

**Pasivni filter**  
**Aktivni filter**  
**Aktivni ispravljač**

# Organizacija predavanja

- I deo: Kvalitet električne energije i regulisani elektromotorni pogoni: pasivni i aktivni filteri
- II deo: Aktivni ispravljač
- III deo: Rezime kroz reč proizvođača opreme

# Uvod

- **Harmonici smanjuju pouzdanost, povećavaju vreme zastoja, utiču na kvalitet proizvoda, povećavaju troškove rada i dovode do niže produktivnosti [1].**
- **Izobličenje struje** uglavnom utiče na elemente distributivnog sistema u delu od mreže do ispravljača, stvarajući: dodatne gubitke u provodnicima i kablovima, dodatno zagrevanje transformatora, neispravan rad prekidača, harmonike koji su umnožak broja tri u neutralnom provodniku...
- Izobličenje struje se vezuje za performanse uređaja, tj. predstavlja karakteristiku svakog pojedinačnog opterećenja koje se napaja iz neke distributivne mreže, dok izobličenje napona predstavlja karakteristiku sistema.
- **Izobličenje napona** može uticati na drugu opremu koja nije izvor harmonika, ali je u istom električnom sistemu, dovodeći do: nepravilnog rada telekomunikacionih sistema, računara, monitora, elektronske opreme za testiranje, rezonance sa kondenzatorskim baterijama za kompenzaciju reaktivne snage, degradaciju izolacije i ležaja motora...

# Uvod

- Za izračunavanje izobličenja napona potrebno je poznavati izobličenje struje nelinearnog potrošača ZAJEDNO sa impedansom sistema (mreže). NIJE moguće predvideti harmonijsko izobličenje napona ukoliko znamo samo karakteristike potrošača [1].
- Najčešće se za određivanje ekvivalentne impedanse mreže koristi odnos kratkog spoja  $R_{sce} = S_{sc} / S_{equ}$ , tj. odnos između prividne snage kratkog spoja izvora i nominalne prividne snage opterećenja na mestu priključenja (PCC) gde je  $S_{sc} = U^2 / Z_{mreže}$  i  $S_{equ} = UI_{equ}$ .
- Što je ekvivalentna impedansa mreže manja, struja kratkog spoja je veća, krutost mreže je veća i kvalitet napajanja čije je pogoršanje izazvano nelinearnim potrošačima - bolji.
- Izobličenje napona na višem naponskom nivou takođe utiče na karakteristike i performanse sistema, na isti način kao izobličenje napona na sekundarnoj strani transformatora. Ovaj tip izobličenja uvek postoji u nekoj meri (0,5% - 3%) [1], mada su naš fokus filteri sa strane nelinearnog opterećenja, koje injektuje više harmonike u mrežu.

# Pasivni filteri u elektroenergetskoj mreži (passive power filters - PPF)

- Pasivni filteri se koriste da smanje harmonike, dok se kondenzatori (u okviru filtera) koriste da poprave faktor snage potrošača naizmenične struje [2].
- Pasivni filteri mogu biti: paralelni, redni, pasivni hibridni, rezonantni jednostruki, rezonantni dvostruki, prigušni (oslabljeni), pojasni, visokopropusni...
- U mrežama velike snage, kao što su npr. HVDC sistemi, oni se i danas koriste zbog svoje jednostavnosti, niske cene, robustnosti i kompenzacije reaktivne snage na osnovnoj učestanosti u većini aplikacija. Takođe se veoma često koriste u hibridnim konfiguracijama.
- Pasivni filteri se mogu podeliti na osnovu:
  1. Topologije: rezonantni (tuned) i prigušni (damped)
  2. Načina povezivanja: redni, paralelni i pasivni hibridni
  3. Vrste napojne mreže: monofazna (sa dva provodnika), trofazna sa tri provodnika i trofazan sa četiri provodnika.

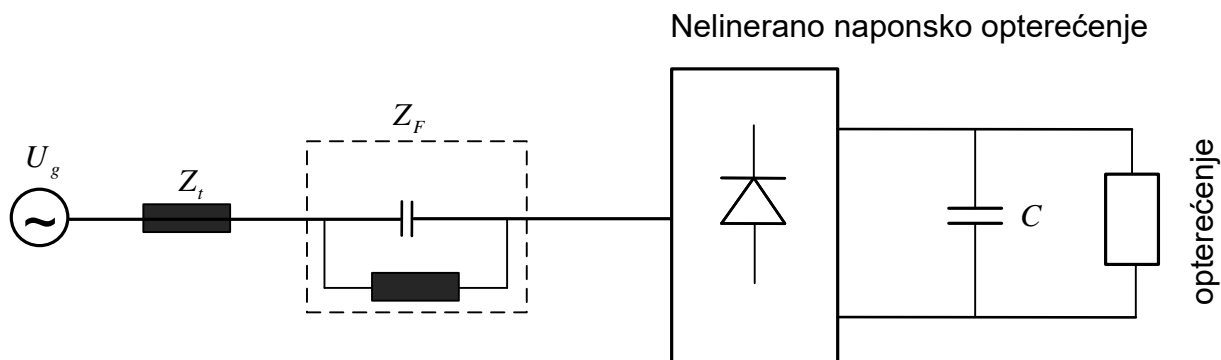
# Pasivni filteri u elektro energetske mreži (passive power filters - PPF) [2]

- Pasivni filteri predstavljaju zrelu tehnologiju koja se koristi **za umanjene harmonijske komponente struje i kompenzaciju reaktivne snage** u mrežama naizmenične struje, ali takođe i **za eliminisanje harmonijskih komponenti napona**, za regulaciju napona na mestu priključenja, za suzbijanje flikera napona i poboljšanje naponske ravnoteže u trofaznim sistemima.
- **Paralelni pasivni filteri (parallel/shunt) se smatraju prikladnijim za ublažavanje harmonijskih komponenti struje i delimično za kompenzaciju reaktivne snage nelinearnih opterećenja**, tako što smanjuju harmonijski sastav mrežne struje posebno u slučaju nelinearnih opterećenja sa konstantnom strujom opterećenja (current-fed), kao što su npr. tiristorski ispravljači u regulisanom jednosmernom pogonu.
- Međutim, u slučaju **nelinearnih opterećenja sa konstantnim naponom opterećenja (voltage-fed)**, kao što su **diodni ispravljači sa kondenzatorom na jednosmernoj strani**, **redni pasivni filteri** se smatraju boljim za blokiranje proticanja viših harmonika struje u mrežu.

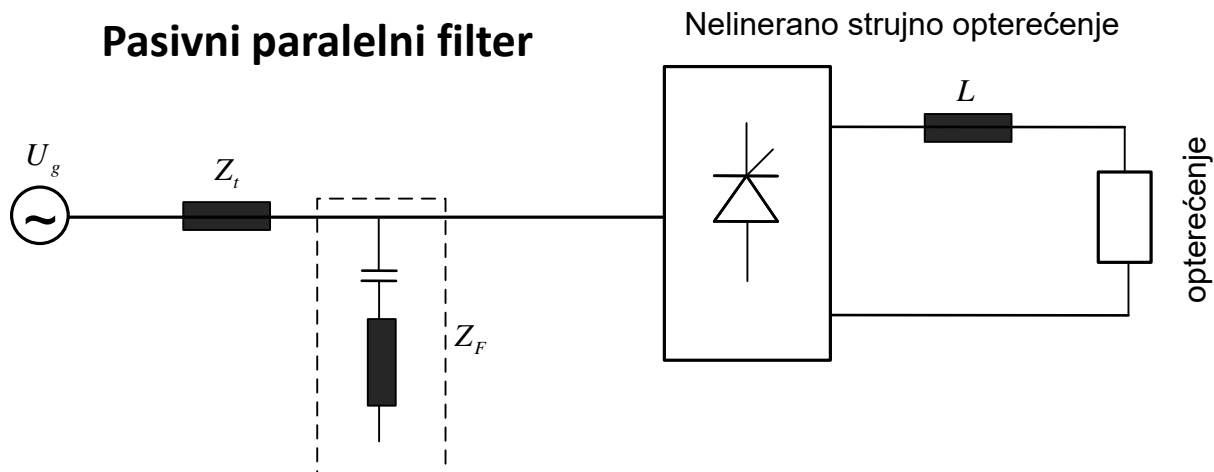
# Pasivni filteri

- Pasivni filteri se postavljaju u blizini potrošača koji su izvori viših harmonika.

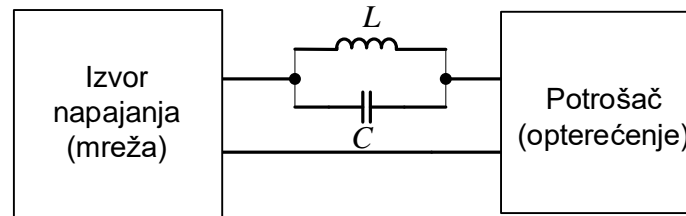
## Pasivni redni filter



## Pasivni paralelni filter



# Redni pasivni filteri [3]



- Ova konfiguracija se **najčešće koristi u monofaznim aplikacijama u cilju minimiziranja trećeg harmonika**, ali se može koristiti i za filtriranje drugih harmonijskih učestanosti za koje je filter projektovan. Uglavnom se sastoji od paralelne veze pasivnih elemenata ( $L$  i  $C$ ) da bi se smanjili gubici snage u filteru.

-Prednosti rednog filtera su:

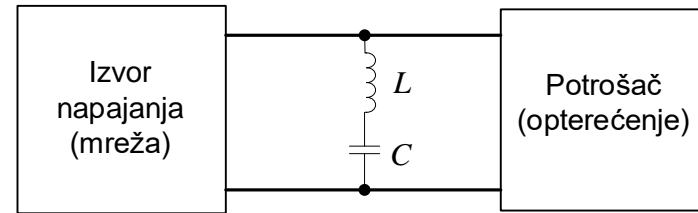
- predstavlja veliku impedansu za podešenu harmonijsku učestanost (a vrlo malu impedansu na osnovnoj učestanosti)
- ne može da prouzrokuje pojavu rezonantne učestanosti u sistemu
- ne prenosi harmonike iz drugih izvora viših harmonika
- popravlja faktor pomeraja (faktor snage prvog harmonika), kao i ukupni (pravi) faktor snage.

- Nedostaci rednog filtera su:

- mora da bude dimenzionisan za nominalnu struju potrošača
- slabo utiče na ublažavanje drugih harmonika, osim onoga za koji je projektovan. Za blokiranje više različitih harmonika neophodna redna veza više različitih serijskih filtara. Time se konfiguracija dodatno usložnjava, uz povećanje gubitaka, zbog većeg broja redno vezanih elemenata.



# Paralelni pasivni filteri [3]



-Paralelni filteri vezuju se u tački priključenja opterećenja, paralelno sa njim obezbeđujući pri tome malu impedansu, kroz koju treba da prođe što veći deo strujnih harmonika. Sprovedenjem harmonika kroz pasivne elemente (prigušnice i kondenzatore) sprečava se dopiranje strujnih harmonika do napajanja, uz istovremeno smanjenje gubitaka. Ova konfiguracija se koristi za filtriranje određenih harmonijskih učestanosti za koje je filter projektovan (5, 7, 11,... harmonik).

- Prednosti paralelnog filtera su:

- predstavlja malu impedansu za podešenu učestanost
- predstavlja izvor viših harmonika za potrošač
- dimenzioniše se samo za vrednost određene harmonijske komponente struje opterećenja, a ne za nominalnu vrednost
- popravlja faktor pomeraja (faktor snage prvog harmonika), kao i ukupni faktor snage.

- Nedostaci paralelnog filtera su:

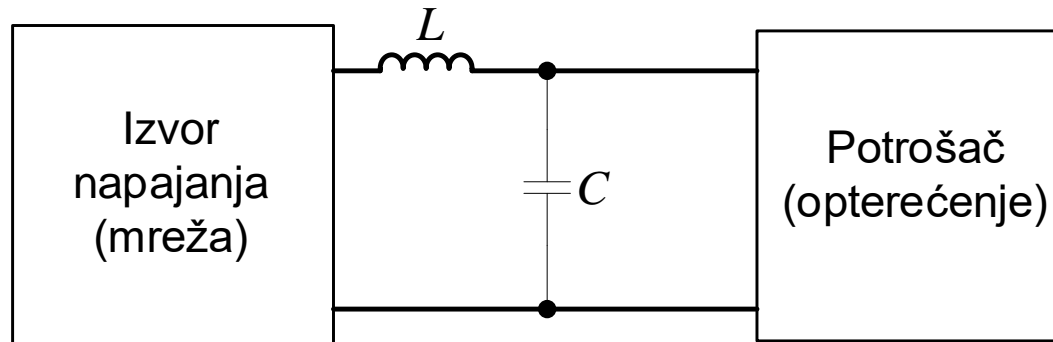
- filtrira samo jednu harmonijsku komponentu za koju je projektovan
- može da dovede do pojave rezonantne učestanosti u sistemu
- može da prenese harmonijske komponente iz drugih izvora viših harmonika
- potrebno je više paralelnih filterskih grana da bi se zadovoljile standardom propisane granice za tipične harmonike.

# Pasivni hibridni filteri [2]

- Pasivni paralelni i redni filteri mogu da imaju vrlo različite topologije, kao npr:
  - Paralelni pasivni filteri rezonantni ili podešeni kao propusnici opsega
  - Redni pasivni filteri rezonantni ili podešeni kao nepropusnici opsega
  - Prigušni paralelni pasivni filteri ili propusnici komponenti visokih frekvencija
  - Prigušni redni pasivni filteri ili nepropusnici komponenti visokih frekvencija
- Pasivni hibridni filteri predstavljaju kombinaciju rednih i paralelnih pasivnih filtera, koji se koriste na strani nelinearnog opterećenja koje injektuje više harmonike struje u mrežu i kao takvi mogu imati različite topologije, tj. sa više propusnih opsega ili više nepropusnih opsega frekvencija.

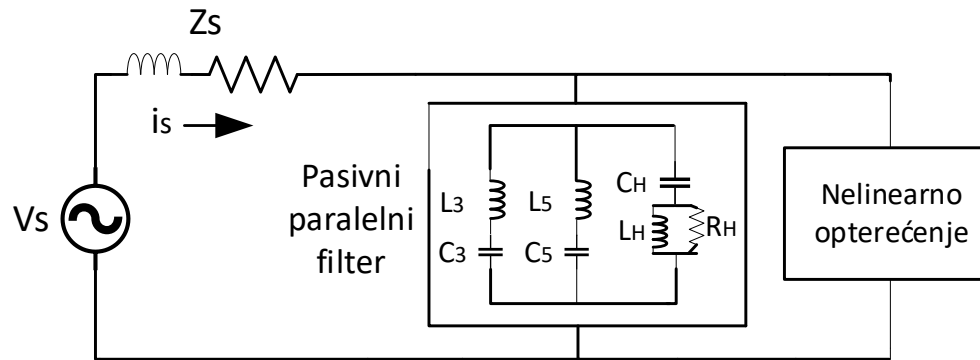
# Niskopropusni (širokopojasni) filter [3]

- Ovi filteri se koriste za eliminisanje svih harmonijskih komponenti koje imaju učestanost iznad rezonantne učestanosti. Rezonantna učestanost je obično oko 5. harmonika, pa se filter podesi tako da poništi peti i sve harmonike iznad.
- Prednosti su:
  - minimizira sve harmonijske komponente iznad rezonantne vrednosti
  - ne može da prouzrokuje pojavu rezonantne učestanosti u sistemu
  - ne prenosi harmonike iz drugih izvora viših harmonika
  - popravljja ukupni faktor snage.
- Nedostaci niskopropusnog filtera su:
  - mora da bude dimenzionisan za nominalnu struju potrošača.



# Klasifikacija filtera prema broju faza [2]

- Kada je reč o klasifikaciji filtera u zavisnosti od broja faza, reč je o broju faza napajanja i/ili opterećenja. Analogno monofaznim i trofaznim sistemima, dele se i filteri.
- U skladu sa načinom povezivanja opterećenja sa dva, tri ili četiri provodnika, filteri se mogu podeliti na:
  - dvožične (monofazni sistemi napajanja),
  - trožične i četvorožične (trofazni sistemi napajanja).
- Dvožični (monofazni) pasivni filteri koriste se i kao serijski, paralelni i hibridni.



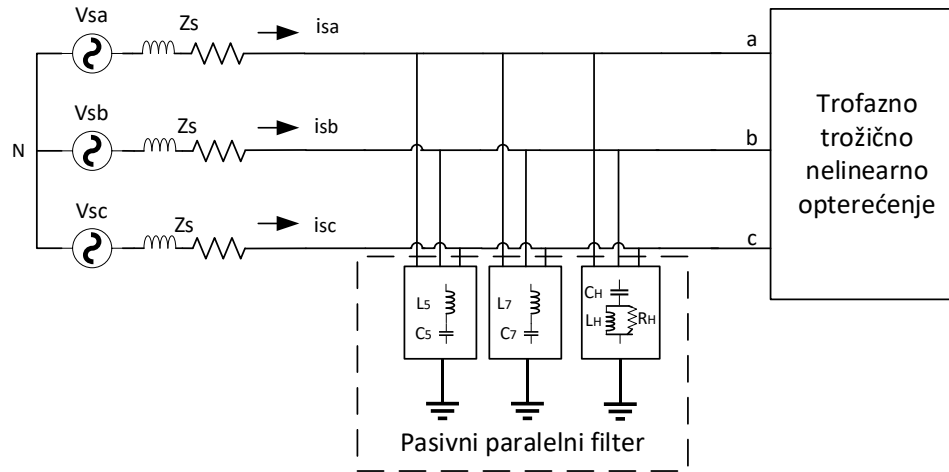
Monofazni paralelni PPF

$V_s$ ,  $i_s$ ,  $Z_s$  – napon, struja i impedansa mreže (source)

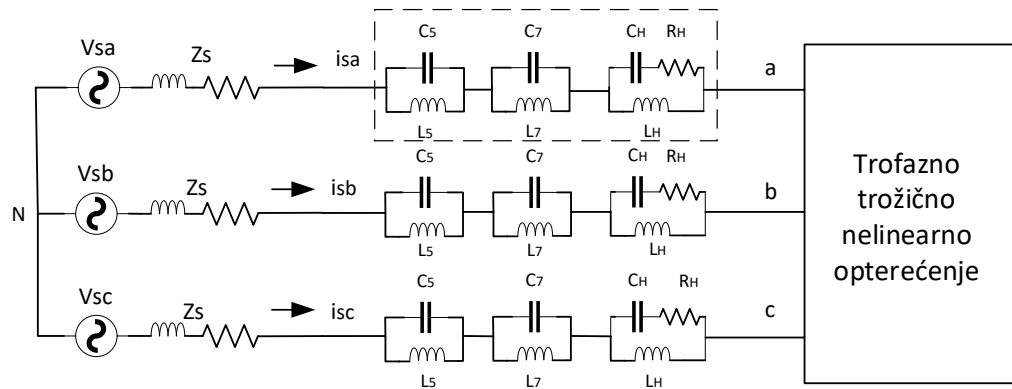
$C_H$ ,  $L_H$ ,  $R_H$  – kapacitivnost, induktivnost i otpornost pasivnog paralelnog filtera za ostale više učestanosti

# Klasifikacija filtera prema broju faza[2]

- Trofazni trožični predstavljaju filtere sa najširoom primenom, zbog velike zastupljenosti trofaznih sistema u elektroenergetici.



