

## 10. Prigušenje viših harmonika

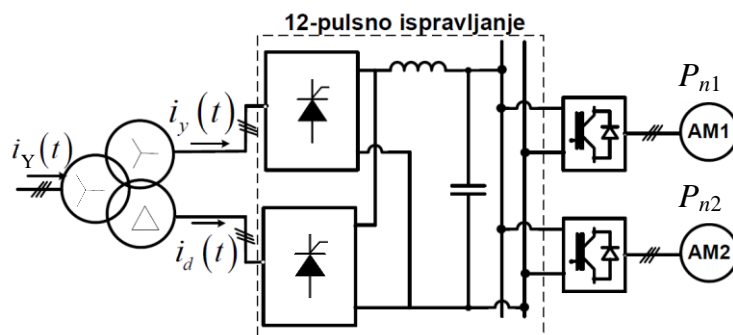
### 10.1 Osnovni načini za prigušenje viših harmonika

Osnovni načini za prigušenje ili potpunu eliminaciju viših harmonika struja i napona u elektroenergetskim sistemima su:

- ugradnja prigušnica na red sa nelinearnim potrošačima
- korišćenje transformatora sa odgovarajućim spregama
- modifikacija rezonantne frekvencije
- korišćenje pasivnih filtara
- korišćenje aktivnih filtara

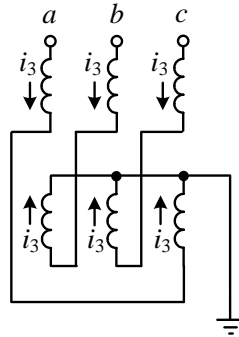
Najjednostavniji način redukcije viših harmonika struja koje proizvode nelinearni potrošači je ugradnja prigušnica na red sa nelinearnim potrošačima. Ovakav način prigušenja viših harmonika je posebno efikasan kod elektomotornih pogona regulisanih pomoću impulsno-širinski moduliranih (PWM) signala. Induktivnost smanjuje brzinu punjenja i pražnjenja kondenzatora na DC strani, tako da se smanjuje izobličenost struje regulisanog pogona. Prigušnica čija je snaga 3% prividne snage regulisanog elektromotornog pogona može smanjiti THD faktor izobličenja za 40%-80%.

Korišćenjem transformatora sa spregom namotaja u trougao blokira se tok trećeg harmonika i triplih harmonika (neparni umnošci trećeg harmonika ili neparni harmonici nultog redosleda). Transformatori imaju i tu prednost što se njihovim korišćenjem može ostvariti dvanaesto-pulsna konfiguracija za suzbijanje viših harmonika. U dvanaesto-pulsnoj konfiguraciji dva PWM regulisana elektromotorna pogona su vezana na transformator sa dva sekundarna namotaja, sprege Yd (moguća je i varijanta sa dva transformatora sa po jednim sekundarnim namotajem). Ako je broj navojaka sekundarnog namotaja vezanog u trougao  $\sqrt{3}$  puta veći od broja navojaka sekundarnog namotaja vezanog u zvezdu, eliminišu se 5. i 7. harmonik iz struje na primarnoj strani transformatora. Na ovaj način se može izbeći primena filtara za 5. i 7. harmonik kada postoji opasnost od rezonancija u blizini ovih učestanosti. Na slici 1 je prikazana jedna od standardnih dvanaesto-pulsnih konfiguracija napajanja sa zajedničkim kolom jednosmerne struje, primenjena kod višemotoronog pogona.



Slika 1: Dvanaesto-pulsna konfiguracija sa zajedničkim kolom jednosmerne struje za napajanje dva asinhrona motora sa PWM regulacijom

Cik-cak (zig-zag) transformatori sa uzemljenom neutralnom tačkom se često koriste za prigušenje trećeg i triplih harmonika u komercijalnim potrošačkim konzumima. Transformator sa cik-cak spregom namotaja obezbeđuje malu impedansu za treći i triple harmonike. Kod cik-cak transformatora namotaji su vezani u opoziciji. Zbog toga dolazi do poništavanja flukseva nultog redosleda (koji su posledica trećeg i triplih harmonika struja) u svakom paru povezanih polunamotaja. Na taj način se obezbeđuje mala impedansa za treće i triple harmonika. U ovom slučaju cik-cak transformator se koristi kao filter trećeg i triplih harmonika. Da bi bio efikasan, transformator sa cik-cak spregom namotaja treba da bude lociran što bliže nelinearnom potrošaču. Na slici 2 je prikazan cik-cak transformator za prigušenje trećeg i triplih harmonika.



Slika 2: Zig-zag transformator za prigušenje trećeg i triplih harmonika

Modifikovanje rezonantne frekvencije sistema je potrebno kada u distributivnom sistemu postoje baterije za kompenzaciju reaktivne energije koje mogu prouzrokovati neželjene efekte rezonancije. Mogući načini prevazilaženja ovog problema su: dodavanje redne prigušnice, dodavanje paralelnih filtera, promena kapaciteta sistema kondenzatorskih baterija, izmeštanje kondenzatorskih baterija na drugu lokaciju ili njeno potpuno izbacivanje (uz plaćanje penala za nizak faktor snage).

Pasivni filteri predstavljaju konfiguracije kapacitivnosti, induktivnosti i otpornosti koje se koriste za prigušenje harmonika i kompenzaciju neaktivne snage. Često se koriste i relativno su jeftini u poređenju sa drugim sredstvima za eliminaciju harmonika. Paralelni (otočni) pasivni filteri se ugrađuju paralelno nelinearnim potrošačima i njihova osnovna funkcija je da predstavljaju malu impedansu za definisanu vrednost višeg harmonika. Pogodno je filtere ugraditi što bliže nelinearnim potrošačima da bi se sprečilo prostiranje viših harmonika dalje u sistem. U praksi je moguća i primena rednih pasivnih filtera čija je osnovna funkcija da predstavljaju velike impedanse za protok harmonijskih komponenti. Osnovna mana rednih filtera su velike distorzije napona na priključcima potrošača.

Aktivni filteri su relativno novi uređaji za eliminisanje harmonika. Zasnovani su na sofisticiranoj energetskej elektronici i znatno su skuplji od pasivnih filtera. Međutim, aktivni filteri imaju posebnu prednost što ne stvaraju rezonantna kola sa elementima sistema. Aktivni filteri funkcionišu nezavisno od impedanse sistema. Zbog toga mogu da se koriste na različitim mestima gde pasivni filteri ne mogu da se koriste zbog problema sa paralelnom rezonansom. Aktivni filteri mogu da se koriste za istovremeno prigušenje više harmonika, a uspešno se koriste i za suzbijanje flikera.

