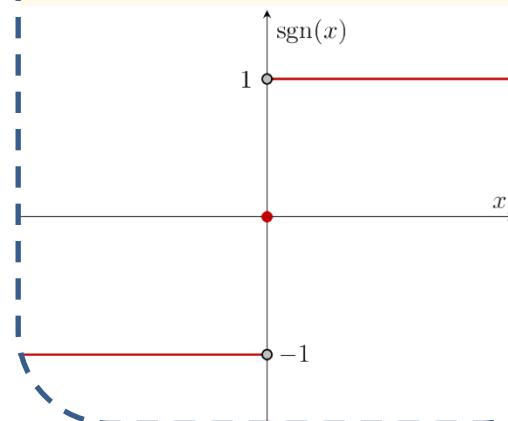
Modulacija položaja prednje i zadnje ivice impulsa prirodnim odabiranjem koji se može opisati matematičkim izrazom:

$$u_m(t) = \text{sgn}[u_r(t) - u_c(t)] \cdot E$$

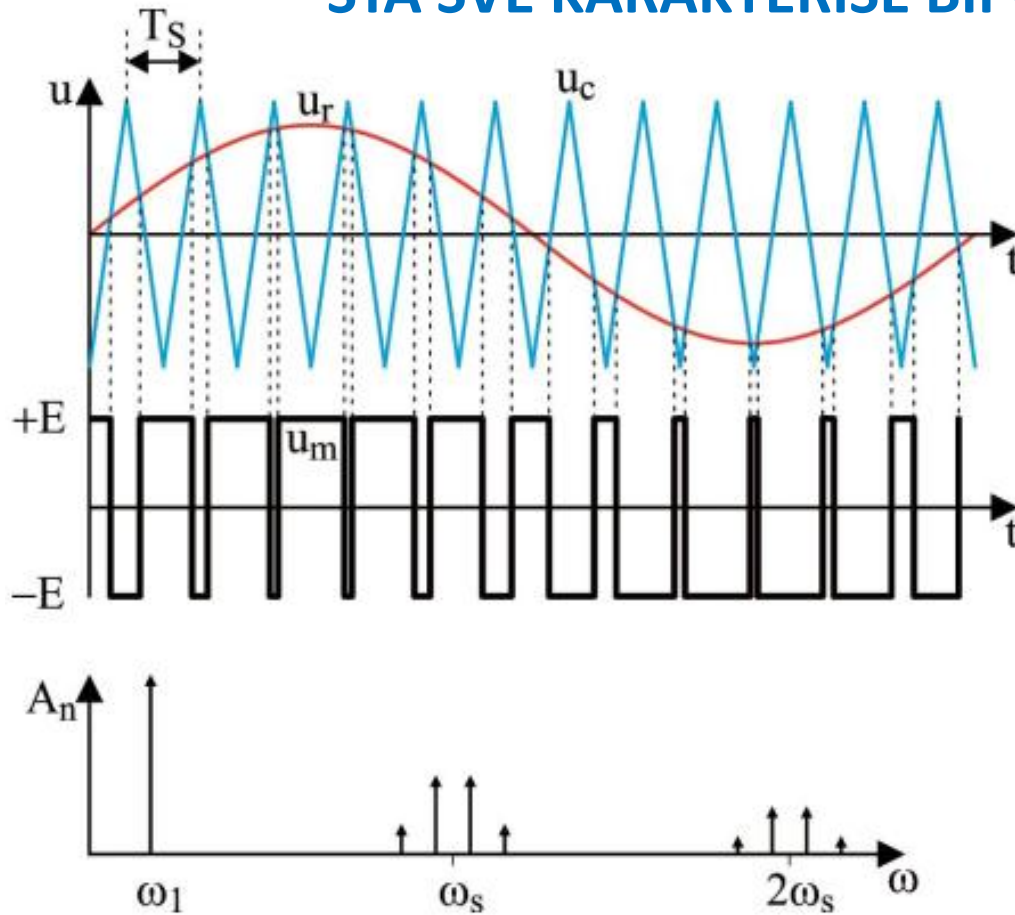


sign (x)=????

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} \frac{|x|}{x} \text{ ili } \frac{x}{|x|}; & x \neq 0 \\ 0 & ; x = 0 \end{cases}$$
$$= \begin{cases} -1; & x < 0 \\ 0; & x = 0 \\ 1; & x > 0 \end{cases}$$