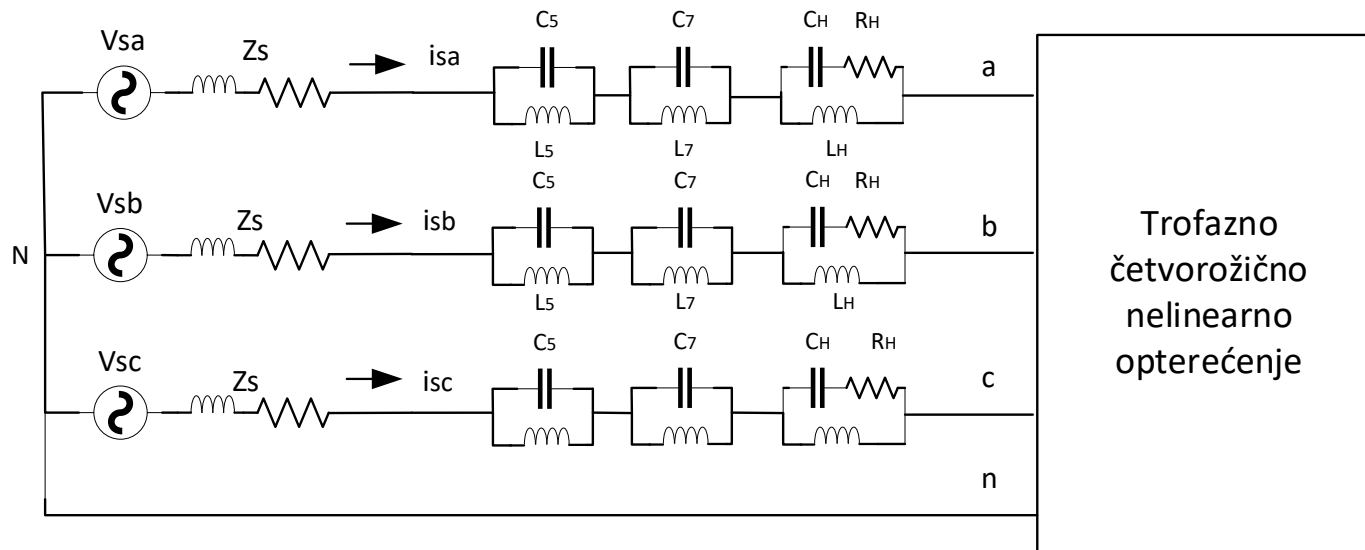
Trofazni trožični paralelni PPF  
Pasivni serijski filter



Trofazni trožični redni (serijski) PPF

# Klasifikacija filtera prema broju faza[2]

- Četvorožična konfiguracija filtera je nastala zbog postojanja velikog broja monofaznih opterećenja koja se napajaju iz trofaznih mreža sa neutralnim provodnikom. Ova opterećenja dovode do pojave struje u neutralnom provodniku, što dovodi do debalansa, pojave neželjenih harmonika i reaktivne snage.



Trofazni četvorožični serijski filter (PPF)

# Osnovne karakteristike [2]

➤ Glavna svrha upotrebe filtera jeste smanjenje strujnih i naponskih harmonika na prihvatljiv nivo. Pomoću filtera se ne mogu potpuno eliminisati harmonici, već se samo mogu smanjiti na prihvatljiv nivo. Prihvatljiv nivo je definisan raznim evropskim i državnim standardima u energetici.

➤ Shvatanje principa rada filtera podrazumeva njihovo posmatranje i analizu sa više aspekata. Cena ovih filtera najviše zavisi od cene kondenzatora za naizmeničnu struju koja čini čak i do 60% ukupne cene filtera. Najjeftiniji filter nije onaj sa najjeftinijim komponentama, već filter koji za minimalna ulaganja adekvatno smanjuje harmonike, sa najmanjim utroškom reaktivne snage.

Tabela1:  
Osnovne  
karakteristike rednih i  
paralelnih filtera

	<b>Paralelni</b>	<b>Redni</b>
Uloga	Apsorpcija viših strujnih harmonika	Blokiranje strujnih harmonika na putu ka mreži
Način ostvarenja uloge	Podešavanje impedanse na nižu učestanost	Podešavanje što veće impedanse
Mesto povezivanja	U tački priključenja opterećenja	Između mreže i opterećenja
Dimenzionisanje	Prema naponu u tački priključenja	Prema struji opterećenja
Preciznost podešenja	Veoma dobro podešeni (na nižim učestanostima uz visok faktor dobrote)	Manja preciznost (visoka učestanost uz manji faktor dobrote)
Cena	Niža (učestala primena)	Viša (ređa primena)

# Analiza i projektovanje filtera [2]

➤ Projektovanje filtera predstavlja jedan iterativni postupak. Završetak bilo kog iterativnog postupka podrazumeva trenutak postizanja željene tačnosti. Kod filtera je to trenutak zadovoljenja uslova vezanih za harmonijska izobličenja (THD - Total Harmonic Distortion) napona i struje, kao i uslova koji se odnose na faktor snage. Preduslov početka prve iteracije jeste poznavanje podataka o nelinearnom opterećenju koje izaziva strujne i naponske harmonike.

➤ Iterativni postupak obuhvata naredne korake [2]:

- Estimacija ili snimanje frekvencijskog spektra ulazne (mrežne) struje
- Dobijanje frekvencijske karakteristike impedanse na mestu priključenja filtera
- Odabir tipa i broja filtera, kao i podešene frekvencije
- Određivanje reaktivne snage koju treba da generiše svaki filter
- Estimacija parametara svakog dela pasivnog filtera
- Izračunavanje faktora prigušenja u funkciji učestanosti
- Provera postojanja na rezonantne učestanosti
- Promena podešene učestanosti onda kada je rezonantna učestanost bliska učestanosti strujnog harmonika i proračun novih parametara sa ciljem izbegavanja paralelne rezonanse sa mrežom
- Formiranje simulacionih modela, provera njihove ispravnosti i određivanje numeričkih vrednosti harmonijskih izobličenja struja i napona, kao i faktora pomeraja.



# Oštrina podešavanja pasivnih filtera

## Faktor dobrote Q [2]

➤ Delovi procedure projektovanja filtera su navedeni taksativno, bez navođenja jednačina koje zahtevaju malo detaljniju analizu. Postoji veliki broj različitih topologija, koje imaju slične delove projektovanja. **Svaka prigušnica koja je deo pasivnog filtera sadrži u sebi određenu omsku otpornost, tako da se pri projektovanju ne mogu u potpunosti zanemariti gubici koje strujni harmonici prave pri prolasku kroz filter. Iz tog razloga se prigušnica modeluje kao redna veza omske otpornosti i induktivnosti.**

➤ Faktor dobrote (Q) je jedna od važnih karakteristika pasivnih filtera. **Izražena brojnomo vrednošću predstavlja faktor kvaliteta induktivnosti i poznat je kao oštrina podešavanja pasivnog filtera.**

➤ **Rezonantni paralelni pasivni filter se smatra podešenim za određenu učestanost, ako je na datoj učestanosti njegova induktivna reaktansa jednaka njegovoj kapacitivnoj reaktansi.**

➤ Rezonantni pasivni filteri koji se projektuju za niže učestanosti oštro su podešeni i imaju visoku vrednost faktora dobrote ( $10 < Q < 100$ ), poželjno između 30 i 60.

➤ Ostale vrste paralelnih pasivnih filtera, kao što su prigušni filteri i visokopropusni filteri (imaju malu impedansu u širokom opsegu učestanosti), podešeni su za visoke frekvencije i imaju malu vrednost faktora dobrote ( $0.5 < Q < 5$ ), poželjno između 1 i 2.

➤ Faktor dobrote Q, definiše se izrazom:

$$Q = \frac{nX_L}{R} = \frac{X_C}{nR},$$

gde je  $n$  red harmonika za koji se projektuje paralelni pasivni filter, za koji važi da je:

$$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}, \quad X_L = j\omega L, \quad X_C = \frac{1}{j\omega C}$$

# Ograničenja za primenu pasivnih filtera [2]

## ➤ Ograničenja koja postoje za primenu pasivnih filtera [2]:

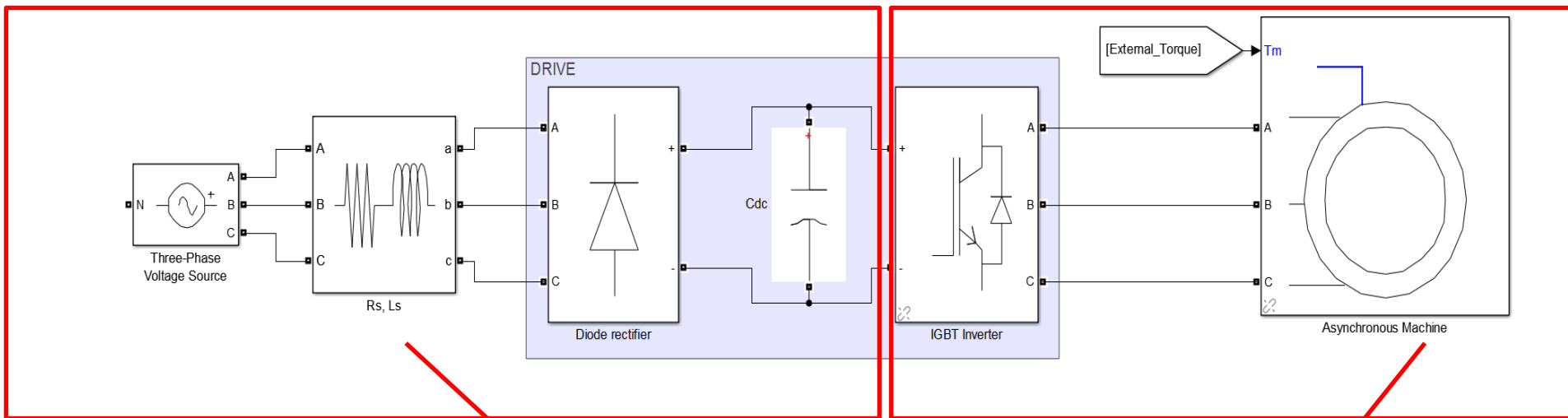
- Neprilagodljivost promenljivim uslovima sistema, jer ne mogu jednostavno da se menjaju veličine i podešena frekvencija.
- Promena uslova rada dovodi do razdešenja i povećanja izobličenja.
- Impedansa izvora utiče na dizajn filtera, **tako da impedansa filtera mora biti manja od impedanse izvora**. Povećanje veličine filtera dovodi do prekompenzacije reaktivne snage, a samim tim i do prenapona pri uključenju i podnapona pri isključivanju filtera.
- Ograničen broj elemenata filtera, jer pri kvaru ili gubitku nekog elementa može doći do promene rezonantne učestanosti, što prouzrokuje izobličenja koja prevazilaze dozvoljeni limit.
- Kod velikih filtera su velike i vrednosti gubitaka, tako da je veličina filtera zavisna i od ograničenja snage gubitaka.
- Uticaj okoline je takođe jedan od ograničavajućih faktora primene filtera.
- Pojava paralelne rezonanse je jedno od glavnih ograničenja za primenu pasivnih filtera.

# Pojava paralelne rezonanse [2]

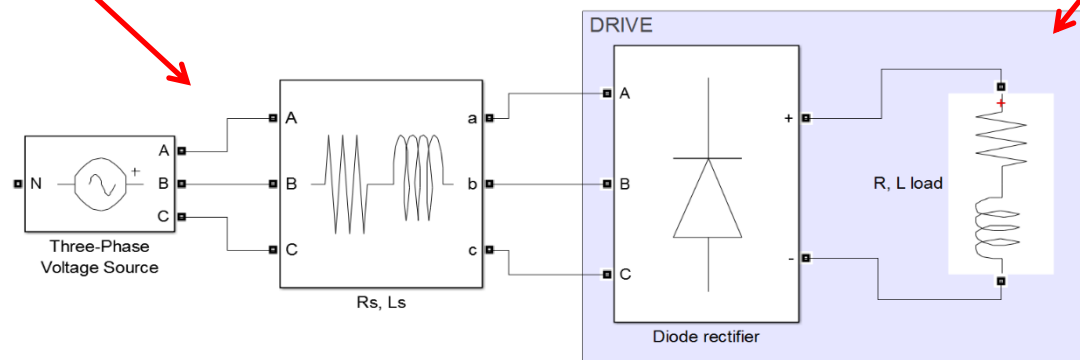
- Pojava paralelne rezonanse predstavlja zajednički problem svih paralelnih pasivnih filtara. Može se pojaviti i između impedanse izvora i impedanse kondenzatora za popravku faktora snage u tački priključenja nelinearnog opterećenja.
- **Uzrok ove pojave je nepoznata impedansa izvora.** Rezonansa nastaje kada su induktivna impedansa napajanja i kapacitivna impedansa filtra jednake, pa u paraleli čine beskonačno veliku impedansu na učestanosti  $f_r$ . Ona se naziva rezonantna učestanost.
- Ukoliko postoje učestanosti harmonika bliske rezonantnoj, doći će do povećanja strujnih harmonika i naponskih izobličenja. U slučaju učestale pojave povećanja strujnih harmonika, u praksi može doći do pregorevanja osigurača i do neželjenog reagovanja prekidača. **Paralelni pasivni filteri i kondenzatori za popravku faktora snage** ne prouzrokuju pojavu strujnih harmonika, **ali ih uvećavaju u slučaju ulaska u rezonansu sa impedansom napajanja.** Kada su poznati parametri čitavog sistema, relativno jednostavnim postupkom se može izračunati rezonantna učestanost.
- Načini izbegavanja pojave paralelne rezonanse:
  - Podešavanje rezonantne učestanosti tako da bude manja od učestanosti na kojoj se pojavljuju harmonici.
  - Upotreba malih aktivnih filtera vezanih na red sa mrežom ili na red sa pasivnim paralelnim filterom.
  - Dodavanjem pasivnog rednog filtera na red sa mrežom, pre paralelnog filtera.

# Primer proračuna rednih i paralelnih filtera u slučaju nelinearnog opterećenja [4]

- Kao primer tipičnog nelinearnog potrošača analizira se trofazni diodni ispravljač
- Trofazni diodni ispravljač predstavlja integralni deo većine frekventnih pretvarača koji se koriste u regulisanom elektromotornom pogonu

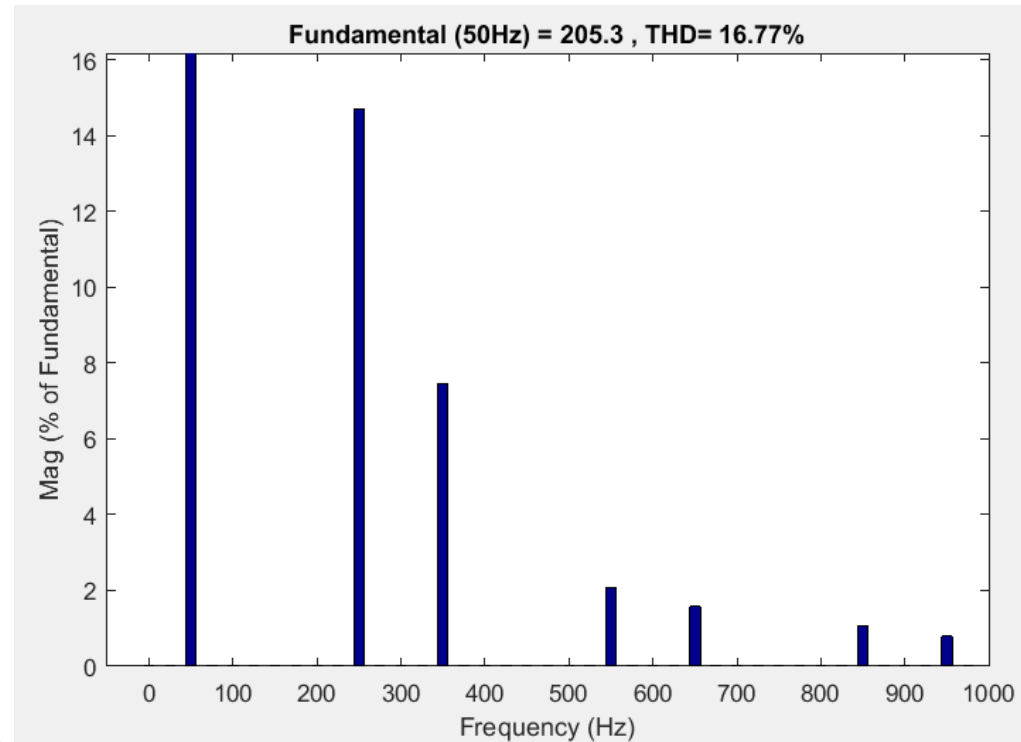
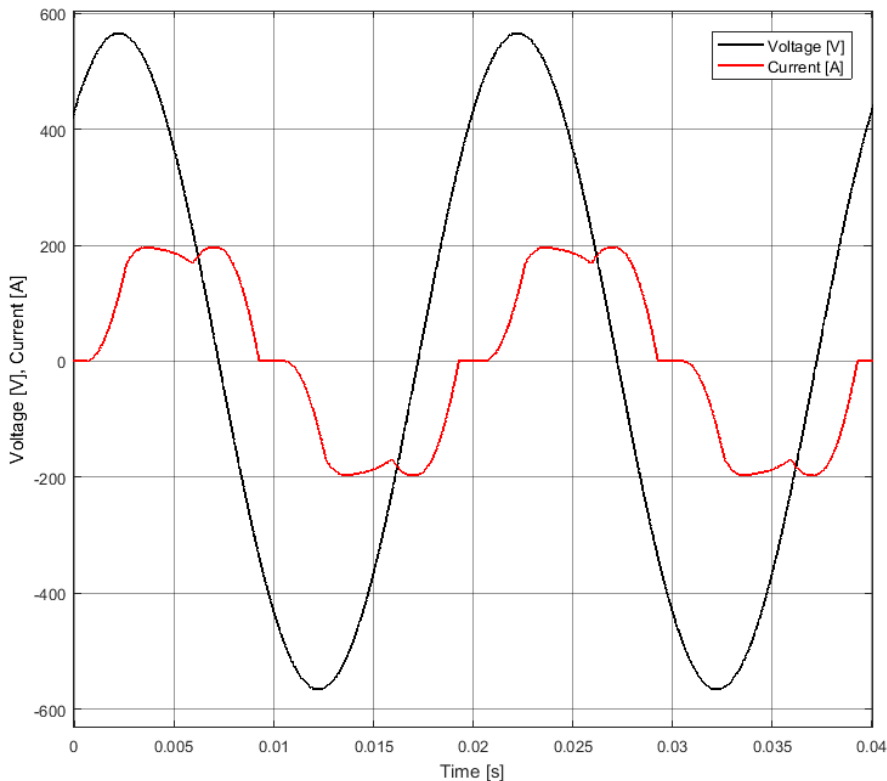