## 10.2 Pasivni filteri

Osnovna funkcija pasivnih filtera je da obezbede malu impedansu za proticanje struja odgovarajućih viših harmonika prema zemlji (paralelni pasivni filteri) ili veliku impedansu za sprečavanje toka viših

harmonika kroz sistem (redni pasivni filtri). U praksi se obično koriste paralelni pasivni filtri zato što redni pasivni filtri izazivaju velike distorzije napona na priključcima potrošača.

Paralelni pasivni filtri se ugrađuju paralelno izvorima viših harmonika i na taj način se sprečava prostiranje viših harmonika struja kroz sistem. Na osnovnoj frekvenciji ovi filtri se ponašaju kao kompenzatori reaktivne energije, dok na podešenoj rezonantnoj frekvenciji filter predstavlja paralelnu granu niske impedanse, tako da najveći deo struje datog harmonika ponire u grani filtra. Jasno je da se za svaki posebni harmonik koji se želi eliminisati mora ugraditi i poseban filter. Za paralelni filter se kaže da je usklađen na onu frekvenciju, pri kojoj su njegova induktivna i kapacitivna reaktansa jednake, odnosno pri kojoj je njegova ukupna reaktansa minimalna.

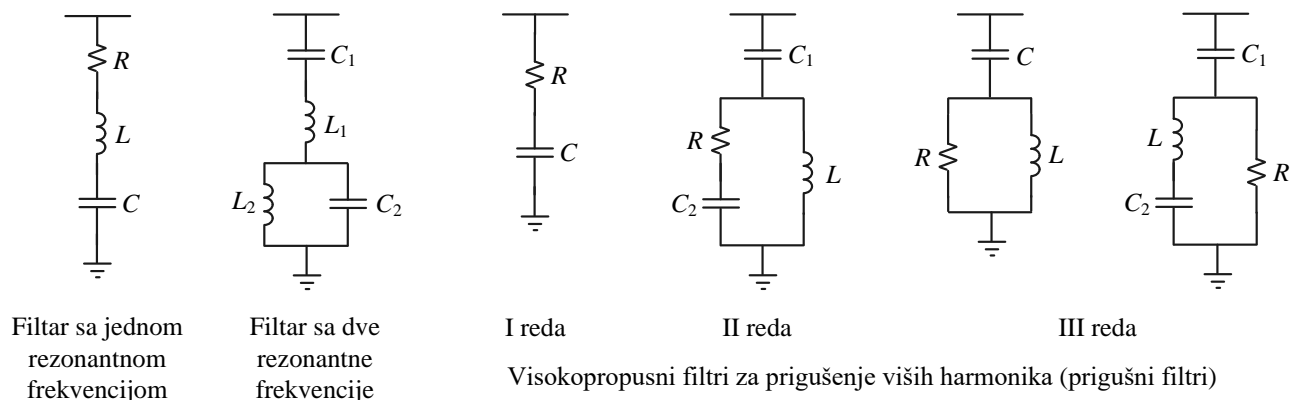
Filtarska postrojenja sačinjavaju redno-paralelne kombiacije  $R$ ,  $L$  i  $C$  elemenata, pri čemu se gotovo po pravilu koriste baterije kondenzatora za popravku faktora snage uz dodatke neophodnih  $R$  i  $L$  komponenata podešenih tako da formiraju filtre za prigušenje harmonika određenih frekvencija. Baterije kondenzatora koje se koriste u svrhe kompenzacije reaktivne energije obično se iz eksploatacionih razloga preraspodeljuju u odvojene sekcije koje se onda u kombinaciji sa  $R$  i  $L$  komponentama podešavaju tako da formiraju filtre za prigušenje harmonika određenih frekvencija.

### 10.2.1 Osnovni tipovi paralelnih pasivnih filtara

Izbor tipa filtra zavisi od zahteva za filtriranjem, kao i od cene za svaki konkretan slučaj. Osnovni tipovi paralelnih pasivnih filtara su:

- filtri sa jednom rezonantnom frekvencijom (ili filtri usklađeni na jednu frekvenciju)
- filtri sa dve rezonantne frekvencije (ili filtri usklađeni na dve frekvencije)
- visokopropusni filtri za prigušenje viših harmonika (prigušni filtri)

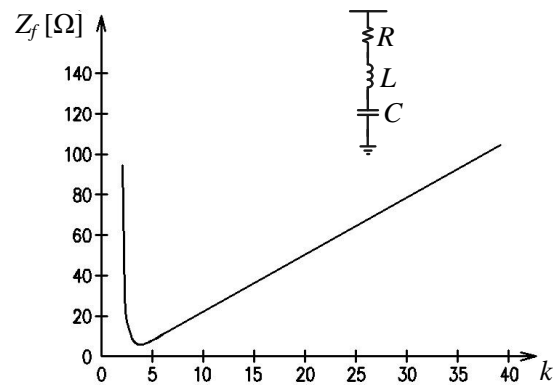
Filtri sa jednom ili dve rezonante frekvencije se često nazivaju rezonantnim filtrima (*resonant filters*) ili usklađenim filtrima (*tuned filters*), a visokopropusni filtri viših harmonika se nazivaju prigušnim filtrima (*damped filters*). Na slici 3 su prikazani osnovni tipovi paralelnih pasivnih filtara.



Slika 3: Osnovni tipovi paralelnih pasivnih filtara

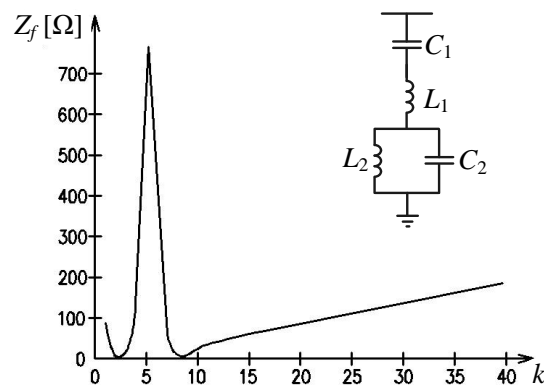
Pasivni filter sa jednom rezonantnom frekvencijom se sastoji iz redne veze kondenzatora i prigušnice. Prigušnica sadrži izvesnu otpornost, tako da se filter predstavlja rednom  $RLC$  granom. Prigušenje harmonika date frekvencije se postiže stvaranjem uslova za nastajanje lokalne rezonancije na frekvenciji harmonika koji se želi prigušiti. Ovi filtri su pogodni za eliminaciju harmonika nižeg reda ( $k < 8$ ), pri čemu se na sabirnice elektroenergetske mreže priključuju najviše tri paralelno vezana filtra.