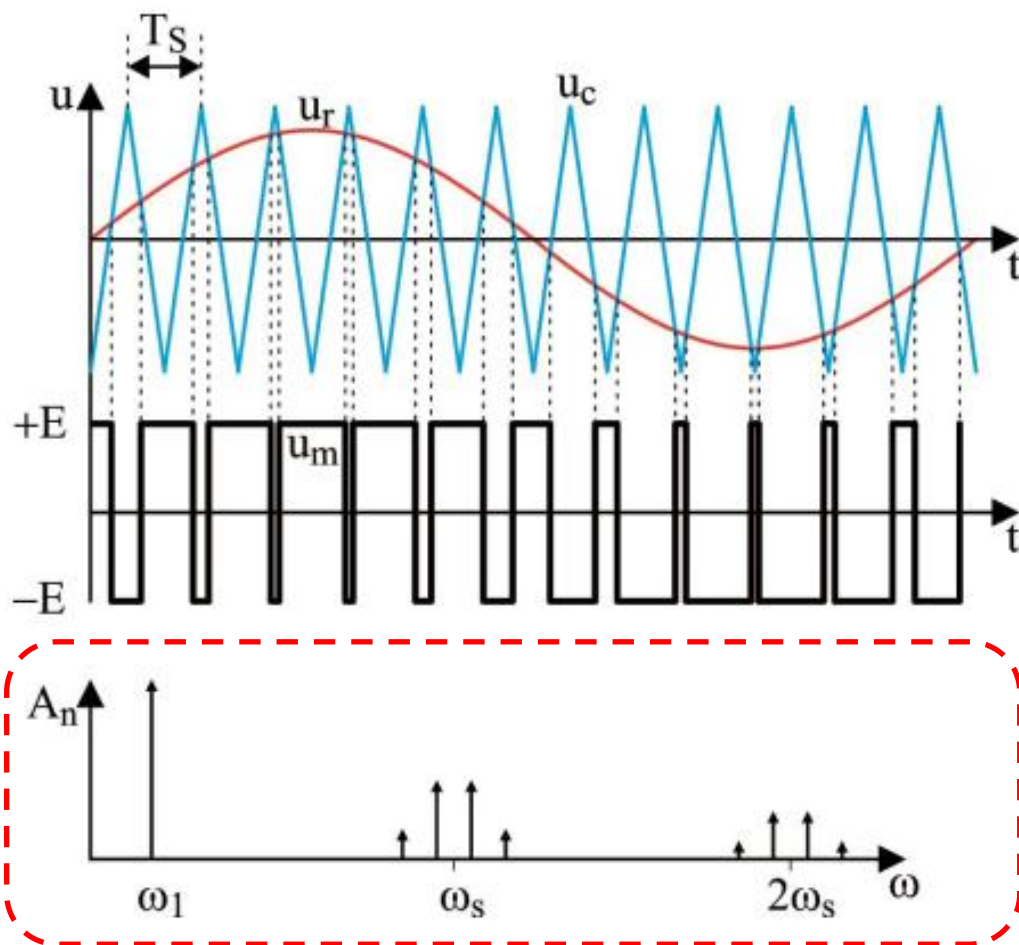


ŠTA SVE KARAKTERIŠE BIPOLARNU MODULACIJU???



- modulišući signal (U_r),
- nosilac (U_c),
- perioda odabiranja (T_s),
- modulisani signal (U_m)
- spektar izlaznog napona invertora

S obzirom na to da se izlazni napon invertora menja od $+E$ do $-E$ ovakav tip modulacije naziva se bipolarna modulacija. Odnos maksimalnih trenutnih vrednosti modulišućeg signala i nosioca naziva se indeks modulacije.



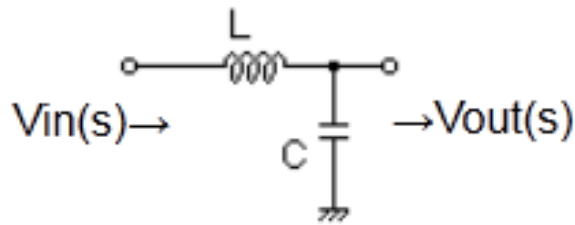
-Spektar izlaznog napona invertora

se sastoji od osnovnog harmonika i niza viših harmonika grupisanih oko harmonika čija je učestanost celobrojni umnožak učestanosti odabiranja (ω_s).

-U spektru mogu postojati samo neparni harmonici jer je ispunjen uslov $f(t+T/2) = -f(t)$

-Kako je u prikazanom primeru $\omega_s = 12 \omega_1$, sledi da ne postoje harmonici na učestanosti $\omega = k\omega_s$ jer bi to bili parni harmonici.

IZRAČUNAVANJE SLABLJENJA LC- filtra



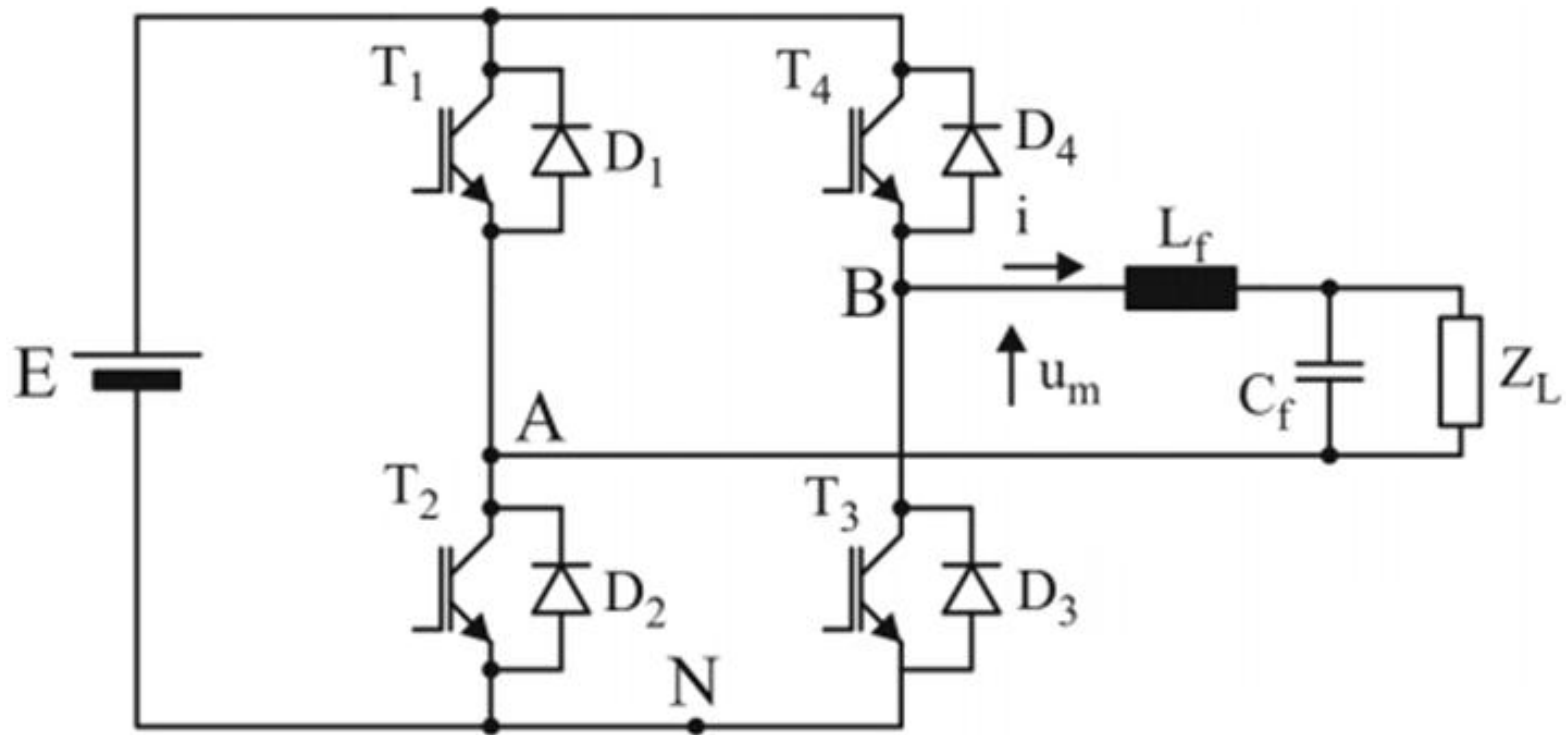
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{LC}} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \omega_0^2} \quad \left\{ \begin{array}{l} s = j\omega \\ s^2 = -\omega^2 \end{array} \right. \quad \frac{V_o}{V_i} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \omega_0^2} = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} = \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} = -\frac{1}{\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1} \quad \Rightarrow \quad \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1}$$