$U_n$	400 V	$f_n$	50 Hz
$R_s$	0.04 $\Omega$	$R_L$	2.5 $\Omega$
$L_s$	1 mH	$L_L$	25 mH



Model frekventnog pretvarača koji se koristi za analizu harmonika u mrežnoj struji

# Harmonijski spektar mrežne struje u slučaju da je opterećenje diodni ispravljač [4]

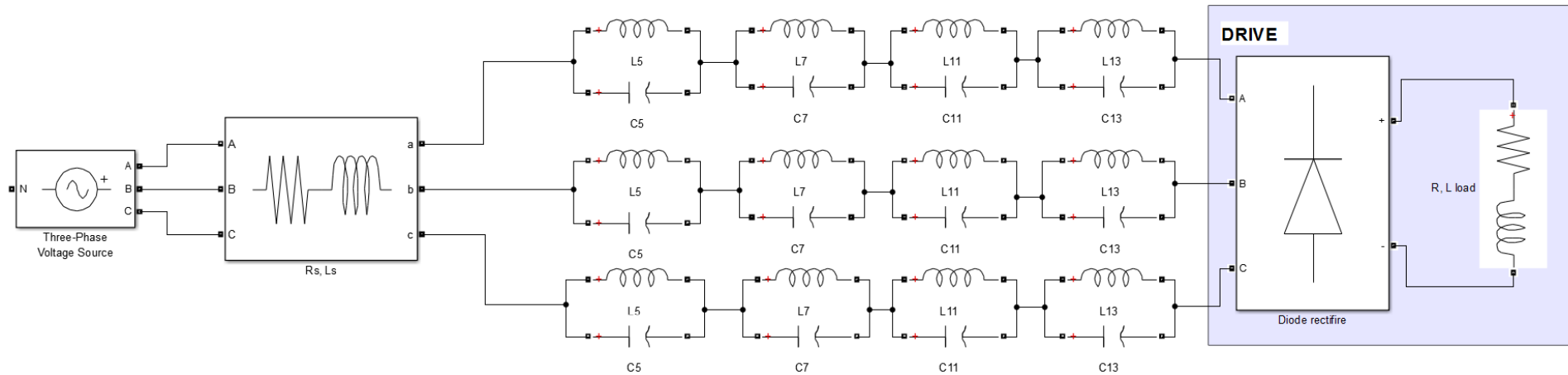


Tipičan talasni oblik mrežne struje u slučaju diodnog ispravljača kao nelinearnog potrošača

Harmonijski spektar mrežne struje u slučaju diodnog ispravljača kao nelinearnog potrošača

- Nelinearni potrošač koji stvara harmonike u mrežnoj struji je šestopulsni diodni ispravljač
- Harmonijski spektar mrežne struje sadrži harmonike reda  $6k \pm 1$ , bez harmonika trećeg reda (i njegovih umnožaka)

# Redni pasivni filteri [4]



**Model rednih filtera u Simulinku**

➤ Pad napona na impedansi  $Z=R+jX$  kada se prenosi prividna snaga  $S=P+jQ$  od izvora do potrošača, može se približno izračunati na osnovu izraza (1). Zanemarujući  $R$ , reaktansa rednog pasivnog filtera na osnovnoj učestanosti se može izračunati na osnovu izraza (2).

$$\Delta V \approx \frac{PR + QX}{V} \quad (1)$$

$$X = \frac{\Delta V \cdot V}{Q} \quad (2)$$

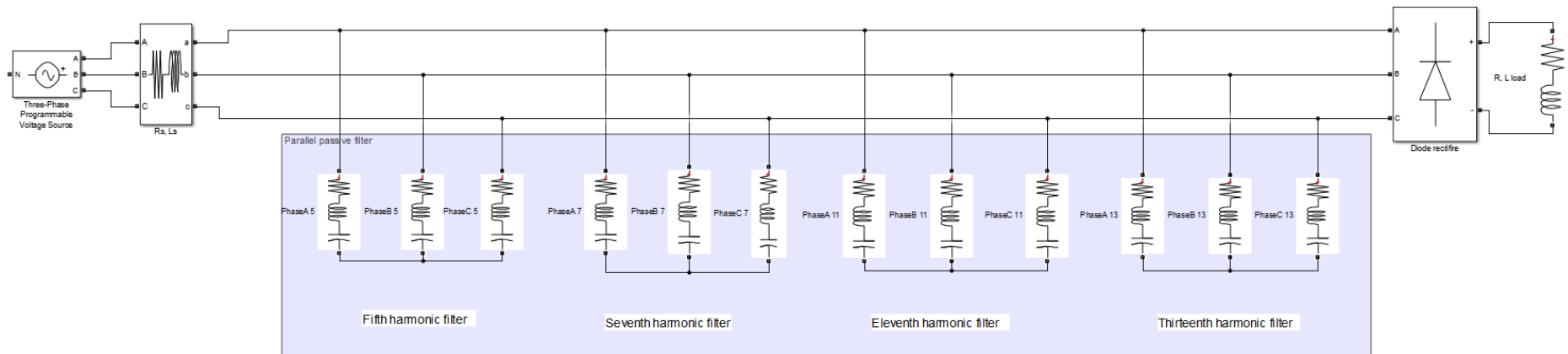
➤ Ako se usvoji da je  $U=400$  V, a  $Q=400$  kVar, sa relativnim padom napona po fazi u iznosu od 12% (pad napona na svakom pojedinačnom filteru je 3-4% [2]), reaktansa rednog pasivnog filtera iznosi  $X=0.192\Omega$  na osnovu izraza (2). Svaka pojedinačna induktivnost u filterima 5, 7, 11 i 13 harmonika ima istu vrednost  $L=X/(4 \cdot \omega)=0.1528$  mH.

➤ Redni filteri su podešeni da ostvare paralelnu rezonancu za zadatu učestanost  $\omega$ , tako da je:

$$\frac{1}{j\omega L} + j\omega C = 0 \quad C = \frac{1}{\omega^2 L} \quad (3), \text{ pa su kapacitivnosti rednih pasivnih filtera:}$$

$C_5=2.655$  mF,  $C_7=1.354$  mF,  $C_{11}=0.548$  mF,  $C_{13}=0.392$  mF.

# Paralelni pasivni filteri [4]



## Model paralelnog pasivnog filtera (PPF) u Simulink-u

- Impedansa paralelnog pasivnog filtera za datu učestanost je:

$$Z(\omega) = R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (4)$$

- Izraz za određivanje impedanse  $n$ -tog harmonika, koji odgovara rezonantnim uslovima, iznosi:

$$Z(n\omega_0) = R + j \left( n\omega_0 L - \frac{1}{n\omega_0 C} \right) = R \quad (5)$$

gde je  $\omega_0$  osnovna učestanost, a  $n$  je:

$$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}, \quad X_L = j\omega L, \quad X_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (6)$$

# Paralelni pasivni filteri [4]

- Impedansa paralelnog pasivnog filtera na osnovnoj učestanosti je dominantno kapacitivna i reaktivna snaga koju filter generiše može da se izračuna na osnovu izraza (7).

$$Q_c = \frac{V^2}{X_C - X_L} = \frac{V^2}{X_C} \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (7)$$

- Važna karakteristika paralelnog pasivnog filtera je faktor dobrote Q, definisan izrazom (8). On određuje oblik funkcije impedanse u zavisnosti od učestanosti u okolini rezonantne učestanosti, a tipična vrednost mu se kreće između 30 i 60.

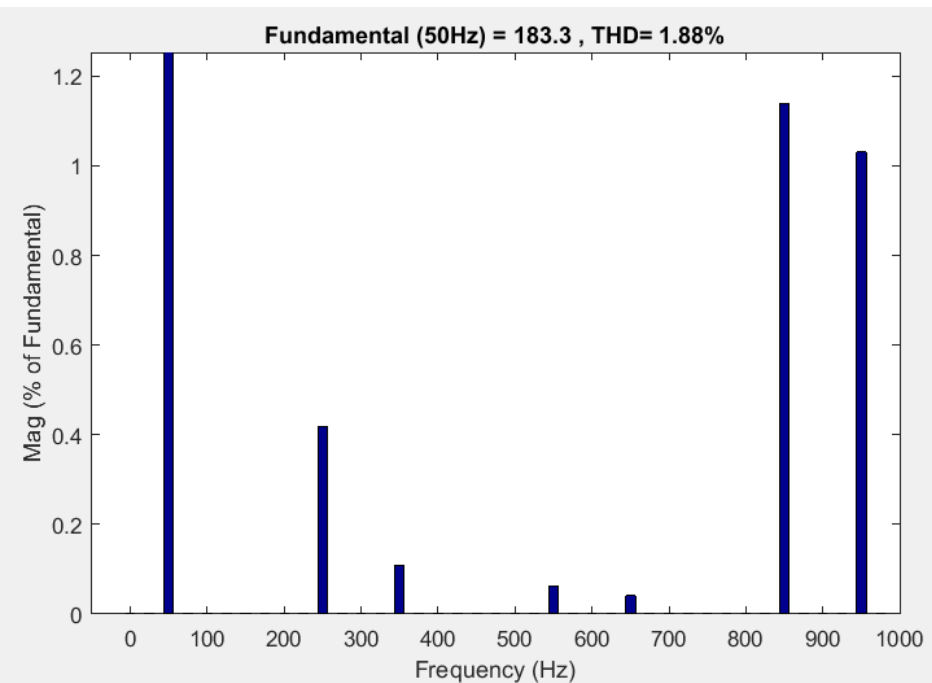
$$Q = \frac{nX_L}{R} = \frac{X_C}{nR} \quad (8)$$

	n=5	n=7	n=11	n=13
R	0,2364 Ω	0,1688 Ω	0,1074 Ω	0,0907 Ω
L	4,4 mH	2,3 mH	0,93 mH	0,066mH
C	89,77 μF	89,77 μF	89,77 μF	89,77 μF

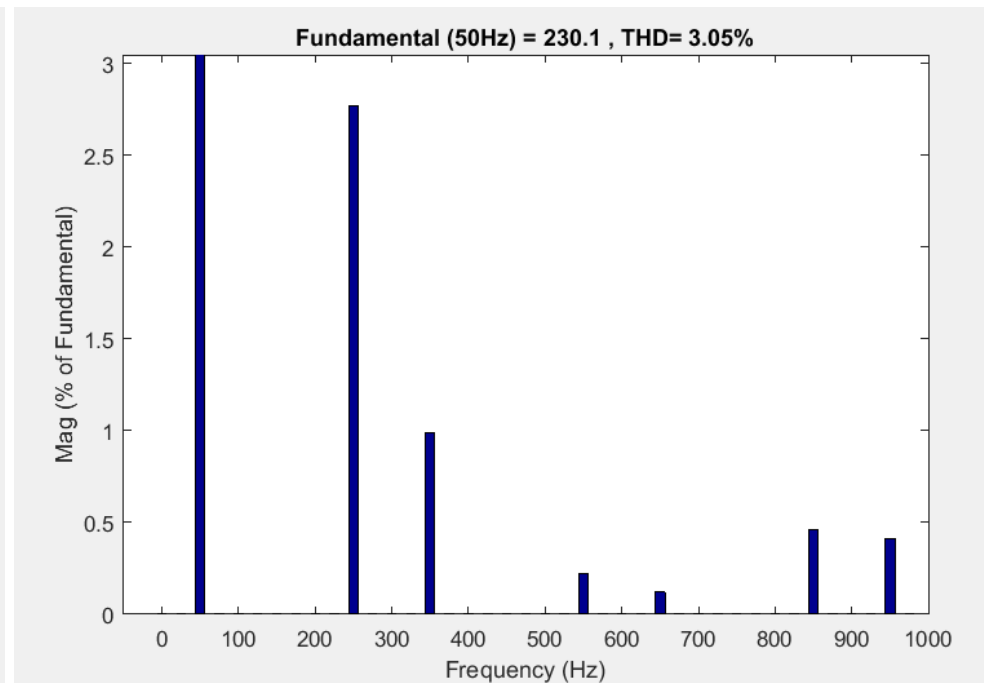
**Izračunate vrednosti sa komponente pasivnih paralelnih filtera**



# Rezultati simulacija za redni i paralelni pasivni filter [4]



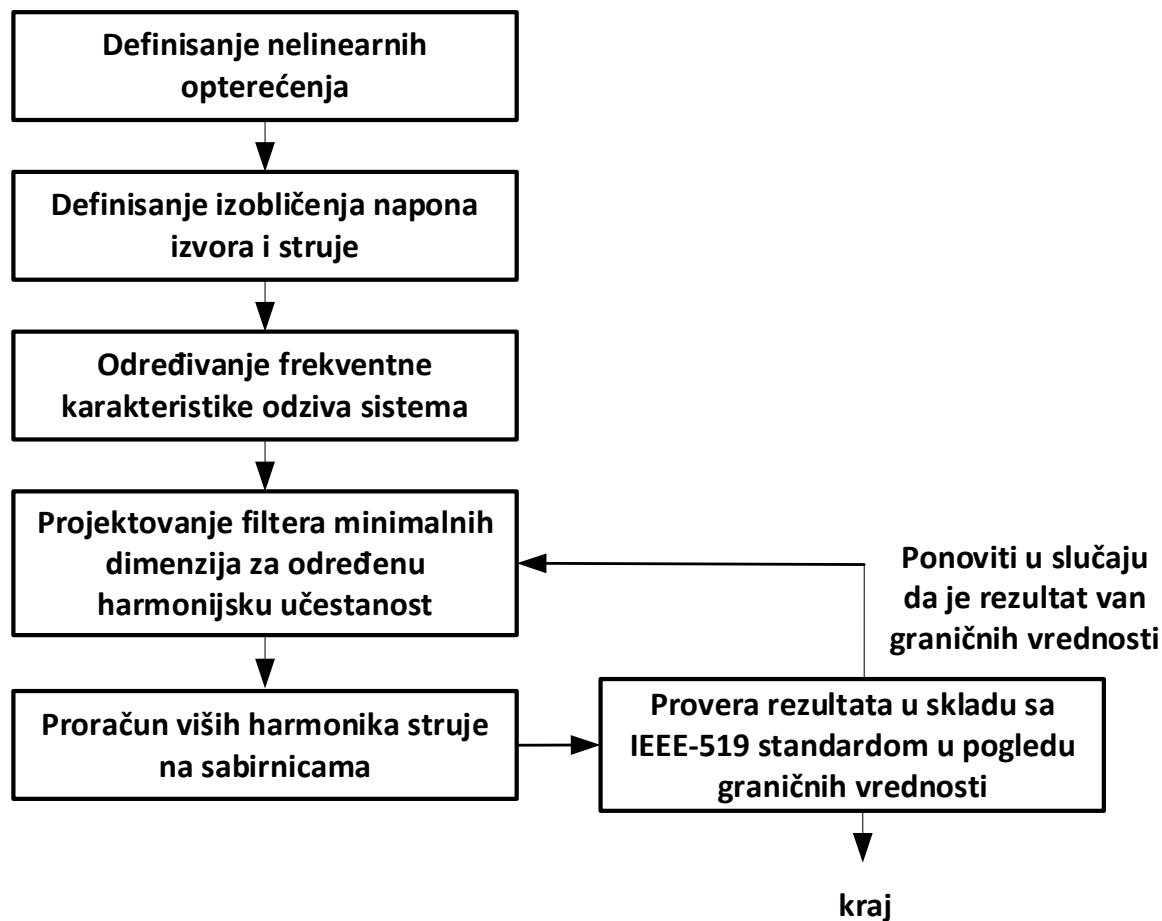
Redni pasivni filter



Paralelni pasivni filter

# Rezime: Projektovanje pasivnih filtera [3]

- Procedura za projektovanje se odvija u nekoliko koraka čiji je cilj da se dobije rešenje sa najmanjom cenom i zadovoljavajućim ponašanjem u okviru THD granica propisanih standardom.