Na slici 4 je prikazan dijagram imedanse filtra sa jednom rezonantnom frekvencijom u funkciji reda harmonika.



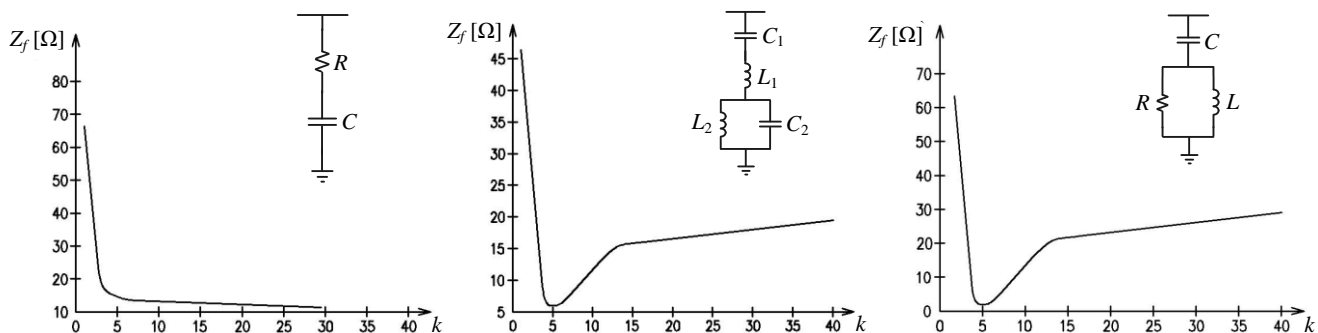
Slika 4: Imedansa filtra sa jednom rezonantnom frekvencijom u funkciji reda harmonika

Filtri sa dve rezonantne frekvencije se koriste za prigušenja dva dominantna viša harmonika. Prigušenje dva viša harmonika se može realizovati i pomoću dva filtra sa po jednom rezonantnom frekvencijom koje su podešene na frekvencije viših harmonika. Ipak, filtri sa dve rezonantne frekvencije imaju prednost iz razloga što imaju manje gubitke snage na osnovnoj frekvenciji i što se induktivnosti filtra mogu dimenzionisati na manji napon, s obzirom da se unutar filtra nalaze u redno vezanim granama. Na slici 5 je prikazan dijagram imedanse filtra sa dve rezonantne frekvencije u funkciji reda harmonika.



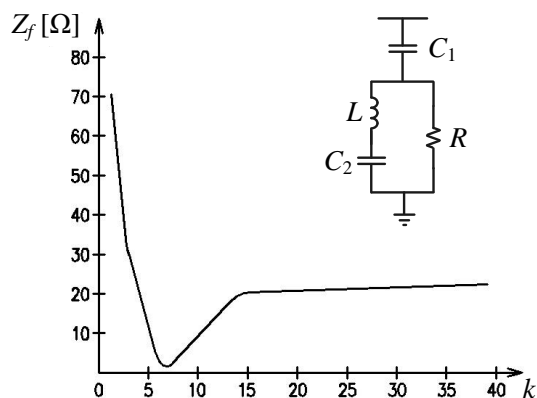
Slika 5: Imedansa filtra sa dve rezonantne frekvencije u funkciji reda harmonika

Pored rezonantnih filtara, koriste se i visokopropusni filtri za prigušenje viših harmonika (prigušni filtri) koji obuhvataju filtre I reda, filtre II reda i filtre III reda (u koje spadaju i C filtri). Prigušni filtri obezbeđuju malu vrednost imedanse za širok opseg frekvencija harmonika. Karakteristike ovih filtara su manje osetljive na promenu temperature i odstupanja frekvencije. Na slici 6 su prikazani dijagrami imedansi prigušnih filtara I, II i III reda u funkciji reda harmonika.



Slika 6: Imedanse prigušnih filtara I, II i III reda u funkciji reda harmonika

Jedna konfiguracija filtra III reda prikazana je na slici 7 i predstavlja takozvani C filter. Na slici 7 je prikazana i zavisnosti impedanse C filtra od reda harmonika. Glavna prednost ovog filtra je u većoj redukciji aktivnih gubitaka na osnovnoj frekvenciji.



Slika 7: Imedansa C filtra u funkciji reda harmonika

Rezonantni (usklađeni) filtri se koriste za eliminaciju određenih harmonijskih komponenti. Osnovni nedostatak kod primene ove vrste filtra je moguće odstupanje rezonantne frekvencije od podešene vrednosti, takozvana oštrina podešavanja filtra. Ona je bitno uslovljena stanjem u mreži i konstrukcijom elemenata filtra. Prigušni filtri omogućavaju prigušenje harmonika višeg reda. Za razliku od rezonantnih filtara sadrže veći broj elemenata, pa povećavaju troškove ugradnje.

Optimalno rešenje je postavljanje filtara blizu izvora viših harmonika i to u postrojenjima sa kompenzacijom reaktivne energije gde je moguće iskoristiti već postojeće baterije kondenzatora kao kapacitivne elemente filtra.

### 10.2.2 Osnovni parametri paralelnih pasivnih filtara

Impedansa filtra sa jednom rezonantnom frekvencijom je:

$$\underline{Z}_f = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (9.1)$$

Za filter se kaže da je usklađen na učestanost  $\omega_r$ , pri kojoj su njegova induktivna i kapacitivna reaktansa jednake, odnosno pri kojoj je njegova ukupna reaktansa minimalna i jednaka aktivnoj otpornosti  $R$ :

$$\underline{Z}_f = R + j\omega_r L + \frac{1}{j\omega_r C} = R \quad (9.2)$$

Podešana ili rezonantna učestanost filtra je:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (9.3)$$

Reaktansa prigušnice ili kondenzatora filtra pri rezonantnoj učestanosti filtra je:

$$X_L = \omega_r L = X_C = \frac{1}{\omega_r C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (9.4)$$

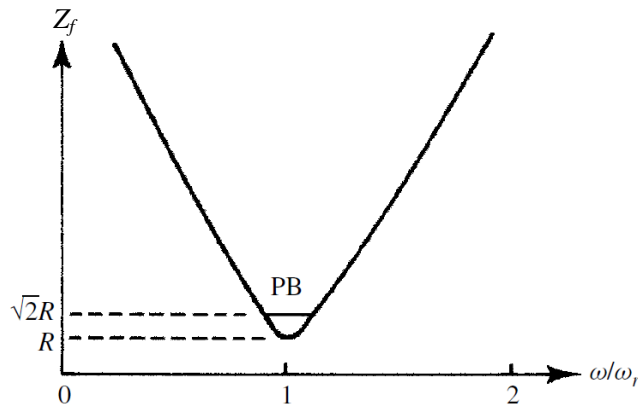
Faktor dobrote (kvaliteta) filtra  $Q_z$  definiše oštinu podešavanja filtra. Rezonantni filteri imaju velike vrednosti faktora dobrote (30÷60), a male vrednost faktora dobrote (0,5÷5) omogućavaju prigušnim filterima da imaju male impedanse u širokom opsegu frekvencija.