$$\left| \frac{V_o}{V_i} \right| \approx \frac{1}{\frac{\omega^2}{\omega_0^2}} = \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \quad \text{za } \omega \gg \omega_0$$

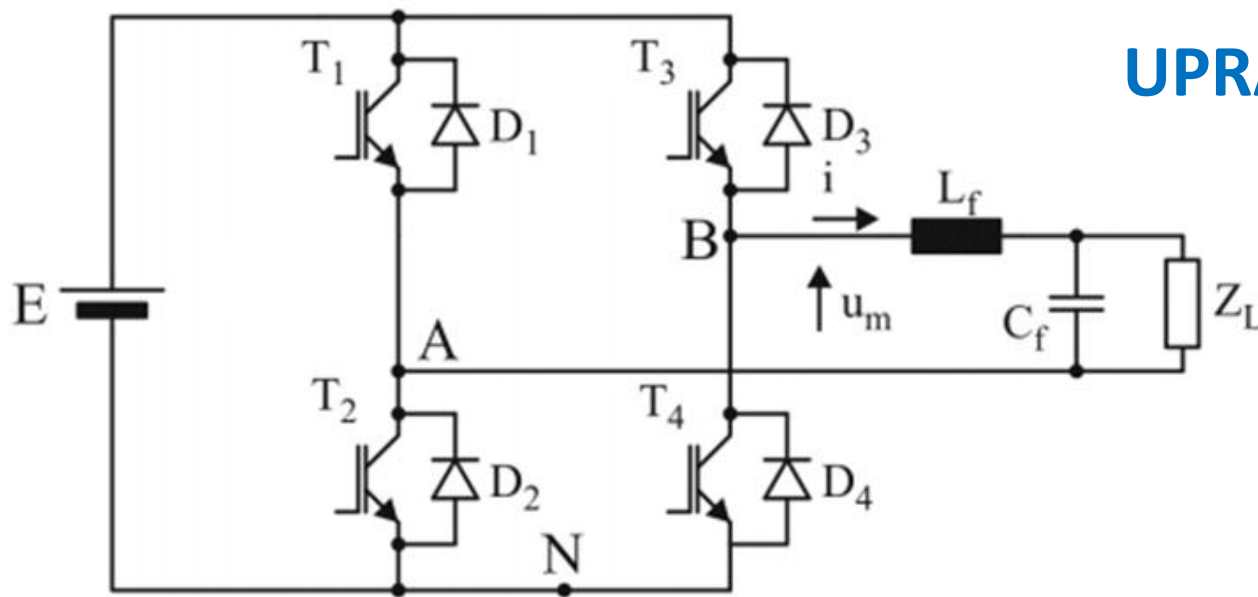
Učestanost odabiranja ($\omega_s = 5\text{ kHz} \dots 20\text{ kHz}$) i mnogo je veća od učestanosti osnovnog harmonika (obično 50 Hz ili 50 Hz), iz prenosne funkcije sledi da će harmonijska izobličenja napona na opterećenju biti veoma mala.

MONOFAZNI MOSNI NAPONSKI INVERTOR-topologija



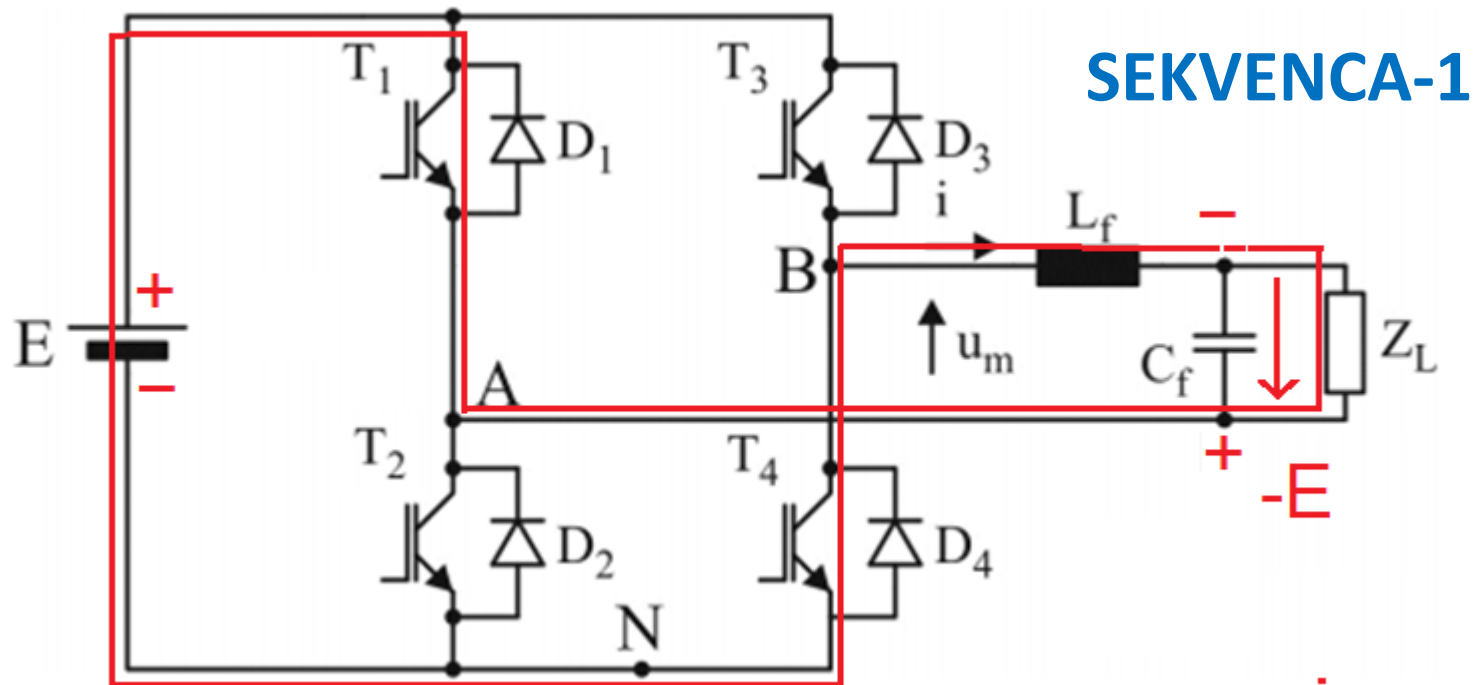
Za razliku od polumosnog invertora čiji izlazni napon može imati dva naponska nivoa ($+E$ i $-E$), izlazni napon mosnog invertora, može imati tri naponska nivoa !!!!