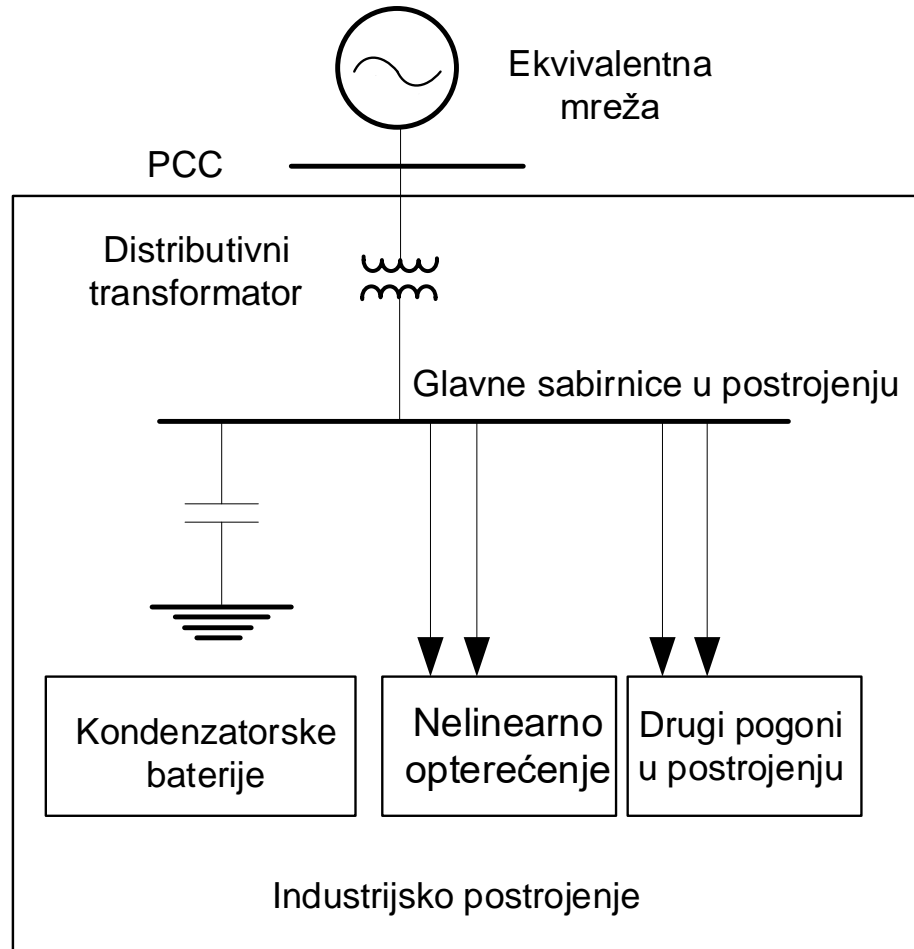


## 1. Definisane nelinearnih opterećenja

- Treba izvršiti merenja sa ciljem da se odredi nivo harmonika koje generiše dato nelinearno opterećenje.

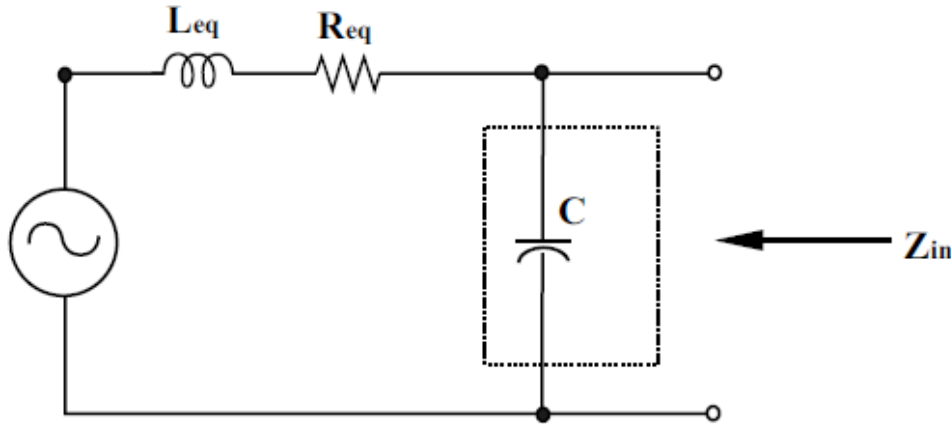
## 2. Definisane izobličenja napona izvora i struje

- Vršni se na osnovu modela elektroenergetskog sistema, na osnovu jednopolne šeme i podataka od različitih proizvođača elektro opreme.



### 3. Određivanje frekventne karakteristike odziva sistema

- Da ne bi došlo do pojave rezonantne učestanosti koju može u sistemu uzrokovati primena pasivnog filtera, mora se prethodno izvršiti proračun prikazivanjem sistema preko ekvivalentnog električnog kola.



$$Z_{in} = \frac{(R_{eq} + j\omega L_{eq})(-j/\omega C)}{R_{eq} + j\omega L_{eq} - j/\omega C}$$

$L_{eq}$  – ekvivalentna induktivnost sistema (mreže) i transformatora  
 $R_{eq}$  – ekvivalentna otpornost sistema (mreže) i transformatora

- Paralelna rezonansa nastaje kada je :

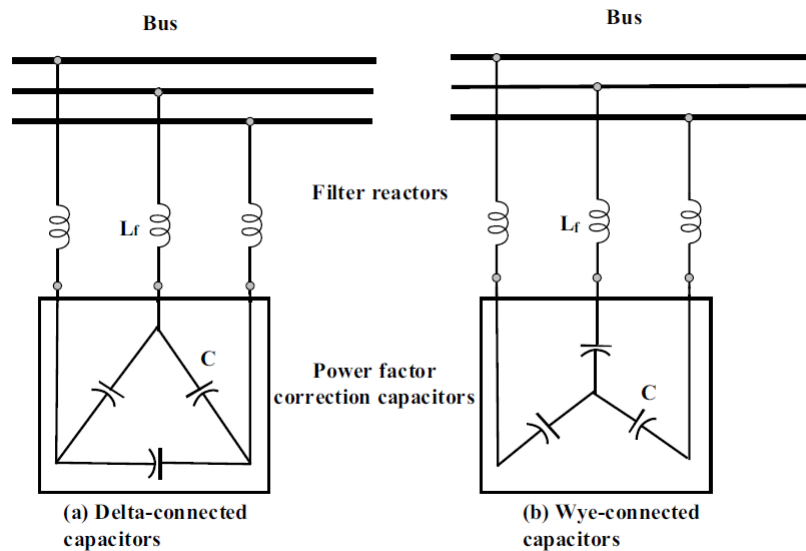
$$\omega_0 L_{eq} - 1/\omega_0 C = 0$$

$$\omega_0 = \frac{1}{[L_{eq} C]^{1/2}}$$

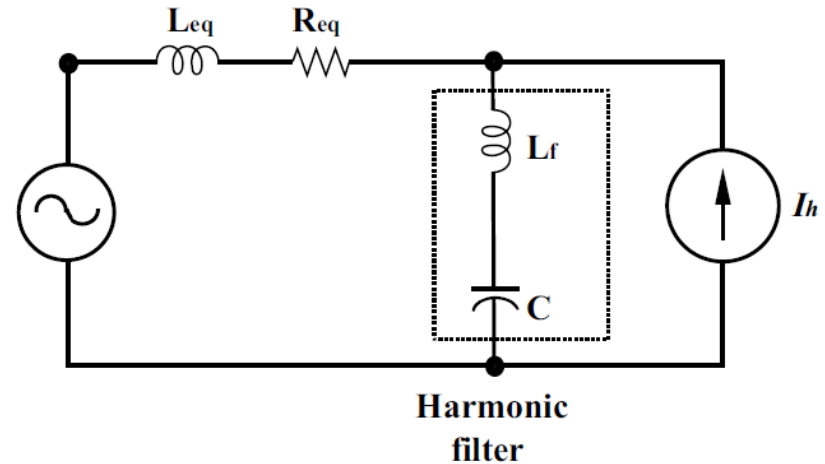
$$f_0 = \frac{1}{2\pi [L_{eq} C]^{1/2}}$$

## 4. Projektovanje filtera minimalnih dimenzija za određenu harmonijsku učestanost

- Ako se ne filtriraju harmonici koji potiču od potrošača u nekom industrijskom postrojenju, oni mogu da utiču na mrežu. U zavisnosti od snage kratkog spoja definisane za date sabirnice, zavisice izobličenje napona - može da bude veliko i da utiče na druge potrošače.
- Najčešće korišćene konfiguracije su:



Primena kondenzatorskih baterija kao filtera za određenu harmonijsku komponentu



Ekvivalentno kolo kompenzovanog sistema sa prikazanim harmonijskim filterom

## 5. Proračun viših harmonika struje na sabirnicama

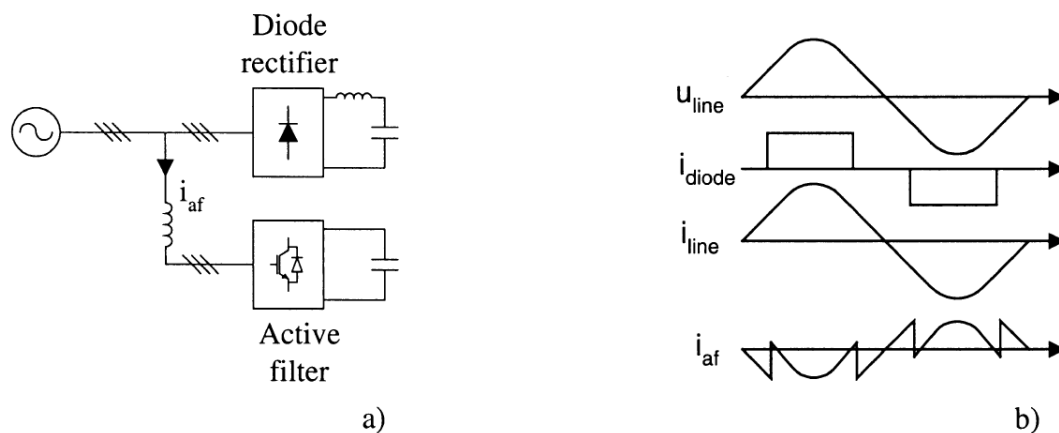
- Treba izvršiti proračun da bi se odredio nivo izobličenja struje na sabirnicama u sistemu sa filterom. Rezultat treba da bude vrednost svakog pojedinačnih harmonika, izobličenja struje i napona, kao i efektivne vrednosti napona i struje.

## 6. Provera rezultata u skladu sa IEEE-519 standardom u pogledu graničnih vrednosti

# Aktivni filteri [3]

-Jedan od načina da se prevaziđu nedostaci pasivnih paralelnih filtera je da se koriste aktivni filteri. Oni predstavljaju **produkt traženja prilagodljivog i dinamičkog rešenja za probleme koji nastaju primenom pasivnih filtera.**

- Aktivnim filterom se upravlja na takav način da on umesto izvora preuzme komponentu kompenzacije  $i_{af}$  i na taj način uklanja više harmonike iz struje na naizmeničnoj strani diodnog mosta.



a) Aktivni paralelni filter b) Teorijski izgled struja u cilju postizanja sinusoidalne linijske struje

-Najčešće korišćena topologija aktivnog paralelnog filtera se sastoji od 6 IGBT-a i u suštini je ista kao u slučaju aktivnog ispravljača.

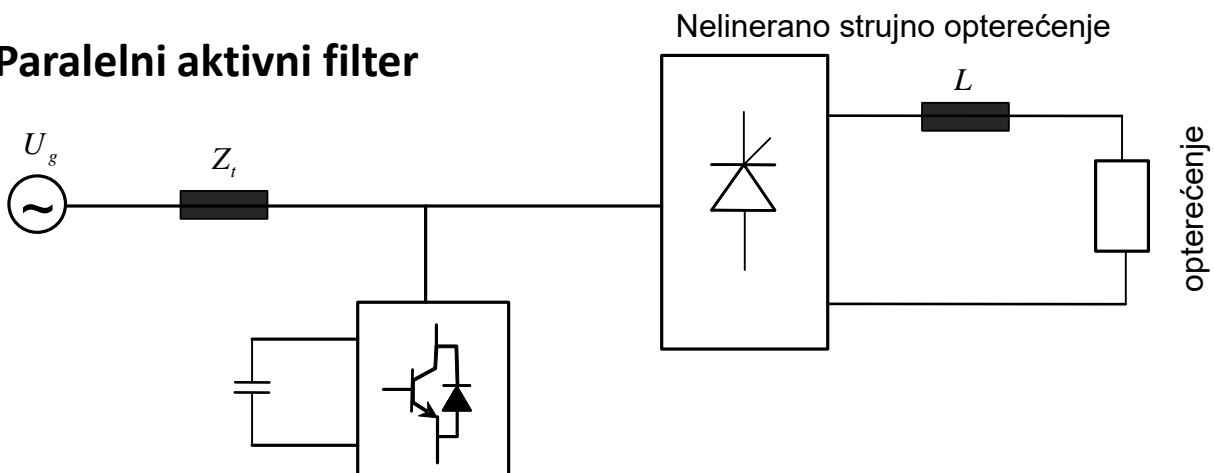
- U poslednje vreme se koriste i aktivni redni i hibridni filteri, koji predstavljaju kombinacije aktivnih i pasivnih filtera.

# Aktivni filteri [4]

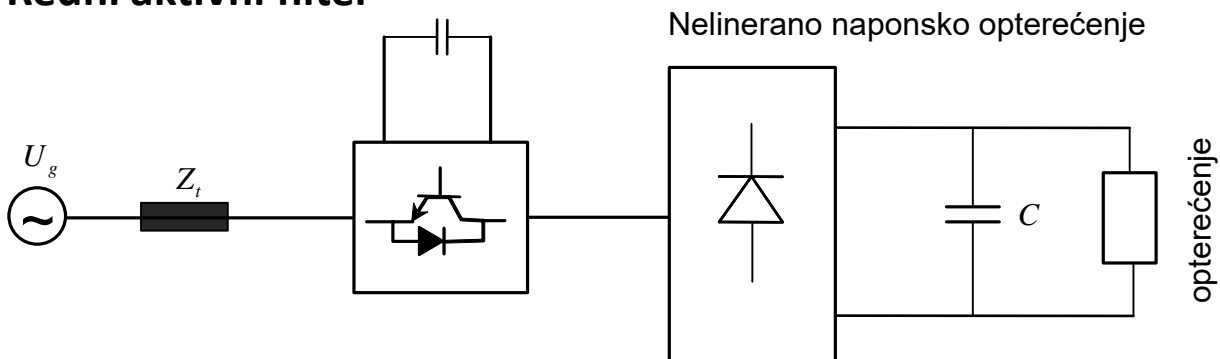
- Aktivni filter se koristi za **eliminaciju harmonika u mrežnoj struji** i kao posledica toga, za **smanjenje izobličenja napona, kao i kompenzaciju reaktivne snage.**
- **Postoje dve vrste aktivnih filtera - serijski i paralelni aktivirani filter.**
- Osnovna topologija oba tipa filtera aktivne snage je ista: sastoje se od jednofaznog ili trofaznog naponskog ili strujnog invertora, koji se obično napaja iz kondenzatorskih baterija.
- **Serijski aktivni filter priključen je redno sa električnim opterećenjem osetljivim na loš kvalitet napona, putem spojnog transformatora.** Svrha ovog filtera je uklanjanje viših harmonika iz talasnog oblika napona, propada napona, prenapona i neravnoteže napona na strani opterećenja kontrolom napona preko spojnog transformatora. **Zbog toga serijski filteri deluju kao regulatori napona izolujući više harmonike između osetljivog potrošača i distributivne mreže [4].**
- **Paralelni aktivni filter (SAPF) je strujno kontrolisan naponski pretvarač (VSC) sa IGBT tranzistorima,** sa kondenzatorom na jednosmernoj (ulaznoj) strani i sa naizmeničnom stranom (izlazna strana) povezanom paralelno sa nelinearnim opterećenjem.
- **VSC zahteva mali filter za ublažavanje viših harmonika nastalih kao posledica prekidačkih akcija tranzistora izazvanih histerezisom ili PWM kontrolom struje.**
- Oni takođe zahtevaju senzore napona i struje za povratne signale i DSP za primenu algoritma upravljanja, na osnovu koga se generišu impulsi na gejtu tranzistora [4], zajedno sa mnogim pasivnim elementima (kondenzatorom u jednosmernom međukolu, prigušnicama sa naizmenične strane i malim pasivnim filterima).

# Aktivni filteri

**Paralelni aktivni filter**



**Redni aktivni filter**





# Hibridni aktivni/pasivni filteri [2]

- **Osnovni cilj sve tri konfiguracije je da se smanje početne investicije i da se poboljša energetska efikasnost** raznih industrijskih aplikacija u kojima regulisani elektromotorni pogoni predstavljaju neizostavni deo ponašajući se pri tome kao nelinearno opterećenje.
- Hibridna konfiguracija podrazumeva kombinaciju pasivnih i aktivnih filtara, sa ciljem postizanja što boljih rezultata filtracije signala.
- Hibridni filter može nastati kao kombinacija dva ili više aktivnih filtera, dva ili više pasivnih filtera, ili kao kombinacija pasivnih i aktivnih. Ovaj tip filtara, samim tim, ima najznačajniji doprinos u poboljšanju kvaliteta električne energije, uz potpunu ekonomsku isplativost.
- Hibridni filteri sastavljeni kombinovanjem aktivnih i pasivnih služe za bolju eliminaciju harmonika sa strane opterećenja. Pri tome, **pasivni filteri se koriste za apsorpciju harmonijskih komponenti sa fiksnom učestanošću, dok se aktivni filtri koriste za eliminaciju harmonijskih komponenti sa promenljivom učestanošću**, koje se javljaju zbog dinamičke prirode opterećenja. Tako dobijeni hibridni filtri imaju veoma dobre karakteristike i visok stepen filtracije harmonika, a pri tom su isplativi.