Kod rezonantnih filtera, faktor dobrote je jednak faktoru dobrote (kvaliteta) prigušnice u filteru:

$$Q_z = \frac{\omega_r L}{R} \quad (9.5)$$

Propusni opseg filtra PB (*pass band*) se definiše na osnovu vrednosti frekvencija kada je reaktansa filtra jednaka njegovoj otpornosti, odnosno kada impedansa filtra ima moduo  $\sqrt{2} R$  i fazni ugao  $45^\circ$ .

Na slici 8 je na dijagramu impedanse filtra sa jednom rezonantnom frekvencijom prikazan propusni opseg filtra.



Slika 8: Impedansa i propusni opseg filtra sa jednom rezonantnom frekvencijom

Odstupanje rezonantne frekvencije filtra od podešene nominalne frekvencije se definiše preko faktora neusklađenosti filtra:

$$\delta = \frac{\omega_r - \omega_{rn}}{\omega_{rn}} \quad (9.6)$$

Ovaj faktor uzima u obzir različite efekte kao što su: varijacije osnovne frekvencije napona napajanja, promene kapacitivnosti i induktivnosti filtra. Smatra se da promena induktivnosti ili kapacitivnosti od 2% izaziva istu neusklađenost kao promena frekvencije sistema od 1%. Zbog toga se faktor neusklađenosti često izražava kao:

$$\delta = \frac{\Delta f}{f} + \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right) \quad (9.7)$$

### 10.2.3 Dimenzionisanje pasivnih filtara

Parametre pasivnog filtra treba podesiti tako da filter predstavlja malu impedansu za određenu harmonijsku komponentu i da se pri tome ostvari optimalna kompenzacija neaktivne snage.

Za određivanje *RLC* parametara rezonantnog filtra sa jednom rezonantnom frekvencijom potrebno je najpre odrediti dominantni viši harmonik koji treba prigušiti. Da bi filter predstavljao malu impedansu pri učestanosti harmonika koji treba prigušiti, potrebno je da se izborom parametara filtra podesi da rezonantna frekvencija *RLC* grane filtra bude jednaka učestanosti harmonika koji treba prigušiti:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_h \quad (9.8)$$

gde je *h* red harmonika koji treba prigušiti, a *L* i *C* su parametri *RLC* grane.

Druga jednačina neophodna za određivanje *RLC* elemenata filtra sa jednom rezonantnom učestanošću odnosi se na faktor dobrote filtra (u ovom slučaju prigušnice koja se koristi u filtru). Faktor dobrote  $Q_z$  je:

$$Q_z = \frac{\omega_r L}{R} \quad (9.9)$$

Za rezonantne filtre opseg vrednosti za faktor dobrote je  $30 \leq Q_z \leq 60$ , a u proračunima se preporučuje usvajanje vrednosti  $Q_z=50$ .

Treća jednačina neophodna za određivanje *RLC* elemenata filtra se dobija iz uslova da se pomoću filtra obezbedi kompenzacija neaktivne snage. Za izvođenje ovog uslova je neophodno odrediti susceptansu rezonantnog filtra pri osnovnoj učestanosti  $\omega_1$ . Admitansa rezonantnog filtra pri osnovnoj učestanosti  $\omega_1$  je:

$$\underline{Y}_i(\omega_1) = \frac{1}{R + j\omega_1 L + \frac{1}{j\omega_1 C}} \quad (9.10)$$

Na osnovu prethodnog izraza, susceptansa rezonantnog filtra pri osnovnoj učestanosti  $\omega_1$  je:

$$B_f = \text{Im} \{ \underline{Y}_f(\omega_1) \} = \frac{\omega_1 C (1 - \omega_1^2 LC)}{(\omega_1 RC)^2 + (1 - \omega_1^2 LC)^2} \quad (9.11)$$

Koristeći izraze (9.8) i (9.9), dobija se:

$$B_f = \frac{\omega_1 C \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_r^2}\right)}{\left(\frac{1}{Q_z} \cdot \frac{\omega_1^2}{\omega_r^2}\right)^2 + \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_r^2}\right)^2} \quad (9.12)$$

Uslov da se pomoću filtra postigne kompenzacija neaktivne snage podrazumeva da je pri osnovnoj učestanosti susceptansa  $RLC$  grane filtra jednaka susceptansi kondenzatora sa optimalnom kapacitivnošću  $C_{opt}$  za kompenzaciju neaktivne snage koji bi se koristio umesto filtra:

$$B_f(\omega_1) = \omega_1 C_{opt} \quad (9.13)$$

Na osnovu prethodnog izraza dobija se izraz za kapacitivnost u  $RLC$  grani rezonantnog filtra:

$$C = \frac{\left(\frac{1}{Q_z} \cdot \frac{\omega_1^2}{\omega_r^2}\right)^2 + \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_r^2}\right)^2}{\left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_r^2}\right)} \cdot C_{opt} \quad (9.14)$$

Imajući u vidu da je kod rezonantnih filtara  $Q_z^2 \gg 1$ , potrebna kapacitivnost u  $RLC$  grani filtra za kompenzaciju neaktivne snage je:

$$C \approx \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_r^2}\right) C_{opt} \quad (9.15)$$