UPRAVLJANJE



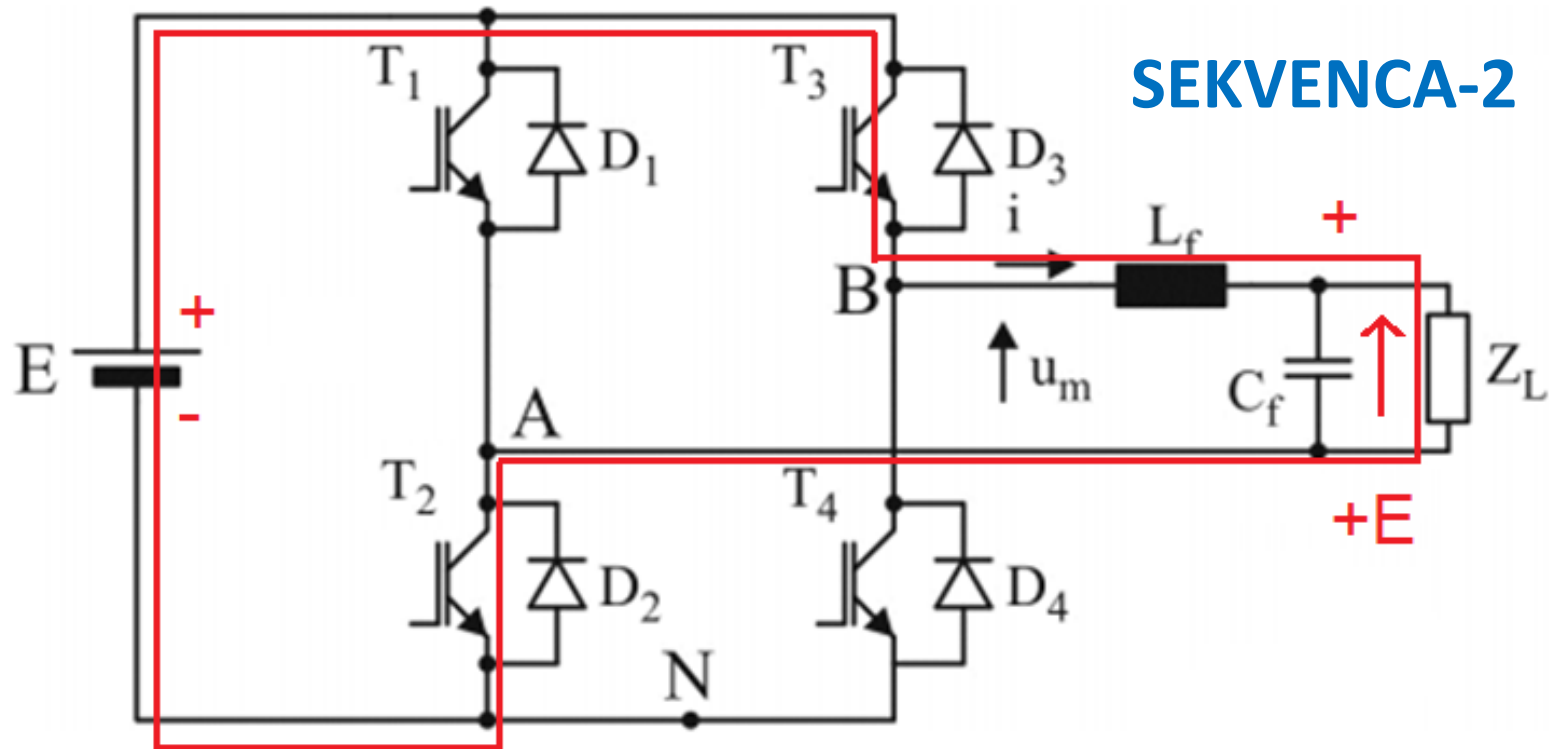
T1	T2	T3	T4	u
ON	OFF	OFF	ON	-E
OFF	ON	ON	OFF	+E
ON	OFF	ON	OFF	0
OFF	ON	OFF	ON	0

U cilju smanjenja harmonijskih izobličenja, kod ove topologije invertora, mogu se primeniti dva načina modulacije trajanja impulsa. Prvi način upravljanja je da se istovremenim uključenjem i isključenjem parova tranzistora T1-T4 i T2-T3 postigne bipolarna modulacija kao kod polumosnog monofaznog naponskog invertora.