# Aktivni paralelni filteri (SAPF) - podela [2, 5]

- Paralelni aktivni filteri se koriste za kompenzaciju strujnih harmonika proizvedenih od strane nelinearnog opterećenja. **Oni ispituju harmonijski sastav mrežne struje i injektuju strujne harmonike amplitude jednake izmerenim, ali fazno pomerene za  $180^\circ$ .** Na taj način struja mreže, tj. napajanja ostaje sinusoidalna. Sem toga, ovi filteri obezbeđuju kompenzaciju strujnih harmonika za različita nelinearna opterećenja, sa brzim odzivom na promene opterećenja.

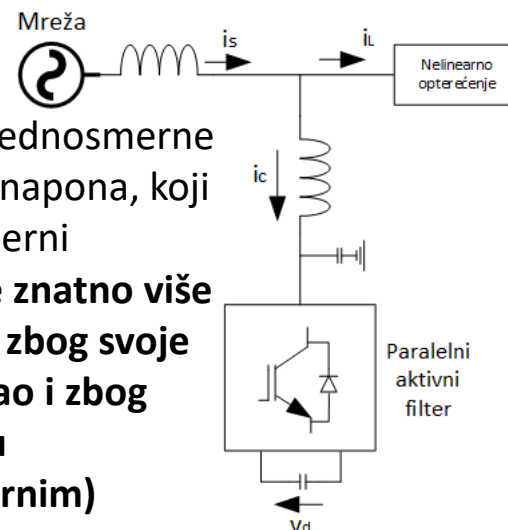
- Podela se vrši na osnovu:

1. tipa korišćenog pretvarača: strujni i naponski SAPF
2. vrste topologije: polumosni, mosni i H-most SAPF
3. sistema napajanja: monofazni dvožični, trofazni trožični i trofazni četvorožični SAPF



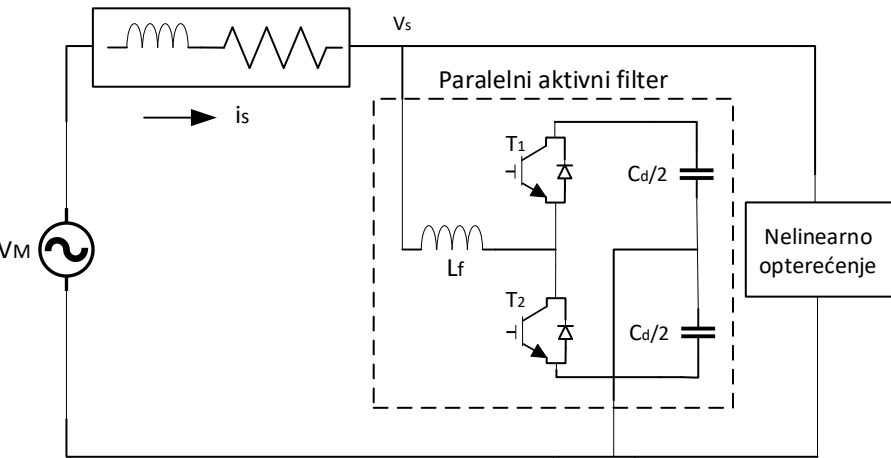
SAPF sa strujno napajanim pretvaračima su pouzdani, ali imaju velike gubitke i zahtevaju visoke vrednosti kapacitivnosti paralelno vezanog kondenzatora. Zato se ovaj tip pretvarača ne koristi u višestepenim (modularnim) filterima.

Naponski SAPF sadrži jednosmerne sabirnice konstantnog napona, koji održava veliki jednosmerni kondenzator. **Koristi se znatno više nego strujno napajani zbog svoje manje težine i cene, kao i zbog mogućnosti primene u višestepenim (modularnim) filterima,** radi poboljšanja rada na niskim učestanostima

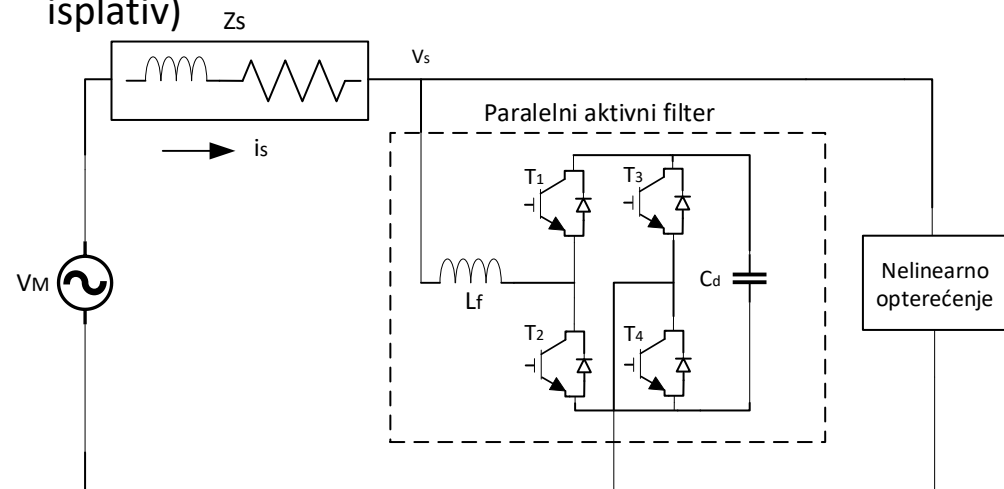


Paralelni aktivni filter

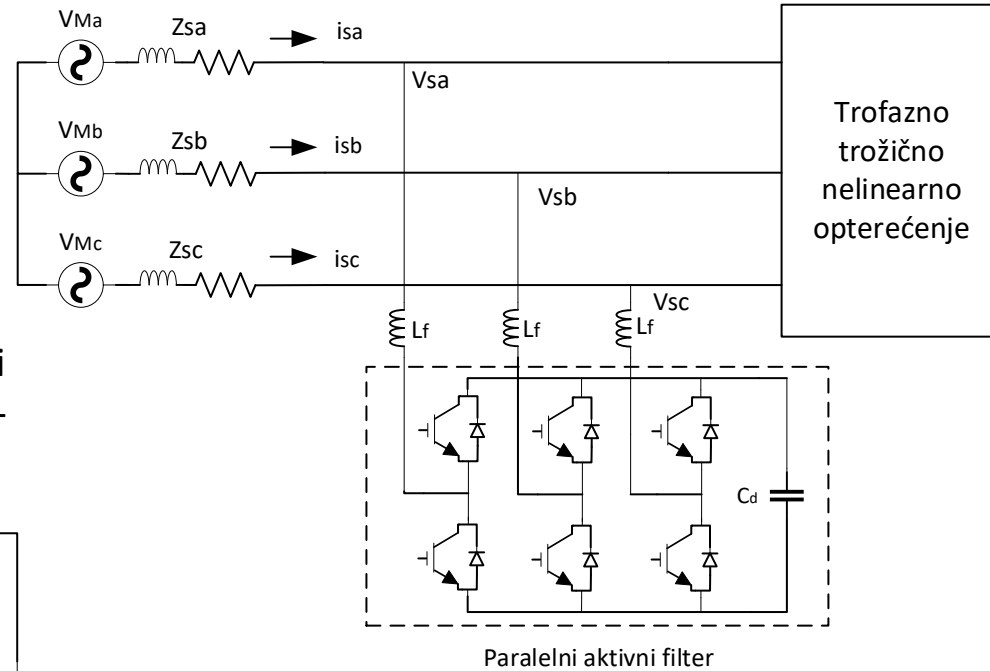
# Aktivni paralelni filteri (SAPF) - podela [2, 5]



Monofazni polumosni SAPF sa naponski napajanim pretvaračem (manji broj komponenti – isplativ)

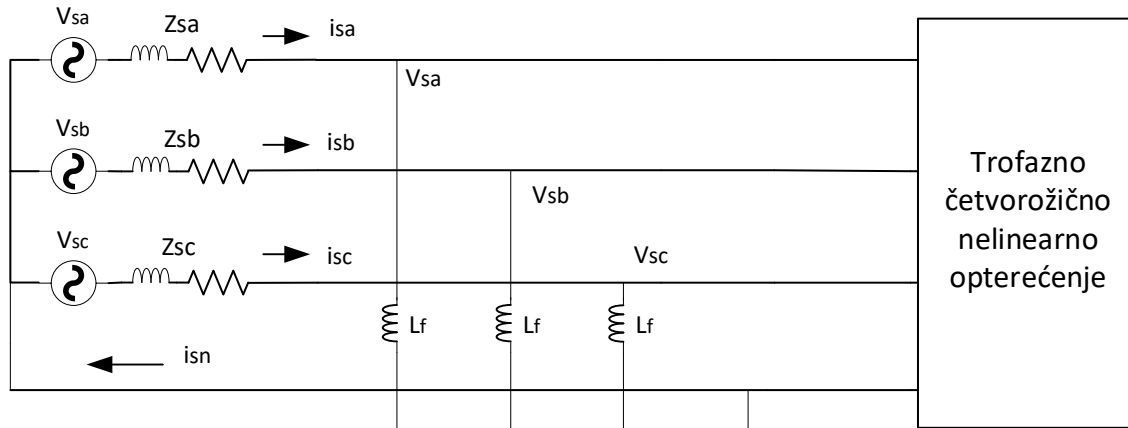


Monofazni mosni SAPF sa naponski napajanim pretvaračem (ne zahteva izolacioni transformator; idealan za trofazne sisteme).

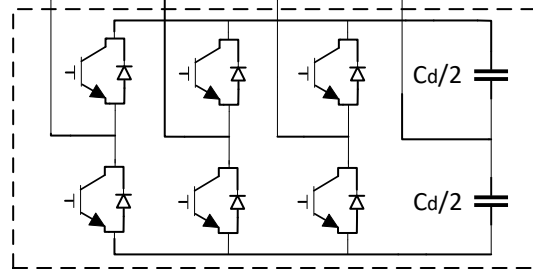


Trofazni trožični SAPF

# Aktivni paralelni filteri (SAPF) - podela [2, 5]

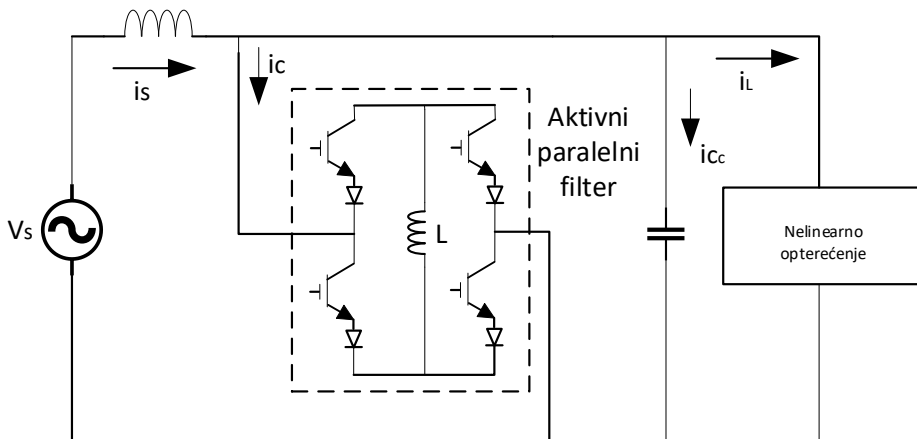


Trofazni četvorožični SAPF

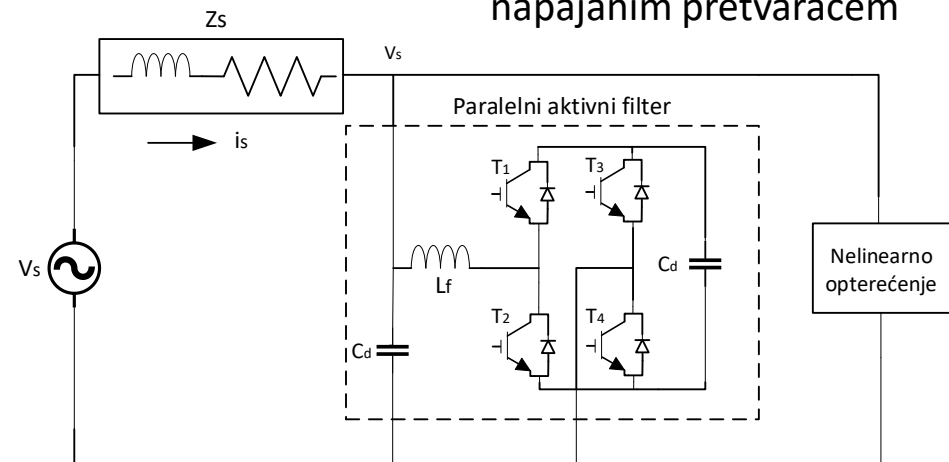


Paralelni aktivni filter

Dvožični SAPF sa strujno napajanim pretvaračem

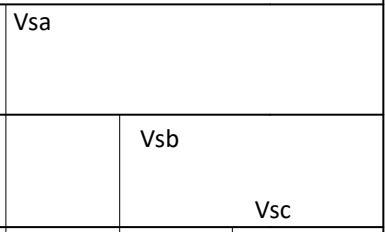
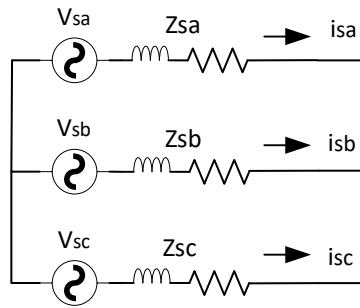


Dvožični SAPF sa naponsko napajanim pretvaračem

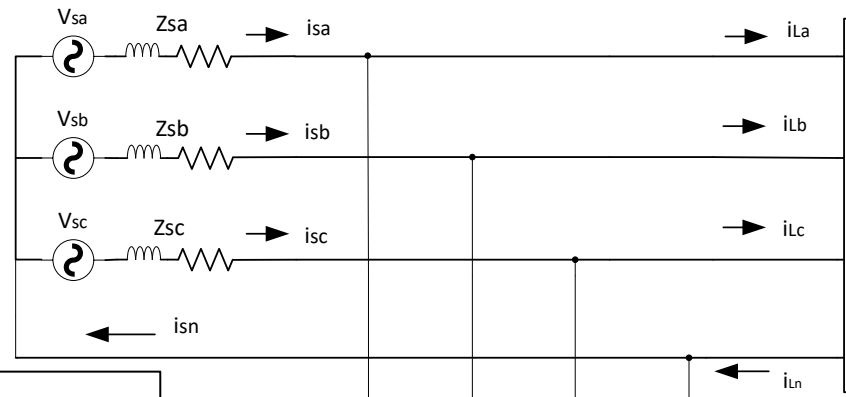


# Aktivni paralelni filteri (SAPF) - podela [2, 5]

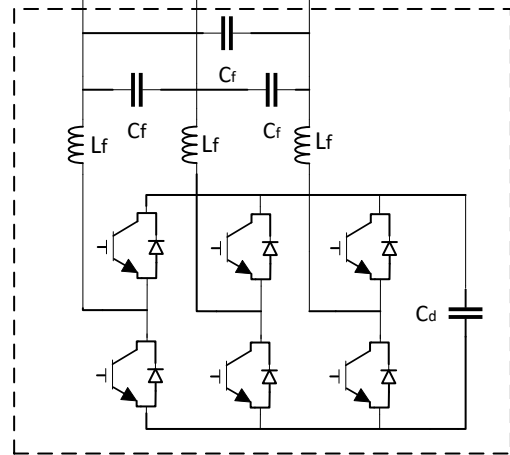
Trožični SAPF sa naponski napajanim pretvaračem



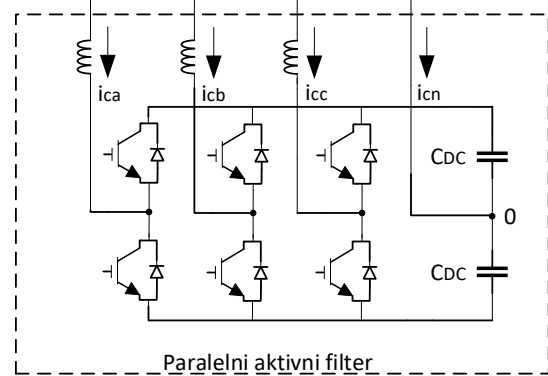
Trofazno trožično nelinearno opterećenje



Trofazno četvorožično nelinearno opterećenje



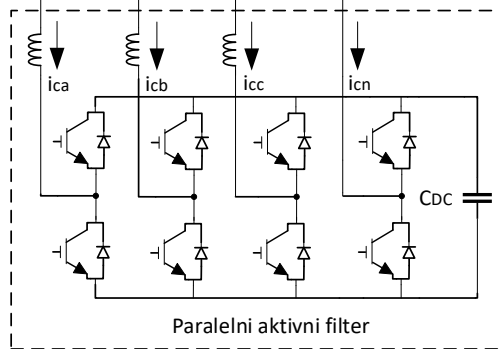
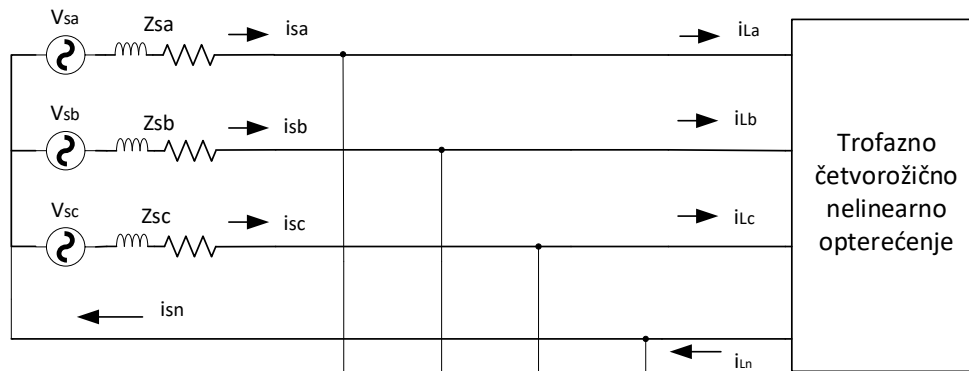
Paralelni aktivni filter