Ako se rezonantna učestanost  $\omega_r$  podešava striktno prema učestanosti  $\omega_h$  harmonika koji se prigušuje, odnosno ako je faktor neuslađenosti filtra  $\delta=0$ , prethodni izraz postaje:

$$C \approx \left(1 - \frac{1}{h^2}\right) C_{opt} \quad (9.16)$$

Na osnovu kapacitivnosti u  $RLC$  grani filtra i učestanosti harmonika koji treba prigušiti, korišćenjem izraza (9.8) određuje se induktivnost u  $RLC$  grani filtra:

$$L = \frac{1}{\omega_r^2 C} \quad (9.17)$$

Na osnovu induktivnosti u  $RLC$  grani filtra i faktora dobrote filtra, korišćenjem izraza (9.9) određuje se otpornost u  $RLC$  grani filtra:

$$R = \frac{\omega_r L}{Q_z} \quad (9.18)$$

U slučaju kada treba postići prigušenje dva dominantna viša harmonika, neophodna su dva paralelna  $RLC$  filtra sa rezonantnim učestanostima  $\omega_{r1}$  i  $\omega_{r2}$  koje su jednake učestanostima dva dominantan viša harmonika. Ukupna susceptansa filtarskih grana je:

$$B_{f1} + B_{f2} \approx \frac{\omega_1 C_1}{\left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_{r1}^2}\right)} + \frac{\omega_1 C_2}{\left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_{r2}^2}\right)} = \omega_1 C_{opt} \quad (9.19)$$

U ovom slučaju rešenje za kapacitivnosti  $C_1$  i  $C_2$  unutar filtarskih grana nije jednoznačno. Jedan od načina da se odrede parametri filtarskih grana je da se kapacitivnost  $C_{opt}$  ravnomerno raspodeljuje po



*RLC* granama (ako su frekvencije harmonika koji se prigušuju bliske, kao što su na primer učestanosti petog i sedmog harmonika). Kapacitivnosti *RLC* grana bi bile:

$$C_1 \approx \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_{r1}^2}\right) \cdot \frac{C_{\text{opt}}}{2} \quad (9.20)$$

$$C_2 \approx \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_{r2}^2}\right) \cdot \frac{C_{\text{opt}}}{2} \quad (9.21)$$

Preostali parametri *RLC* grana se određuju primenom izraza (9.17) i (9.18) na svaku *RLC* granu.

Drugi način za određivanje parametar paralelnih *RLC* filtara je da se pretpostave jednake aktivne otpornosti u *RLC* granama. U tom slučaju, pored jednačina (9.15), (9.17), (9.18) i (9.19), dodatna jednačina koja omogućava određivanje parametara *RLC* grana je:

$$R_1 = R_2 \Rightarrow \frac{\omega_{r1} L_1}{Q_z} = \frac{\omega_{r2} L_2}{Q_z} \Rightarrow \omega_{r1} C_1 = \omega_{r2} C_2 \quad (9.22)$$

Konačno, treći način za određivanje parametara paralelnih *RLC* filtara je da se ukupna zahtevana neaktivna snaga raspodeljuje filtarskim granama zavisno od efektivnih vrednosti harmonika struja koje generiše nelinearni izvor. Obično harmonici nižeg reda imaju veće efektivne vrednosti, tako da filtarska grana za harmonik nižeg reda treba da ima veći kapacitet.

Parametri filtra sa jednom rezonantnom frekvencijom mogu da se procene i na osnovu vrednosti neaktivne snage koju treba optimalno kompenzovati. U slučaju monofaznog potrošača, kapacitivnost u *RLC* grani filtra izražena preko neaktivne snage potrošača  $Q_{\text{tot}}$  je:

$$C \approx \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_r^2}\right) \cdot \frac{Q_{\text{tot}}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^n \omega_k^2 U_k^2}} \quad (9.23)$$

gde je  $n$  najviši red harmonika koji se uzima u razmatranje, a  $U_k$  su efektivne vrednosti harmonika napona.

Preostali parametri *RLC* grana se određuju primenom izraza (9.17) i (9.18). U slučaju potrebe da se kompenzuju dva dominantna viša harmonika, vrši se raspodela neaktivne snage po filtarskim *RLC* granama.

U slučaju trofaznih sistema sa relativno malim nesimetrijama, mogu se procenati jednake kapacitivnosti filtara po fazama na osnovu neaktivne snage  $Q_{\text{tot}}$  trofaznog potrošača:

$$C \approx \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_r^2}\right) \cdot \frac{Q_{\text{tot}}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (U_{ak}^2 + U_{bk}^2 + U_{ck}^2)} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^n \omega_k^2 (U_{ak}^2 + U_{bk}^2 + U_{ck}^2)}} \quad (9.24)$$

gde je  $n$  najviši red harmonika koji se uzima u razmatranje, a  $U_{ak}$ ,  $U_{bk}$  i  $U_{ck}$  su efektivne vrednosti harmonika faznih napona  $u_a$ ,  $u_b$  i  $u_c$ .

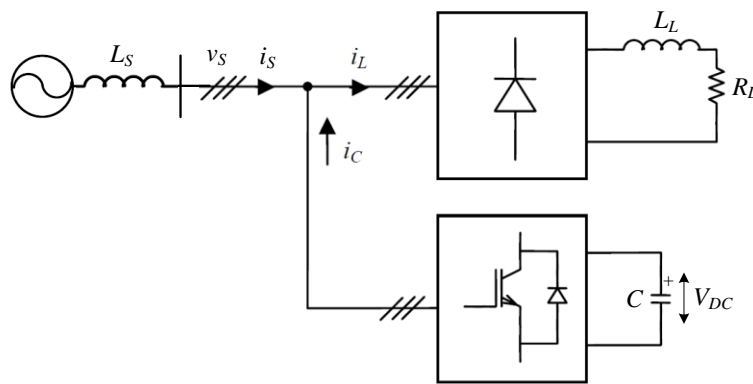
### 10.3 Aktivni filtri

Aktivni filtri su uređaji energetske elektronike koji se koriste za suzbijanje harmonijskih izobličenja struja i napona, kao i za popravku faktora snage. U tehničkoj literaturi su predloženi različiti tipovi

aktivnih filtara. Pod pojmom "aktivni filter" se najčešće podrazumevaju AC aktivni filtri koji se sa stanovišta konfiguracije mreže dele na paralelne i redne. Paralelni aktivni filtri poništavaju harmonijske komponente struja tako što injektiraju kompenzacione struje, pri čemu se nastoji da struje uvodu koji napaja potrošač postanu proporcionalne naponima i u fazi sa naponima, pri istoj aktivnoj snazi. Kao posledica korišćenja paralelnog aktivnog filtra, faktor snage postaje jednak jedinici, a viši harmonici praktično više ne postoje u struji voda koji napaja potrošač. Redni aktivni filtri se koristi za kompenzaciju harmonijskih izobličenja napona, kao i za regulaciju napona. Aktivni filtri se u osnovi sastoje od invertora i upravljačkih kola sa impulsno-širinski modulisanim signalima (PWM - *pulse width modulation*).