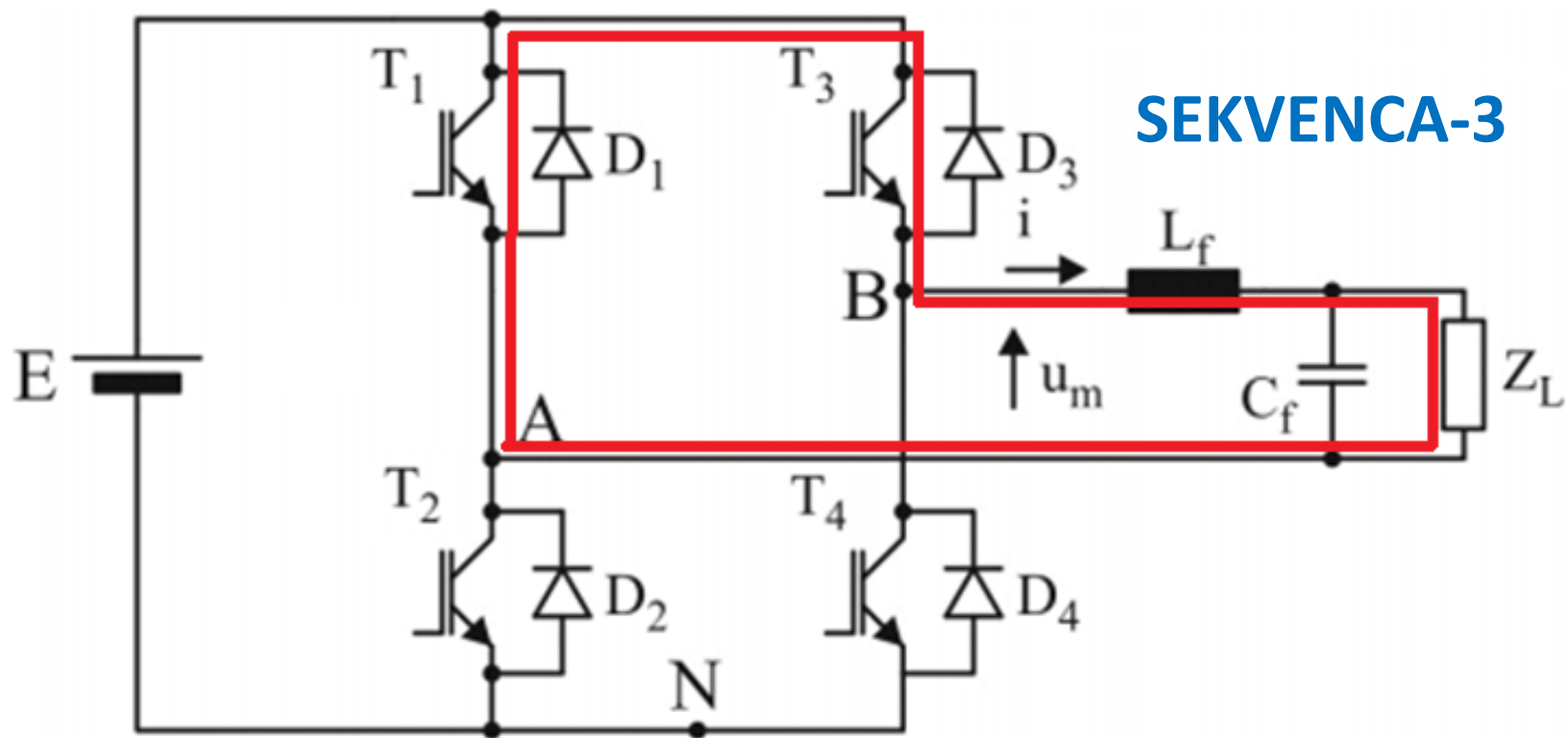
SEKVENCA-1

T1	T2	T3	T4	u
ON	OFF	OFF	ON	-E
OFF	ON	ON	OFF	+E
ON	OFF	ON	OFF	0
OFF	ON	OFF	ON	0



T1	T2	T3	T4	u
ON	OFF	OFF	ON	$-E$
OFF	ON	ON	OFF	$+E$
ON	OFF	ON	OFF	0
OFF	ON	OFF	ON	0

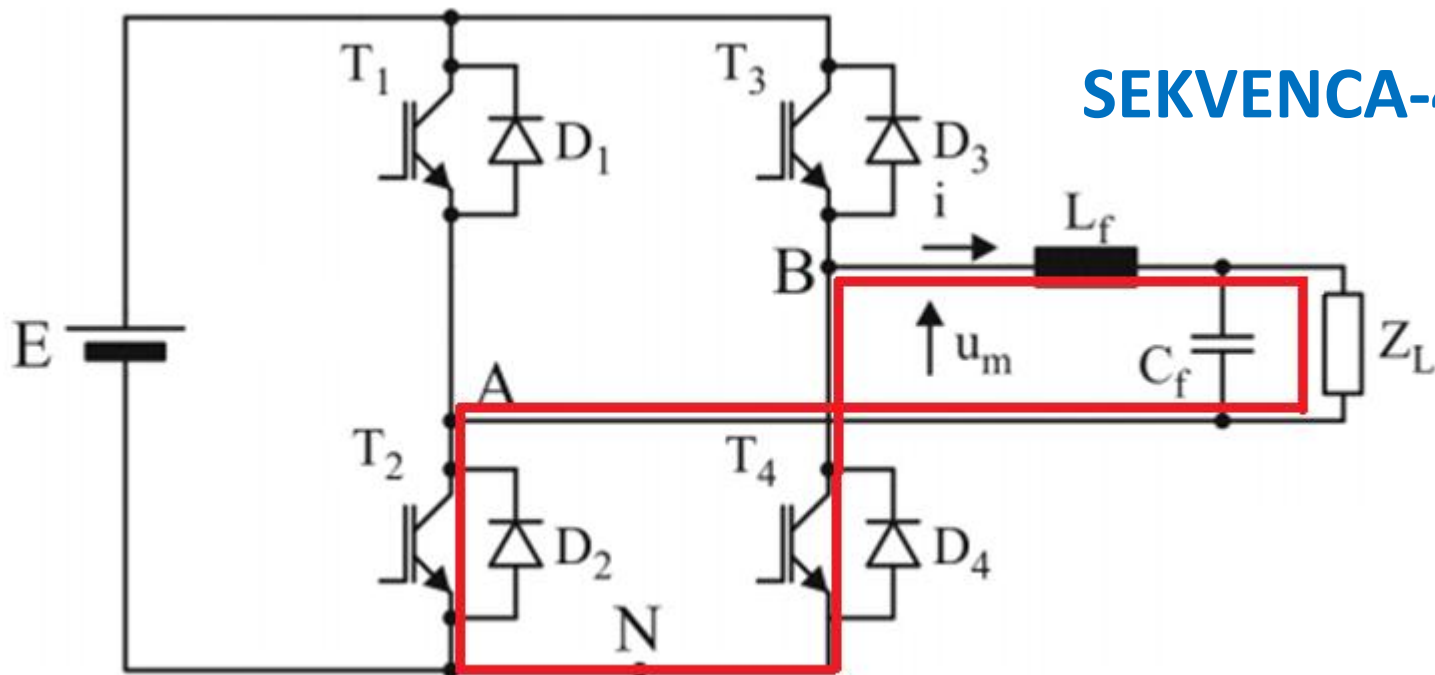
SEKVENCA-2



T1	T2	T3	T4	u