Paralelni aktivni filter

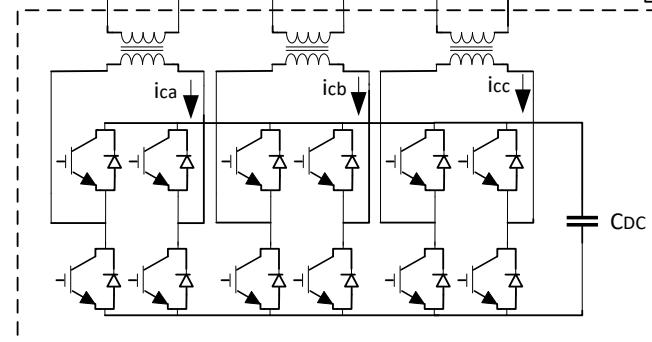
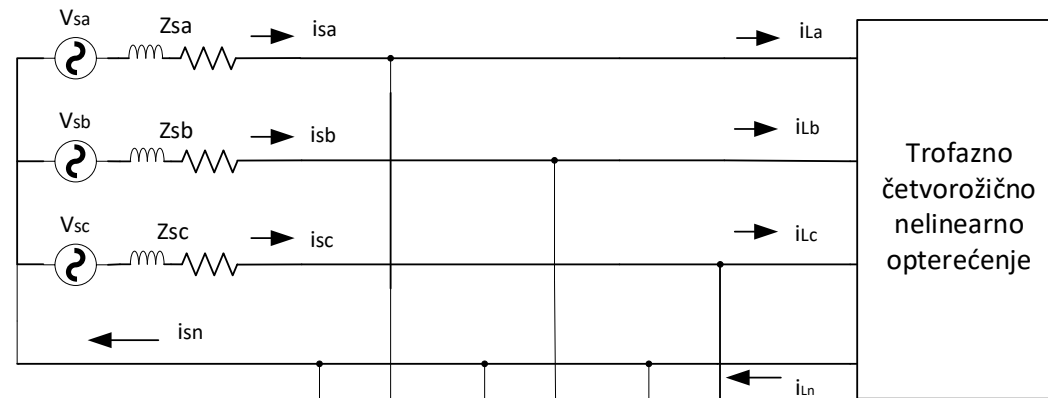
Četvorožični SAPF sa dva kondenzatora i srednjom tačkom

# Aktivni paralelni filteri (SAPF) - podela [2, 5]



Četvoropolni četvorožični SAPF

Četvorožični SAPF sa tri H - mosta



Paralelni aktivni filter

# Aktivni paralelni filteri (SAPF) - podela [2, 5]

- **H – mosni SAPF se najčešće koristi u industrijskim primenama.** Sastoji se od dve grane sa po dve prekidačke komponente. Pri tome je upravljanje dvema granama nezavisno, što doprinosi smanjenju gubitaka i smanjenju prekidačke učestanosti. Svaka faza sistema napajanja ima svoj H – most koji zahteva odvojeni izolacioni transformator, podudaranje napona i pouzdanost.
- **Trofazni trožični SAPF se veoma često koriste u trofaznim sistemima sa trofaznim nelinearnim opterećenjem.** Zbog veoma široke primene, ima mnogo varijacija ove vrste filtera, strujno ili naponski napajanih, jednostepenih ili višestepenih.
- **Veliki broj monofaznih potrošača se može napajati iz trofaznih mreža sa neutralnim provodnikom,** uzrokujući pritom pojavu prevelike struje neutralnog provodnika, pojavu harmonika, opterećenje reaktivnom snagom, kao i pojavu nesimetričnih struja. **Za smanjenje navedenih problema u četvorožičnim distributivnim sistemima koriste se četvorožični SAPF, sa strujno i sa naponski napajanim pretvaračem.**
- U četvorožičnim konfiguracijama, četvorožični SAPF sa dva kondenzatora i srednjom tačkom koristi se u sistemima male snage. Struja neutralnog provodnika prolazi kroz DC kondenzatore, koji imaju veliku kapacitivnost. U četvoropolnoj četvorožičnoj konfiguraciji, koristi se četvrti pol za stabilizaciju neutralne tačke SAPF – a. Najčešće korišćena je konfiguracija sa tri H - mosta, koja vodi računa o podudaranju napona i obezbeđuje pouzdanost paralelnog aktivnog filtera.

# Aktivni paralelni filteri (SAPF) – osnovne komponente [2, 5]

- Filter je sam po sebi sklop više različitih komponenata među kojima svaka ima određenu ulogu u mehanizmu rada.
- Naponsko napajani pretvarač (VSC) koristi impulsno – širinsku modulaciju (PWM) pri regulaciji mrežne struje, pri čemu se javlja i potreba za malim filterima, kako bi se otklonila određena izobličenja.
- Neophodni delovi filtera su i Hall senzori struje i napona za obezbeđivanje povratnih (merenih) signala za strujne i naponske regulatore.
- DSP (Digital Signal Processor) je potreban za implementaciju upravljačkog algoritma koji generiše impulse za paljenje prekidačkih komponenti VSC – a.
- Osim navedenih delova, SAPF sadrži i mnoge pasivne elemente poput DC kondenzatora, prigušnica, kao i male pasivne filtere.



# Aktivni paralelni filteri [6]

- Izbor načina upravljanja aktivnim paralelnim filterom ima značajan uticaj na nivo distorzije napona i struje preostalog sistema usled viših harmonika. Postoji više različitih tehnika upravljanja u zavisnosti od primene aktivnog filtera.

- Mnogi algoritmi upravljanja za izračunavanje referentne struje filtera mogu se naći u literaturi [4]. Algoritmi upravljanja koji će biti predstavljeni ovde su bazirani na:

1. teoriji trenutne reaktivne snage (IRPT), takođe poznata kao PQ teorija ili  $\alpha\beta$  teorija
2. teoriji vezanoj za primenu sinhronog referentnog sistema (SRF), poznata i kao dq teorija [2].

- Prvi i najrasprostranjeniji način upravljanja bazira se na  $p$ - $q$  teoriji.

- Transformacijom trofaznih napona  $U_{sa}$ ,  $U_{sb}$  i  $U_{sc}$  i trofaznih struja  $i_{La}$ ,  $i_{Lb}$  i  $i_{Lc}$  u stacionarni  $\alpha$ - $\beta$  referentni sistem, realni deo trenutne vrednosti snage  $p_L$  i imaginarni deo trenutne vrednosti snage  $q_L$  opterećenja, mogu se izračunati kao:

$$\begin{bmatrix} p_L \\ q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}.$$

- Vrednosti trenutnih snaga  $p_L$  i  $q_L$  se mogu predstaviti kao zbir tri komponente:

$$p_L = p_{L,dc} + p_{L,lf} + p_{L,hf}$$

$$q_L = q_{L,dc} + q_{L,lf} + q_{L,hf}$$

- Gde je:
- |                           |                                |
|---------------------------|--------------------------------|
| $p_{L,dc}$ , $q_{L,dc}$ : | - jednosmerna komponenta       |
| $p_{L,lf}$ , $q_{L,lf}$ : | - nisko-frekventna komponenta  |
| $p_{L,hf}$ , $q_{L,hf}$ : | - visoko-frekventna komponenta |

- Referentne vrednosti za struje  $i_{ca, ref}$ ,  $i_{cb, ref}$ ,  $i_{cc, ref}$  se sada mogu odrediti na osnovu sledećih izraza:

$$\begin{bmatrix} i_{ca, ref} \\ i_{cb, ref} \\ i_{cc, ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_{ref} \\ q_{ref} \end{bmatrix}$$

- Referentne vrednosti za realni i imaginarni deo trenutne vrednosti snage  $p_{ref}$  i  $q_{ref}$  zavise od toga koji se harmonici moraju kompenzovati ovim aktivnim filterom.

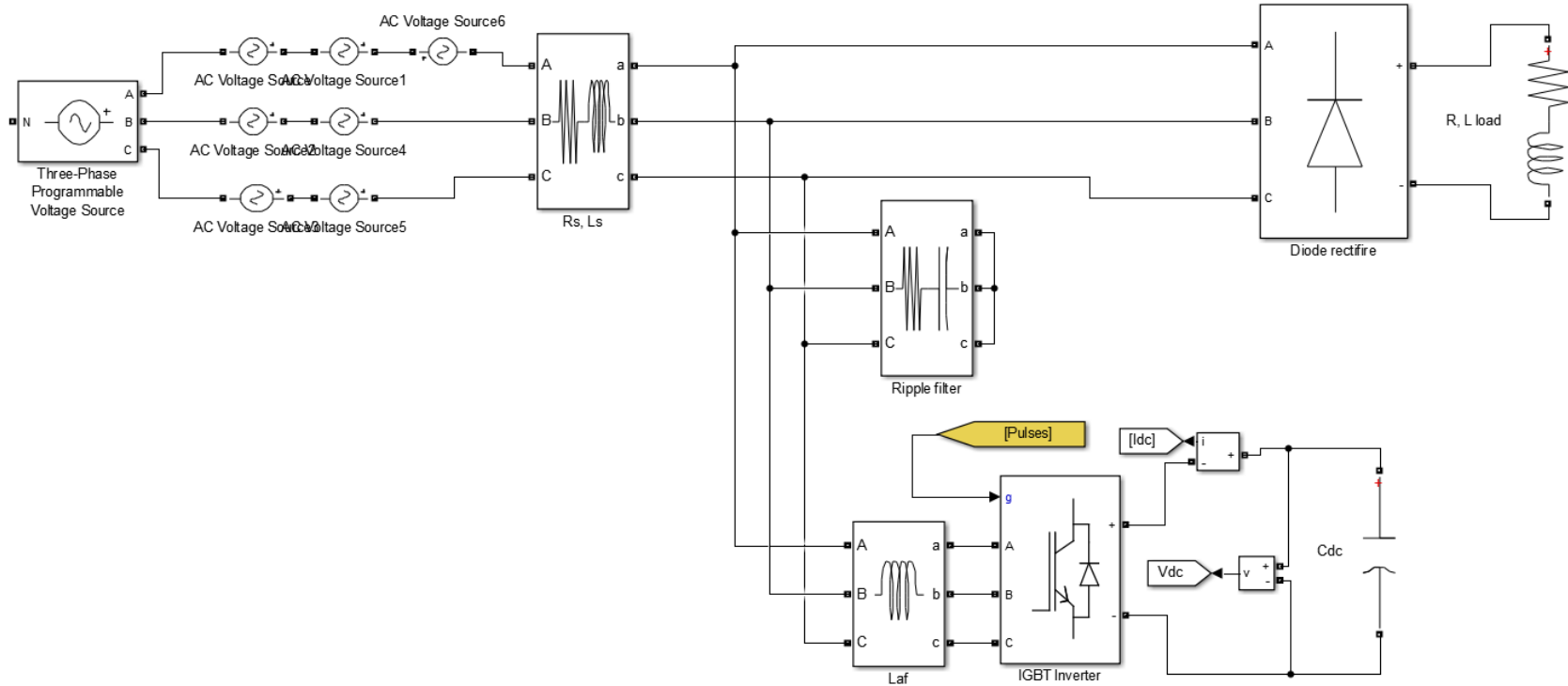
- **Ovaj način upravljanja zavisi od brzine odziva strujnog regulatora. Problem se prevazilazi korišćenjem velike učestanosti prekidanja i semplovanja (20-40kHz), što dovodi do širokog opsega regulacije strujnog regulatora, ali i do povećanja gubitaka usled prekidanja.**

- Ako se viši harmonici struje smatraju poznatim (što je dovoljno tačno u slučaju regulisanih pogona (VSD)), **moguće je prevazići ove probleme upotrebom selektivnog upravljanja u pogledu viših harmonika.** Postoje dve osnovne metode:

1. FFT – određuju se harmonici struje u prethodnoj periodi semplovanja upotrebom Furijeove transformacije i injektuju se sa suprotnim faznim uglom.
2. Transformatorska – u ovom pristupu viši harmonici struja se transformišu u pojedinačnim referentnim sistemima u kojima dati harmonici postaju jednosmerne veličine. Jednosmernim veličinama se lako upravlja pomoću PI regulatora.

Obe ove metode su se pokazale boljim rešenjem od  $p$ - $q$  načina upravljanja jer rade na učestanosti od 6kHz.

# Simulacija paralelnog aktivnog filtera Shunt Active Power Filter (SAPF) [4]



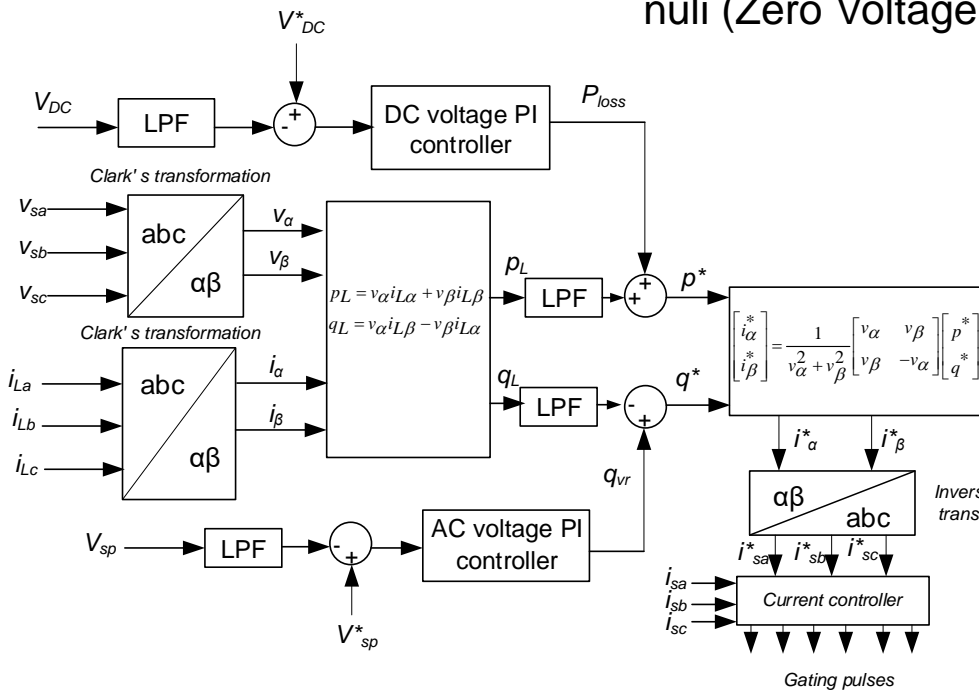
Simulacioni model SAPF-a u Simulink-u

- *Paralelni aktivni filter je strujno kontrolisani naponski inverter sa IGBT -ovima*
- *Koristi se za ublažavanje harmonika, redukciju strujne neravnoteže i kompenzaciju reaktivne snage*

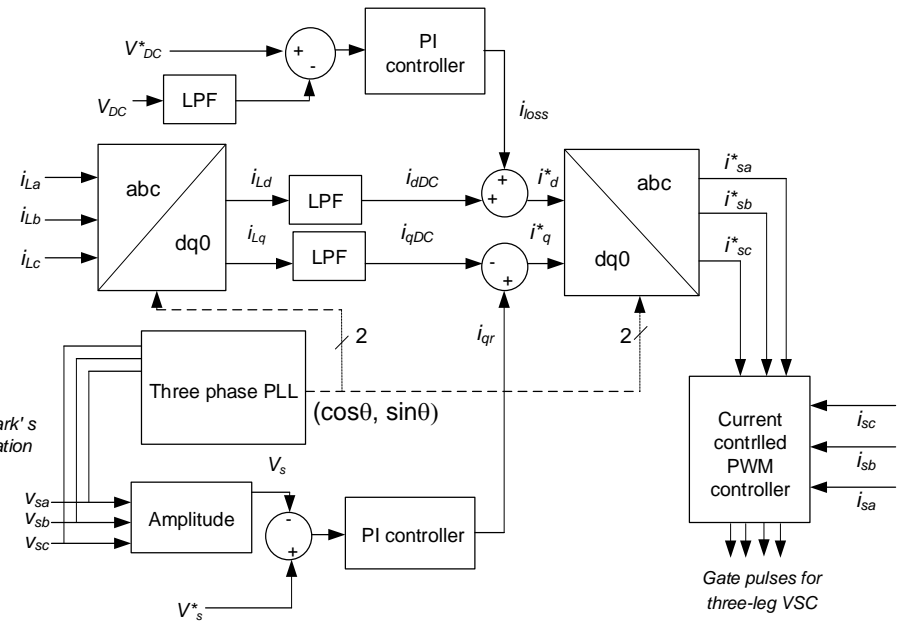
# Upravljački algoritmi [2,4]:

Upravljanje sa jediničnim faktorom snage  $i_d^* = i_{dDC} + i_{loss}$   
(Unity power control):

Upravljanje sa održavanjem pada napona na nuli (Zero Voltage Regulation):  
 $i_q^* = i_{qr} - i_{qDc}$