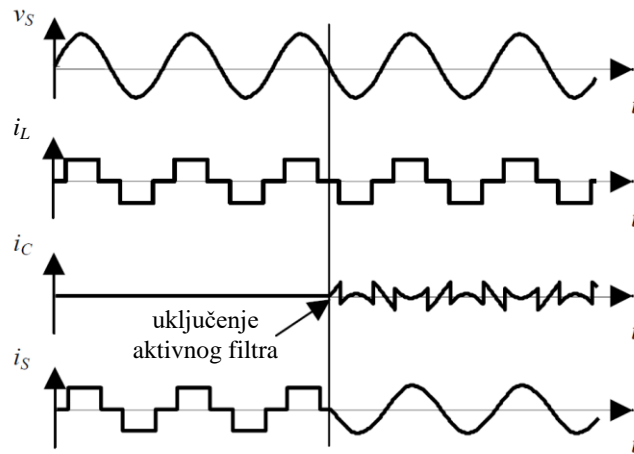
### 10.3.1 Paralelni aktivni filter (STATCOM)

Paralelni aktivni filter je poznat pod nazivom STATCOM (*Static Compensator*) i koristi se za kompenzaciju harmonijskih izobličenja struja i za popravku faktora snage. Na slici 9 je prikazana osnovna konfiguracija paralelnog aktivnog filtra u trofaznom sistemu. Aktivni filter je predstavljen blokom sa IGBT tranzistorima i u ovom slučaju se koristi za kompenzaciju harmonijskih izobličenja struja ispravljača koji napaja pretežno induktivni potrošač, kao i za popravku faktora snage.



Slika 9: Paralelni aktivni filter

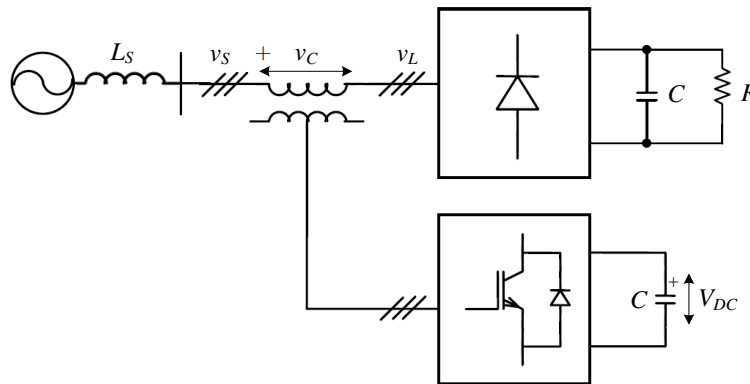
Na slici 10 su prikazani talasni oblici napona i struja jedne faze pre i nakon priključenja paralelnog aktivnog filtra. Usvojeno je da je napon  $v_s$  na sabirnicama prostoperiodičan. Struja ispravljača koji napaja pretežno induktivni ispravljač je četvrtastog oblika i označena je sa  $i_L$ . Osnovni cilj je da paralelni aktivni filter injektira u sistem kompenzacionu struju  $i_c$  koja će kompenzovati harmonijske komponente struja potrošača  $i_L$ . Nakon uključenja aktivnog filtra, struja u napojnom vodu potrošača  $i_s$  postaje prostoperiodična i u fazi je sa naponom. Pri tome, potrošaču se obezbeđuje ista aktivna snaga kao i pre uključenja aktivnog filtra.



Slika 10: Talasni oblici napona i struja jedne faze pre i nakon priključenja paralelnog aktivnog filtra

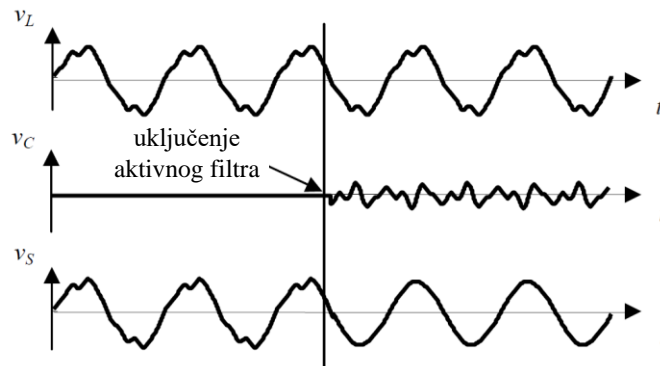
### 10.3.2 Redni aktivni filtri (DVR)

Redni aktivni filter je poznat kao dinamički regulator napona (DVR – *Dynamic Voltage Restorer*) i koristi za kompenzaciju harmonijskih izobličenja napona, kao i za regulaciju napona. Na slici 11 je prikazana osnovna konfiguracija rednog aktivnog filtra u trofaznom sistemu. Redni aktivni filter se povezuje u sistem preko sprežnog transformatora. U ovom slučaju aktivni filter obezbeđuje kompenzacioni napon  $v_C$  koji kompenzuje harmonike u naponu potrošača  $v_L$ .



Slika 11: Redni aktivni filter

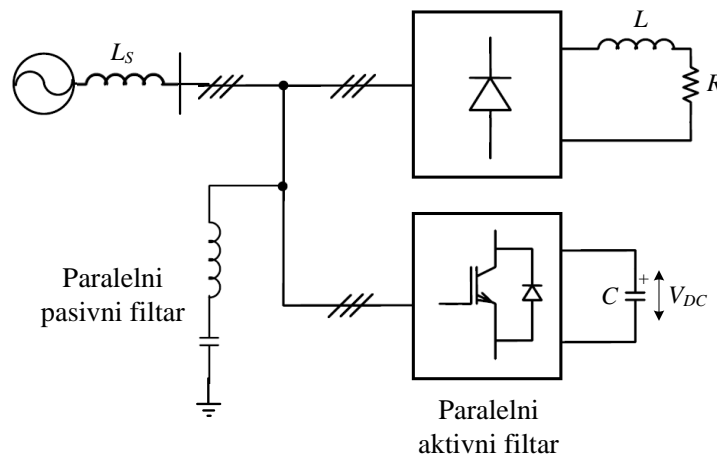
Na slici 12 su prikazani talasni oblici napona i struja jedne faze pre i nakon priključenja rednog aktivnog filtra. Potrošač u ovom slučaju je trofazni diodni ispravljač sa pretežno kapacitivnom DC granom. Redni filter obezbeđuje kompenzacioni napon  $v_C$  koji će kompenzovati harmonijske komponente napona potrošača  $v_L$ .