ON	OFF	OFF	ON	$-E$
OFF	ON	ON	OFF	$+E$
ON	OFF	ON	OFF	0
OFF	ON	OFF	ON	0

SEKVENCA-3

SEKVENCA-4



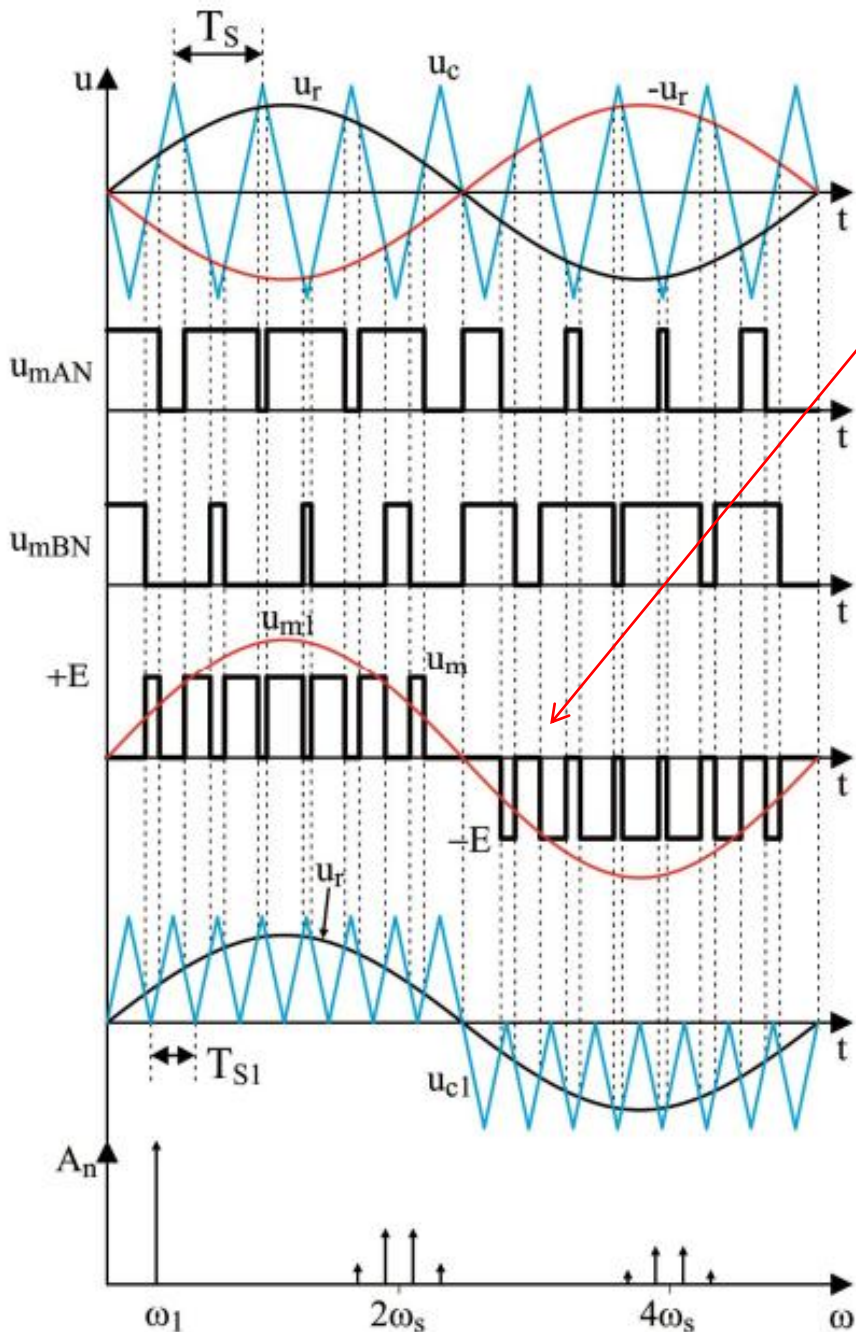
T1	T2	T3	T4	u
ON	OFF	OFF	ON	$-E$
OFF	ON	ON	OFF	$+E$
ON	OFF	ON	OFF	0
OFF	ON	OFF	ON	0

SEKVENCA-4



-Na ovaj način dobijaju se modulisani naponi U_{mAN} i U_{mBN} .