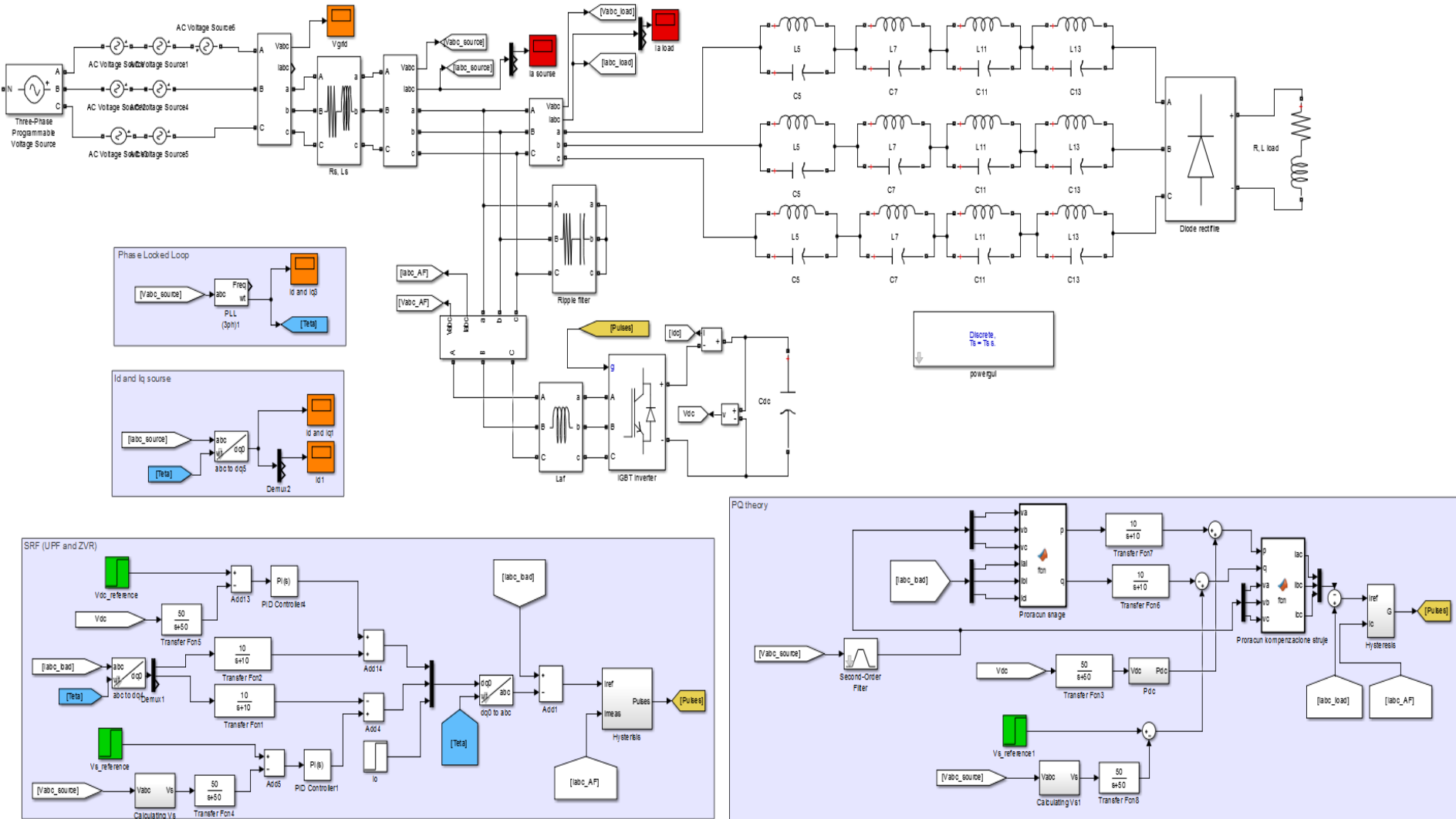


Block dijagram za IRPT (PQ) upravljački algoritam



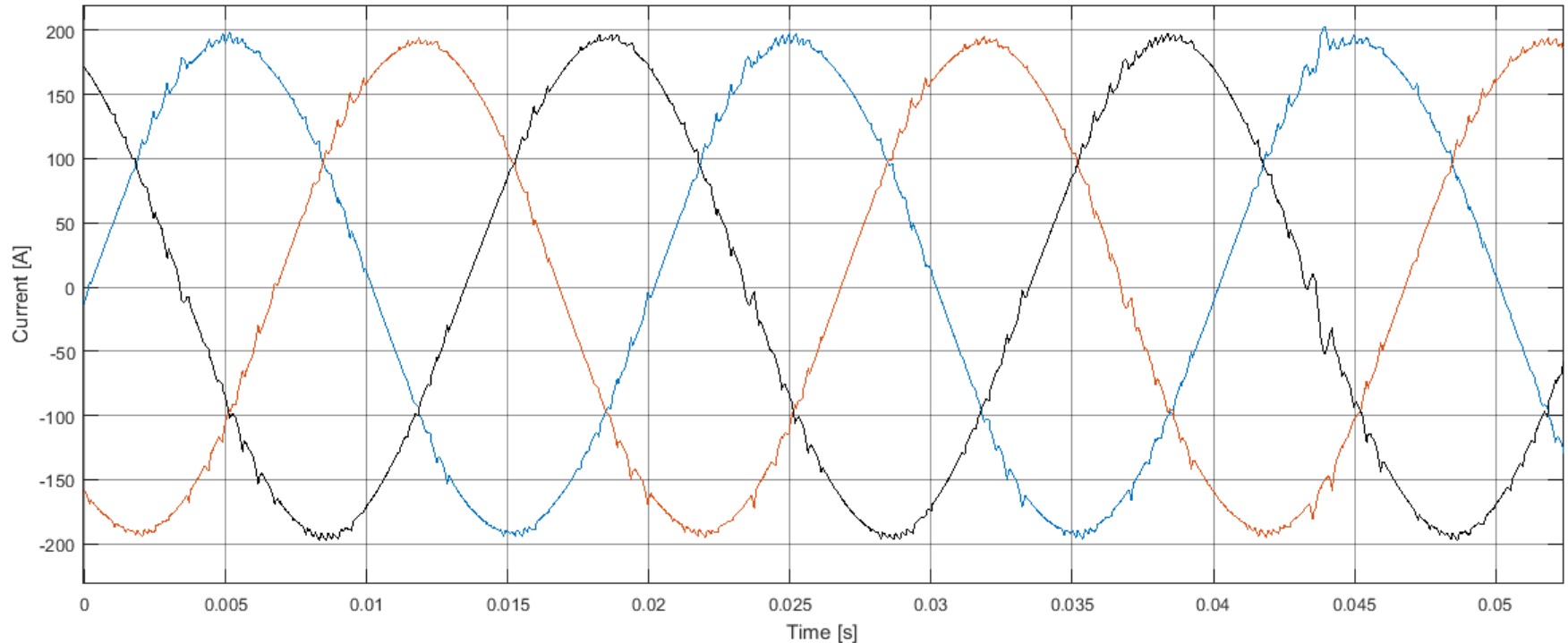
Block dijagram za SRF upravljački algoritam

# Matlab simulacioni model hibridnog filtera (SAPF + Redni PPF) [4]



Simulink model hibridnog filtera

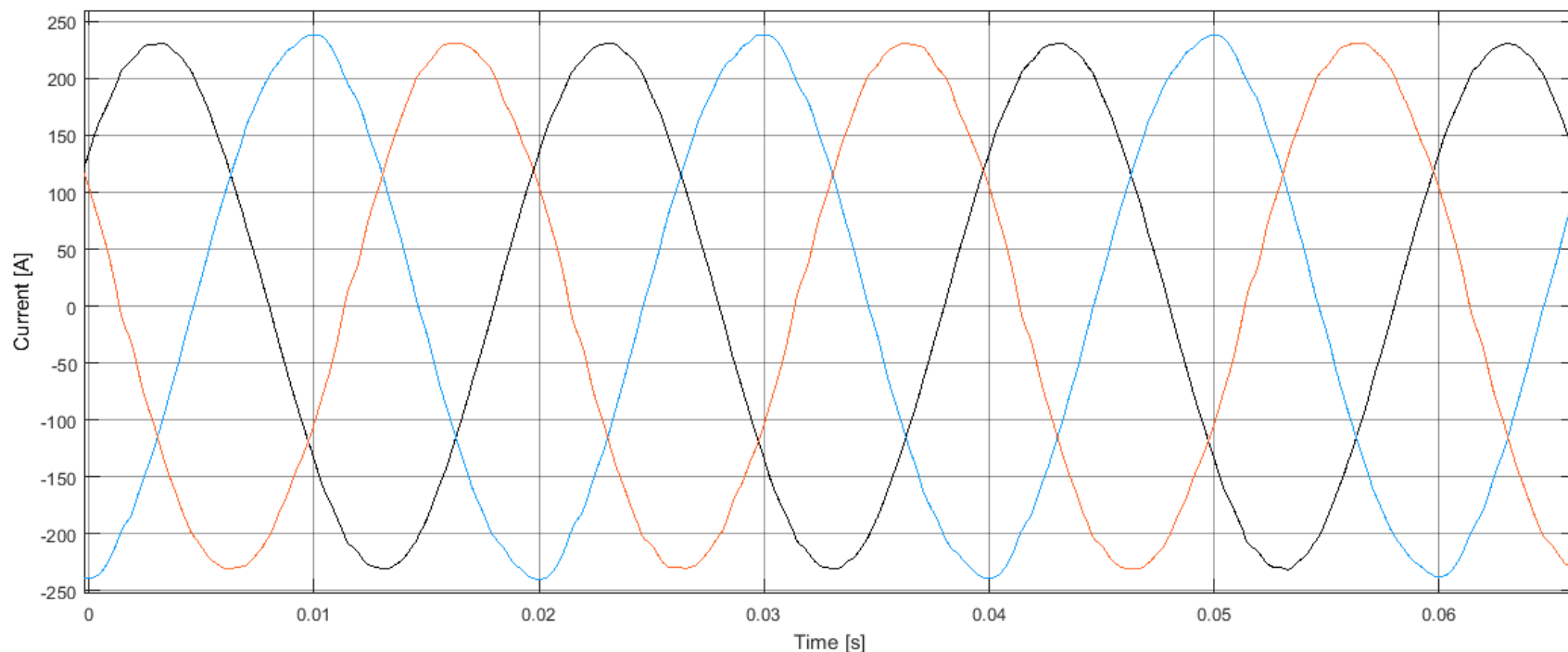
# Rezultati simulacija [4]:



**Mrežna struja u slučaju da se primenjuje hibridni filter koji se sastoji is rednog pasivnog filtera i paralelnog aktivnog filtera sa IRPT (PQ) upravljanjem**

**THDi = 1.99%**

# Rezultati simulacija [4]:



**Mrežna struja u slučaju da se primenjuje hibridni filter koji se sastoji is rednog pasivnog filtera i paralelnog aktivnog filtera sa SRF (dq) upravljanjem pri izobličenom mrežnom naponu i nesimetriji (napon u fazi a je 20% manji nego u ostalim fazama)**

**THDi in phase A = 0.8% , THDi in phase B = 1.55% ,  
THDi in phase C = 1.92%**

# Zaključak [4] :

	1. slučaj (sinusni napon napajanja)	2. slučaj (izobličen i nesimetričan napon napajanja)
<b>Redni pasivni filter</b>	THDi= 1.89% Fundamental=183.3A	THDi Phase A= 9.71% Fundamental=158.4A THDi Phase B= 6.20% Fundamental=182.8A THDi Phase C= 4.73% Fundamental=173.7A
<b>Paralelni pasivni filter</b>	THDi= 3.05% Fundamental=230.1A	THDi Phase A= 14.11% Fundamental=207.2A THDi Phase B= 7.56% Fundamental=222.4A THDi Phase C= 6.01% Fundamental=221.1A
<b>Hibridni filter (paralelni aktivni filter sa <i>SRF</i> upravljanjem i redni pasivni filter)</b>	THDi= 0.59% Fundamental=202.5A	THDi Phase A= 0.80% Fundamental=230.6A THDi Phase B= 1.55% Fundamental=235.7A THDi Phase C= 1.92% Fundamental=232.6A

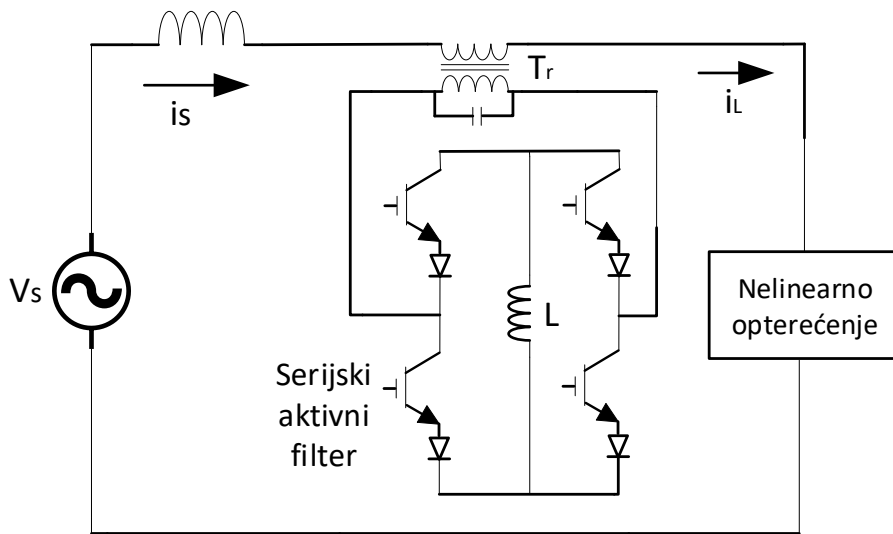
**Rezultati simulacija sa rednim i hibridnim filterima: uporedni prikaz**



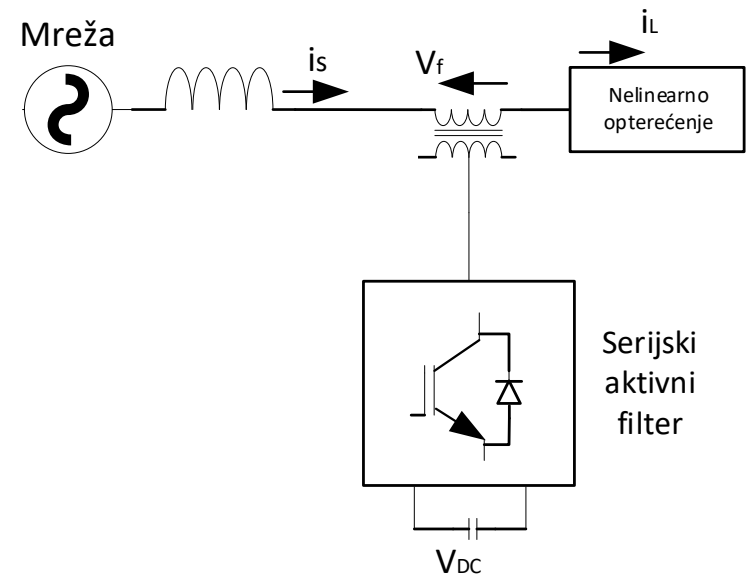
# Redni (serijski) aktivni energetski filteri (APF) [2, 5]

- **Serijski aktivni filteri APF (Series Active Power Filters) štite opterećenja osetljiva na pojavu harmonika, flikera, propada napona, nesimetrije u sistemu. Ovakvi problemi mogu izazvati vrlo često gubitke usled prekida proizvodnje u određenim sistemima.**
- Ovi filteri služe za otklanjanje viših harmonika u naponu napajanja, kako bi napon kojim se opterećenje napaja bio sinusoidalno.
- Podela serijskih APF identična je kao podela paralelnih aktivnih filtera [2].
- Podela se vrši na osnovu:
  1. tipa korišćenog pretvarača: strujni i naponski serijski APF
  2. vrste topologije: polumosni, mosni i H-most serijski APF
  3. sistema napajanja: monofazni dvožični, trofazni trožični i trofazni četvorožični serijski APF
- Serijski filter sa naponskim pretvaračem sadrži sabirnice konstantnog jednosmernog napona. Češće se koristi u odnosu na filter sa strujno napajanim pretvaračem zbog niže cene, manje težine kao i zbog mogućnosti primene u višenivojskim i višestepenim filterima za poboljšanje performansi rada na niskim učestanostima.