Slika 12: Talasni oblici napona i struja jedne faze pre i nakon priključenja rednog aktivnog filtra

### 10.3.3 Hibridni filtri

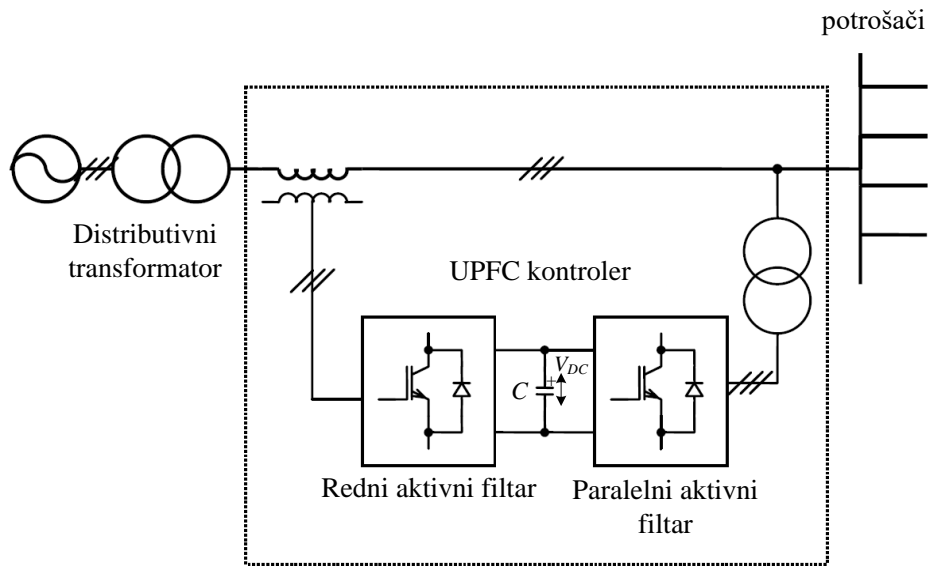
Hibridni filtri predstavljaju kombinaciju pasivnih i aktivnih filtara. Korišćenjem ovakve kombinacije smanjuje se cena uređaja. Pasivni filtri se koriste za prigušenje dominantnih harmonika, dok se aktivni filtri koriste za poboljšanje performansi pasivnih filtara i za poništavanje ostalih harmonijskih komponenti. Kao rezultat, aktivni filter je manje snage i umanjuje se mogućnost nastanka rezonantnog kola koga bi činili pasivni filter i impedansa izvora. Na slici 12 je prikazan hibridni filter sastavljen od paralelnog pasivnog i paralelnog aktivnog filtra. Pored prikazane konfiguracije, koristi se još kombinacija paralelnog pasivnog filtra i rednog aktivnog filtra, kao i konfiguracija koja se sastoji od redne veze pasivnog i aktivnog filtra.



Slika 12: Hibridni filter sastavljen od paralelnog pasivnog i paralelnog aktivnog filtra

### 10.3.4 Kombinacija rednog i paralelnog aktivnog filtra (UPFC – *Unified Power Flow Controller*)

U praktičnim primenama se često pristupa realizaciji uređaja koji predstavlja kombinaciju paralelnog i rednog aktivnog filtra. Ovakav uređaj se oznava kao UPFC kontroler (*Unified Power Flow Controller*). Osnovna šema ovog kontrolera je prikazana na slici 13.



Slika 13: Kombinacija rednog i paralelnog aktivnog filtra

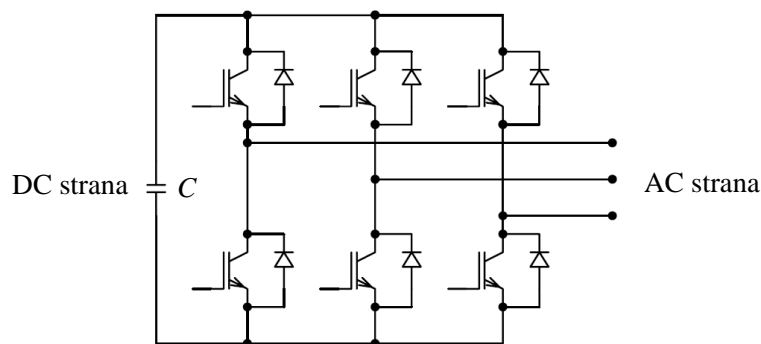
Redni filter ima funkciju da kompenzuje izobličenja napona, da reguliše napon i da kompenzuje flikere i nesimetrije napona. Paralelni filter ima funkciju da kompenzuje harmonike u struji potrošača, kao i da ostvari popravku faktora snage.

### 10.3.5 Invertori kod aktivnih filtara

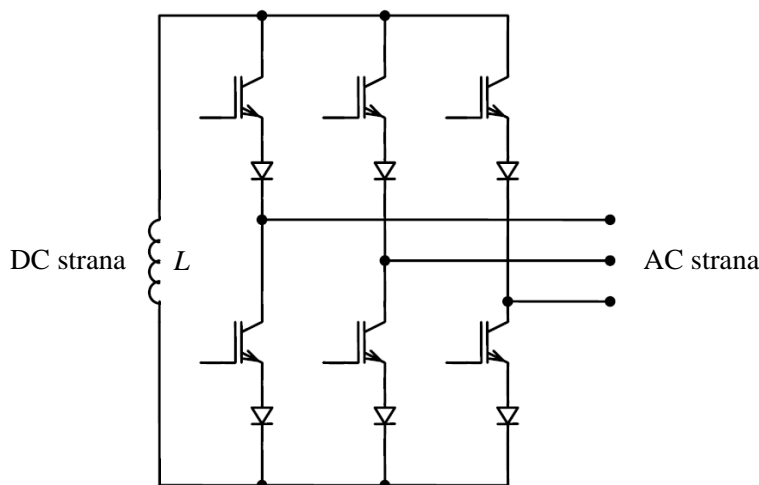
Postoje dve vrste invertora koji se koriste kod aktivnih filtara:

- naponski invertori (VSI – *Voltage Source Inverter*)
- strujni invertori (CSI – *Current Source Inverter*)

Na slici 14 je prikazan naponski inverter, a na slici 15 strujni inverter.