$$u_m = u_{mAN} - u_{mBN}$$

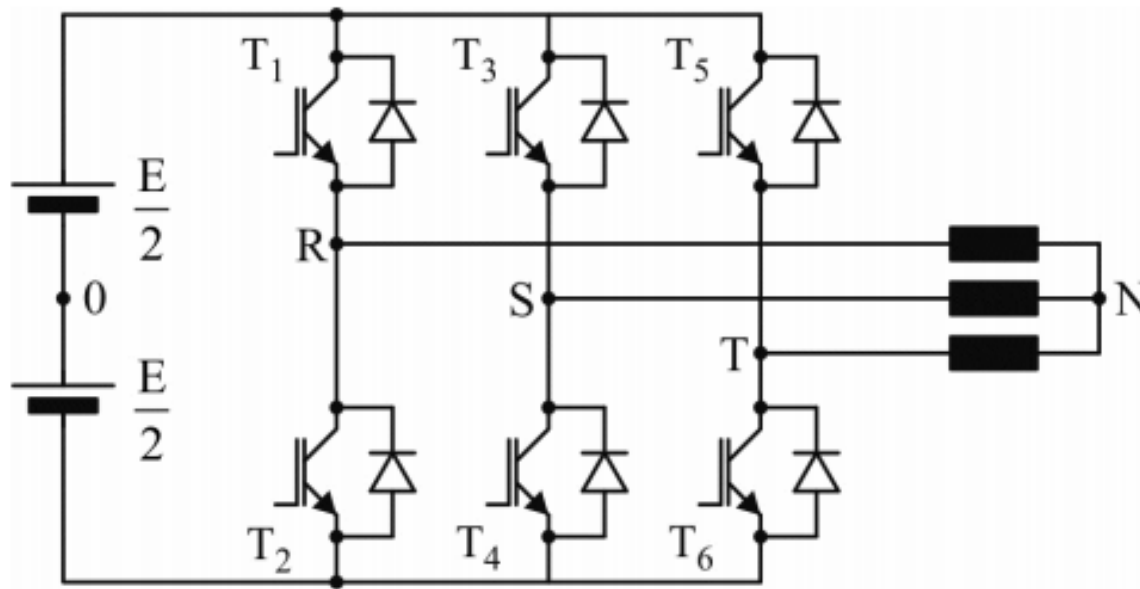


-Izlazni napon invertora, u toku jedne poluperiode menja od 0 do $+E$ a u drugoj poluperiodi od 0 do $-E$ zbog čega se ovaj način modulacije trajanja impulsa naziva unipolarna modulacija.

-Modulisani izlazni napon invertora istog je oblika i kao da je vršena unipolarna modulacija nosiocem (U_{c1}) dvostruko veće učestanosti (ω_{s1}) pa se viši harmonici pojavljuju grupisani oko učestanosti $n\omega_{s1} = 2n\omega_s$ ($n=1, 2, \dots$).

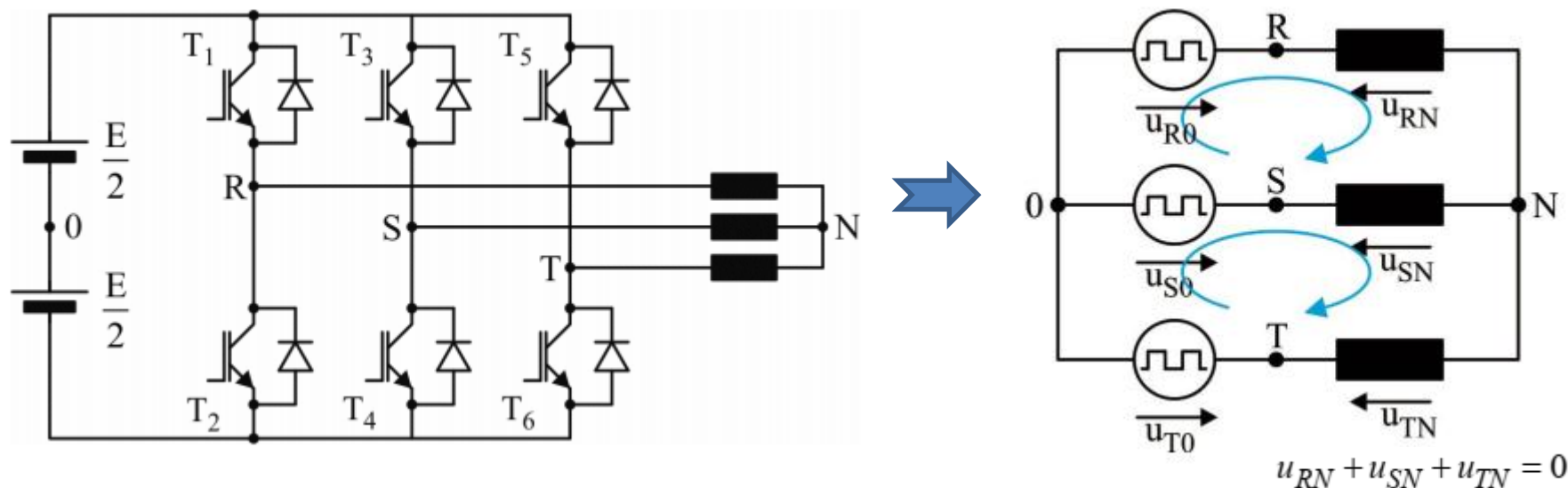
-Prednost ovog načina modulacije je i to što su promene izlaznog napona invertora po poluperiodi dvostruko manje ($0 \dots E$) nego kod bipolarne modulacije ($-E \dots +E$)

TROFAZNI INVERTORI



- Trofazni invertori koriste se za napajanje trofaznih potrošača.
- Najjednostavnija topologija trofaznog naponskog invertora se sastoji se tri monofazna polumosna naponska invertora koji, u odnosu na tačku referentnog potencijala u DC međukolu (0), stvaraju tri napona čiji su osnovni harmonici fazno pomereni za 120° , čineći simetričan trofazni sistem.
- I kod trofaznih invertora, smanjenje harmonijskih izobličenja izlaznog napona postiže se primenom raznih metoda modulacije trajanja impulsa.
- Radi lakšeg razumevanja osnovnih funkcija trofaznih invertora, u nastavku će analiziran rad invertora bez modulacije trajanja impulsa