Slika 14: Električna šema naponskog invertora

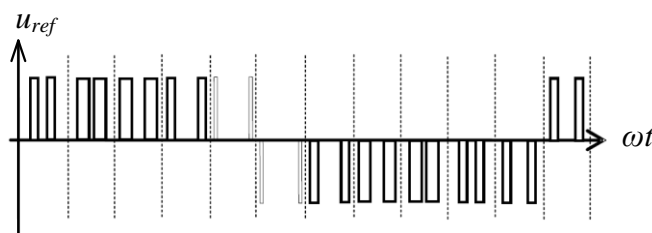


Slika 15: Električna šema strujnog invertora

Naponski invertori zahtevaju konstantan DC napon (tj. kondenzator u DC kolu), a strujni zahtevaju konstantnu DC struju (tj. prigušnicu u DC kolu). Kondenzator u DC kolu kod naponskog invertora i prigušnica u DC kolu kod strujnog invertora su uređaji za skladištenje energije. Zbog toga, inverter ne zahteva dodatni izvor energije na DC strani. Naponski invertori su jeftiniji, tako da se oni najčešće koriste. Uobičajeni prekidački elementi kod invertora su IGBT tranzistori.

### 10.3.6 Upravljačka kola za aktivne filtre

Osnovna prednost savremenih energetskih pretvarača je postignuta zahvaljujući prekidačkom modu rada poluprovodničkih elemenata. Najpogodniji način formiranja željenog izlaznog napona invertora je korišćenje impulsno-širinski moduliranih (PWM) upravljačkih signala za uključenje tranzistora. Tipični talasni oblik PWM signala je prikazan na slici 16.



Slika 16: Tipični talasni oblik PWM signala

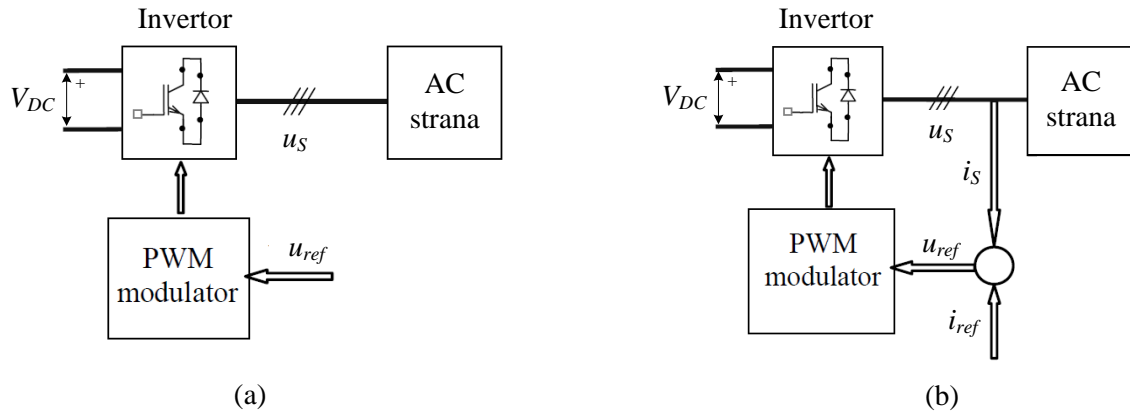
U signalu prikazanom na slici 16, perioda signala je podeljena na 12 intervala u kojima se uključuju odgovarajući tranzistori, a vremena trajanja uključjenja su različita. Broj ovakvih intervala  $N$  u periodi je dat sledećim izrazom:

$$N = \frac{f_{sw}}{f} \quad (9.25)$$

gde je  $f_{sw}$  frekvencija uključjenja, a  $f$  je osnovna frekvencija izlaznog napona.

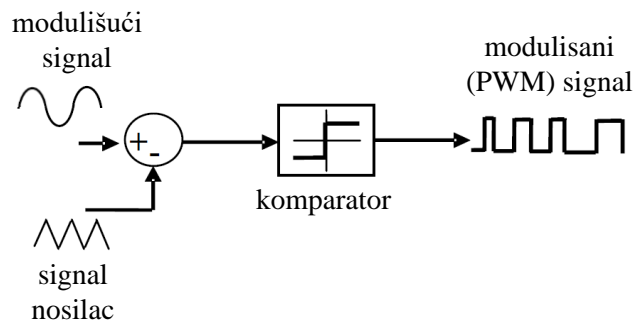
Korišćenjem PWM signala za upravljanje inverterom dobijaju se izlazni naponi invertora koji sadrže povorke pravougaonih impulsa čije je trajanje srazmerno sinusoidalnim vrednostima napona.

Invertori se koriste kao izvori napona ili struje na AC strani. Kod naponskog invertora se koristi upravljanje naponom u otvorenoj petlji, a kod strujnog invertora se koristi upravljanje strujom u zatvorenoj petlji. Ova dva pristupa u upravljanju inverterom su prikazana na slici 17.

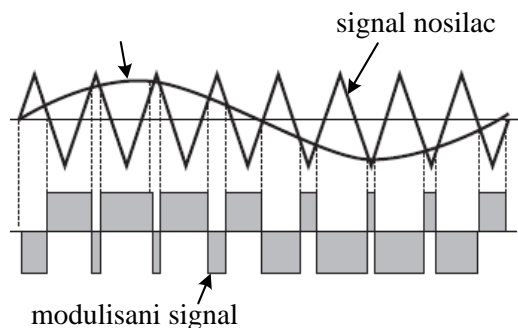


Slika 17: Upravljačka kola za invertore: (a) kolo za upravljanje naponom u otvorenoj petlji, (b) kolo za upravljanje strujom u zatvorenoj petlji

U slučaju upravljanja naponom u otvorenoj petlji, koristi se metod impulsno-širinske modulacije pomoću testerastog signala nosioca. Ideja je da se kombinuju prostoperiodačni modulišući signal osnovne frekvencije sa signalom nosiocem koji ima testerast oblik i mnogo veću frekvenciju. Ova dva signala se uvode u komparator koji daje modulisani signal u obliku povorke pravougaonih impulsa, kao što je prikazano na slici 18. Na slici 19 su prikazani signali koji se koriste u impulsno-širinskoj modulaciji, kao i dobijeni modulisani (PWM) signal.



Slika 18: Osnovni princip impulsno-širinske modulacije



Slika 19: Talasni oblici modulišućeg signala, signala nosioca i izlaznog napona

Modulisani (PWM) signal se koristi kao upravljački signal za uključenje tranzistora. Na izlazu tranzistorskog mosta se dobija napon koji ima vrednosti  $V_{DC}$  ili  $-V_{DC}$ . Fourier-ova analiza izlaznog napona pokazuje da on sadrži izražen osnovni harmonik sa frekvencijom modulišućeg signala (50 Hz) i više harmonike čije su frekvencije celobrojni umnošci frekvencije odabiranja. Pošto je frekvencija odabiranja relativno visoka, viši harmonici koji se pri tome pojavljuju se mogu lako filtrirati. Za filtriranje viših harmonika koristi se induktivnost priključena na AC stranu invertora, tako da talasni oblik struje postaje približno prostoperiodičan.