EKVIVALENTNA ŠEMA SA OPTREĆENJEM VEZANIM U „zvezdu“



Naponske jednačine koje važe za označene konture:

$$u_{R0} - u_{RN} + u_{SN} - u_{S0} = 0$$

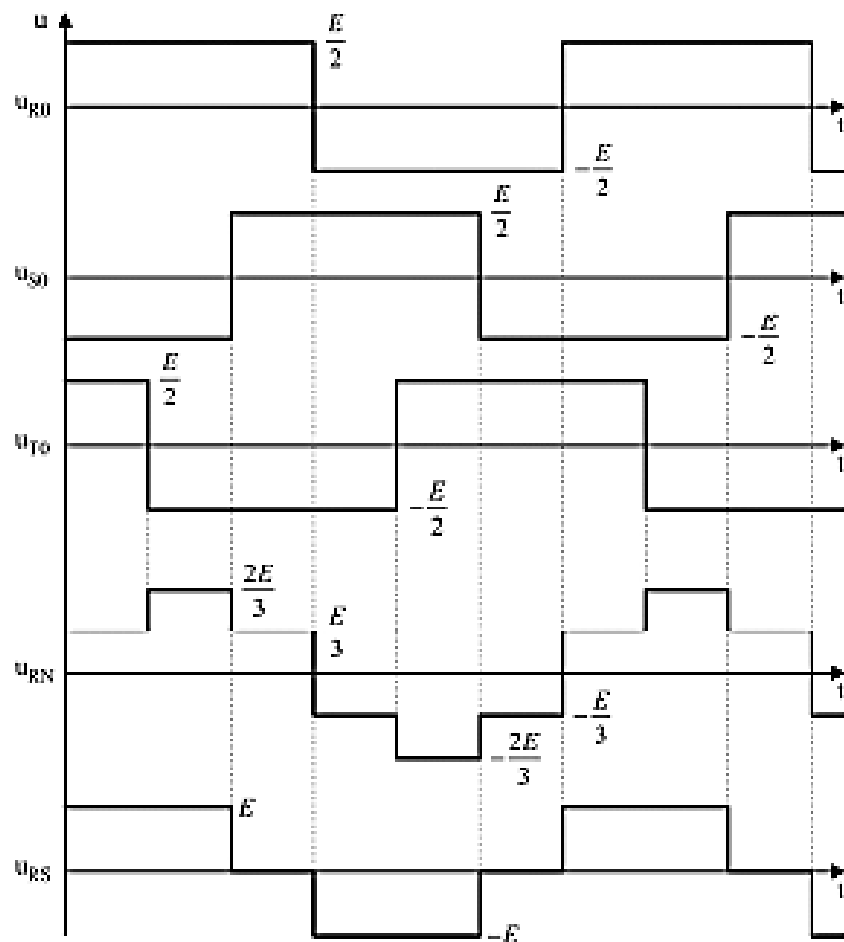
$$u_{S0} - u_{SN} + u_{TN} - u_{T0} = 0$$

$$u_{RN} = \frac{1}{3}(2u_{R0} - u_{S0} - u_{T0})$$

$$u_{RS} = u_{R0} - u_{S0}$$

TALASNI OBLICI NAPONA?????

TALASNI OBLICI IZLAZNIH NAPONA (faznih i linijskih)



Izlazni naponi pojedinih monofaznih poluupravljivih invertora (u_{RU} , u_{SU} i u_{TU}) kao i jedan od faznih (u_{RN}) i linijskih napona na opterećenju (u_{RS}).

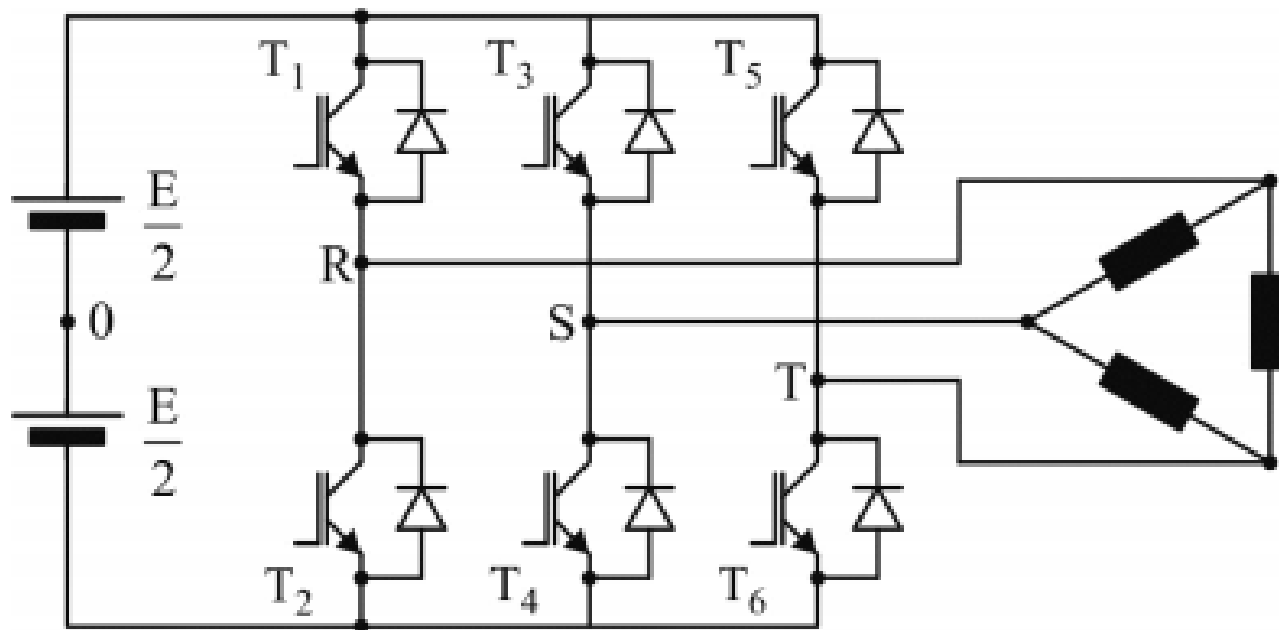
Razvojem u Furijeov red dobija se spektar faznog i linijskog napona na opterećenju:

$$u_{RN,k} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u_{RN} \sin(kx) dx = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{3}} \frac{E}{3} \sin(kx) dx + \frac{4}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \frac{2E}{3} \sin(kx) dx$$

$$u_{RN,k} = \frac{2E}{3k\pi} \left[2 + \cos\left(k \frac{\pi}{3}\right) - \cos\left(k \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

$$u_{RS,k} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u_{RN} \sin(kx) dx = \frac{4}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} E \sin(kx) dx = \frac{4E}{k\pi} \cos\left(k \frac{\pi}{6}\right)$$

Prethodno pomenuta topologija invertora može se koristiti i za napajanje opterećenja vezanih u trougao:



HVALA NA PAŽNJI!!!

PITANJA???



U Beogradu, Jun 2021.