# Redni (serijski) aktivni energetske filteri (APF) - podela [2, 5]

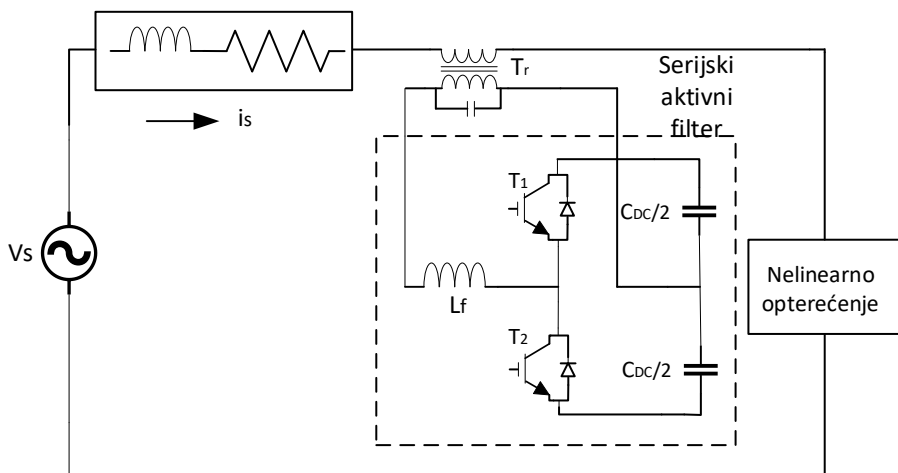


Monofazni serijski APF sa strujno napajanim pretvaračem

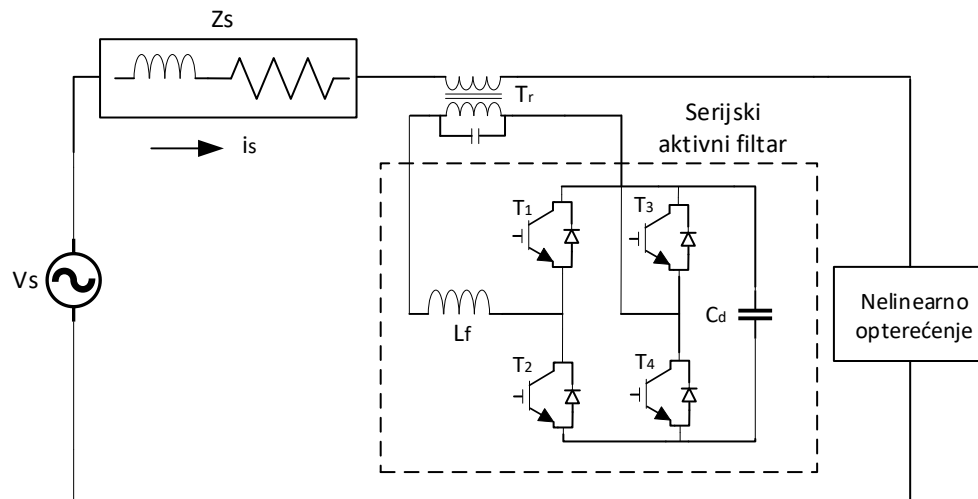


Serijski APF sa naponski napajanim pretvaračem

# Redni (serijski) aktivni energetski filteri (APF) - podela [2, 5]



Polumosna konfiguracija serijskog APF sa naponski napajanim pretvaračem



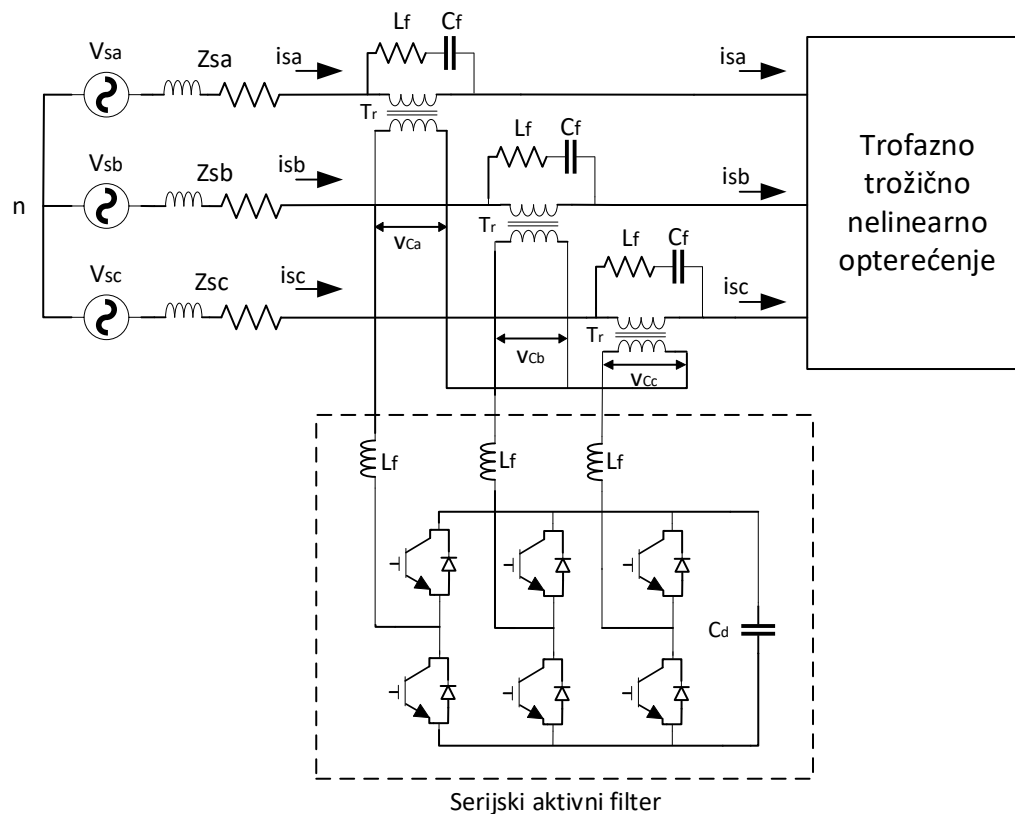
Mosna konfiguracija serijskog APF sa naponski napajanim pretvaračem

-Analogno kao kod paralelnih aktivnih filtera razlikujemo monofazne dvožične, trofazne trožične i trofazne četvorožične konfiguracije, shodno sistemu napajanja ili opterećenja.

- **Filter se vezuje redno sa mrežom, pre opterećenja, koristeći odgovarajući transformator. Ima značajnu ulogu u eliminaciji naponskih harmonika, održavanju ulaznog napona opterećenja, kao i u prigušenju, tj. sprečavanju širenja harmonika, uzrokovanog pojavom rezonanse između redne impedanse i/ili pasivnih filtera.**

# Redni (serijski) aktivni energetski filteri (APF) - podela[2, 5]

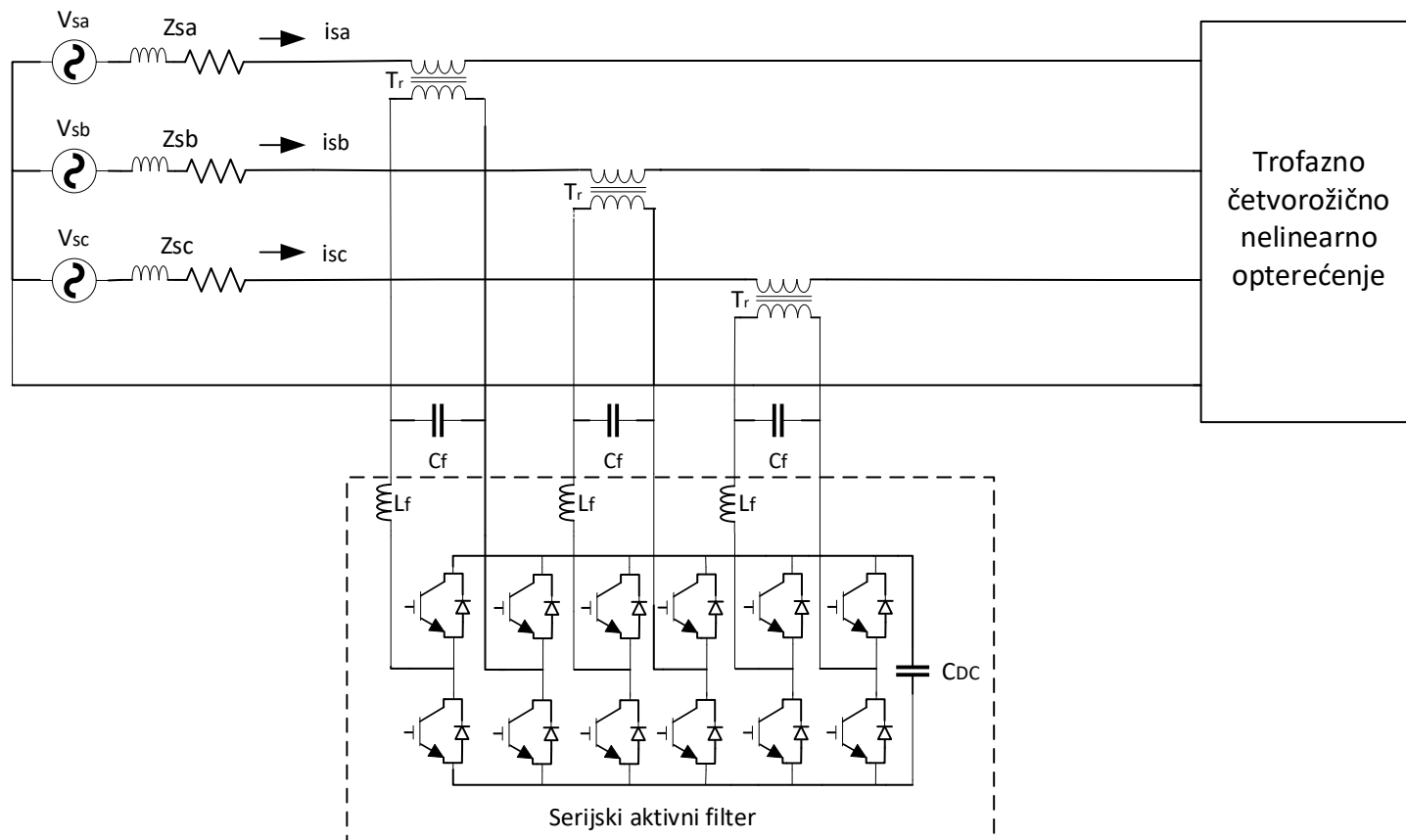
- Trofazna trožična nelinearna opterećenja poput VSD-a predstavljaju jednu od glavnih primena energetskih pretvarača i u poslednje vreme mnogi VSD-ovi primenjuju serijske APF. Takođe se projektuju sa tri jednofazna APF-a sa izolacionim transformatorima za izjednačavanje napona po fazama, nezavisnu kontrolu faza i pouzdanu kompenzaciju nesimetrije.



Trofazni trožični serijskog APF sa naponski napajanim pretvaračem

# Redni (serijski) aktivni energetski filteri (APF) - podela[2, 5]

- Primenu trofaznih četvorožičnih filtera zahtevaju mnogobrojne trofazne mreže iz kojih se napajaju monofazni potrošači, za rešenje problema koje oni izazivaju, a to su: prekomerna struju u nultom provodniku, injekciju strujnih harmonika i posledično naponskih harmonika i nesimetrija. Između ostalog on povećava i pouzdanost sistema.



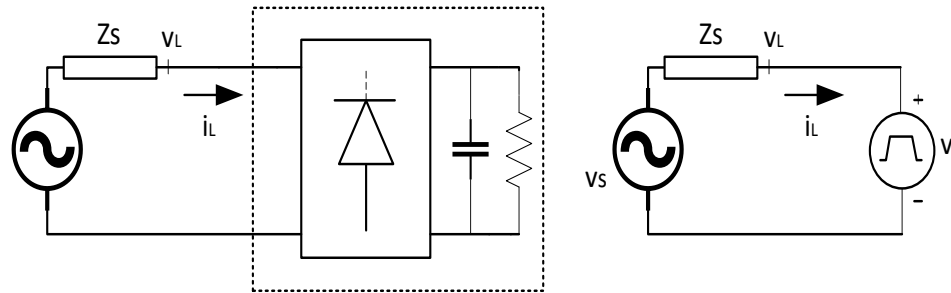
Trofazni četvorožični serijskog APF sa tri monofazna naponska mosna pretvarača

# Osnovna uloga serijskih APF – a [2, 5]

- Osnovna funkcija serijskih APF-a je smanjenje problema sa kvalitetom električne energije koji su uzrokovani naponskim harmonicima u tački zajedničkog priključenja potrošača i obezbeđenje sinusoidalnih napona za napajanje potrošača.
- **Trofazni naponski napajan pretvarač zajedno sa DC kondenzatorom predstavlja serijski aktivni filter. RC filteri vezani na sekundar monofaznih transformatora služe za uklanjanje viših harmonika iz napona koji filter injektira u sistem. Linearno opterećenje zahteva eliminaciju naponskih harmonika, dok nelinearno opterećenje zahteva eliminaciju harmonika struje.**
- Jedan filter može biti vezan u tački priključenja nelinearnog opterećenja za različite tipove opterećenja i može se koristiti za eliminisanje naponskih harmonika tih opterećenja. Ovakva konfiguracija je osetljiva na pojavu kratkog spoja u nekoj od faza, pa je zbog toga neohodno postojanje odgovarajuće zaštite.
- Kod naponski napajanih nelinearnih opterećenja serijski APF mogu obezbediti sinusoidalne mrežne struje. Međutim, kod strujno napajanih nelinearnih opterećenja, za održavanje sinusoidalnih mrežnih struja neophodno je kombinovati paralelne pasivne sa serijskim aktivnim filterima (hibridna konfiguracija).

# Algoritmi upravljanja serijskim APF [2, 5]

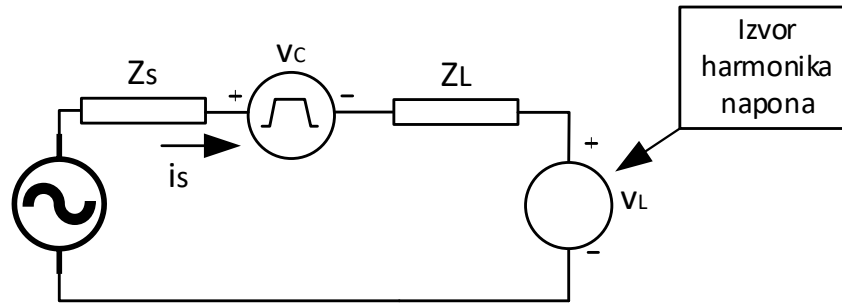
- Algoritmi upravljanja filterom, mogu se primeniti i na hibridnu konfiguraciju. Za eliminaciju naponskih harmonika i disbalansa, kao i za održavanje nulte vrednosti pada napona između mreže i mesta na kome se priključuje opterećenje (ZVR – Zero Voltage Regulation) kod naponski osetljivih opterećenja, koristi se direktno upravljanje filterom za injektiranje dovoljnog napona redno sa opterećenjem, tako da zbir napona mreže i injektiranog napona bude sinusoidalan napon sa željenom amplitudom.



- Na levoj strani gornje slike prikazana je jednopolna šema naponski napajanog opterećenja dok se na desnoj strani nalazi ekvivalentna šema. Pri tom je sa  $V_L$  označen naponski izvor osnovnog i viših harmonika napona opterećenja,  $Z_s$  impedansa izvora, a sa  $I_L$  je označena struja diodnog ispravljača (opterećenja).

# Algoritmi upravljanja serijskim APF [2, 5]

- Na donjoj slici ilustrovana je primena serijskog aktivnog filtera za naponski napajano nelinearno opterećenje. Filterom se upravlja tako da se on ponaša kao strujno kontrolisani naponski izvor  $V_C$ . To znači da je on mala impedansa za osnovnu učestanost, dok za više strujne harmonike predstavlja veliku otpornost. Na taj način sprečava se tok strujnih harmonika ka mreži.

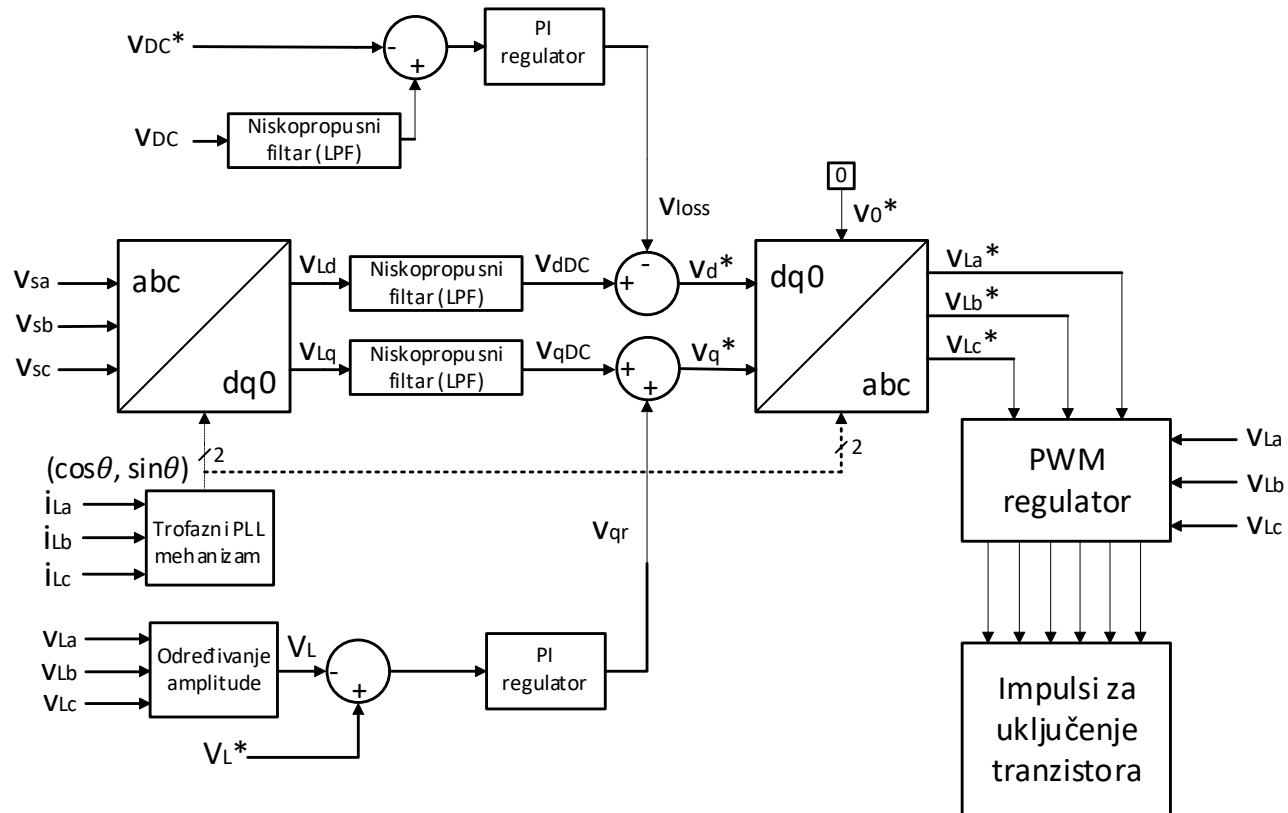


- Glavni cilj algoritama za upravljanje filterima jeste estimacija referentnih vrednosti struja ili napona korišćenjem merenih signala. Za dobijanje PWM impulsa za uključenje prekidačkih komponenata koriste se referentni i mereni signali, tj. njihova razlika (signal greške). Postoji veliki broj algoritama, kako u vremenskom, tako i u frekvencijskom domenu. U nastavku će biti prikazani i objašnjeni oni najčešće korišćeni u vremenskom domenu



# Algoritam upravljanja serijskim APF za eliminaciju naponskih harmonika (I) [2, 5]

- Za sintezu ovog algoritma se koristi teorija sinhrono rotirajućeg koordinatnog sistema (SRF teorija). Principijelna šema data je na donjoj slici:



Principijelni blok dijagrama za upravljanje serijskim APF za eliminaciju naponskih harmonika

# Algoritam upravljanja serijskim APF za eliminaciju naponskih harmonika [2, 5]

- Naponi mreže su uz pomoć Parkove transformacije prebačeni u dq – sistem. Osnovne i više harmonijske komponente razdvojio je niskopropusni filter LPF, tako da će biti:

$$v_{sd} = v_{dDC} + v_{dAC}$$

$$v_{sq} = v_{qDC} + v_{qAC}$$

- Cilj ovog algoritma jeste da napon na mestu priključenja opterećenja bude neizobličen i željene amplitude. PI regulator DC napona serijskog APF-a se koristi za održavanje ovog napona na konstantnoj vrednosti, a na njegovom izlazu je signal  $V_{loss}$ , koji označava napon za pokrivanje gubitaka. Referentna vrednost napona opterećenja po d – osi data je izrazom:

$$v_d^* = v_{dDC} - v_{loss}$$

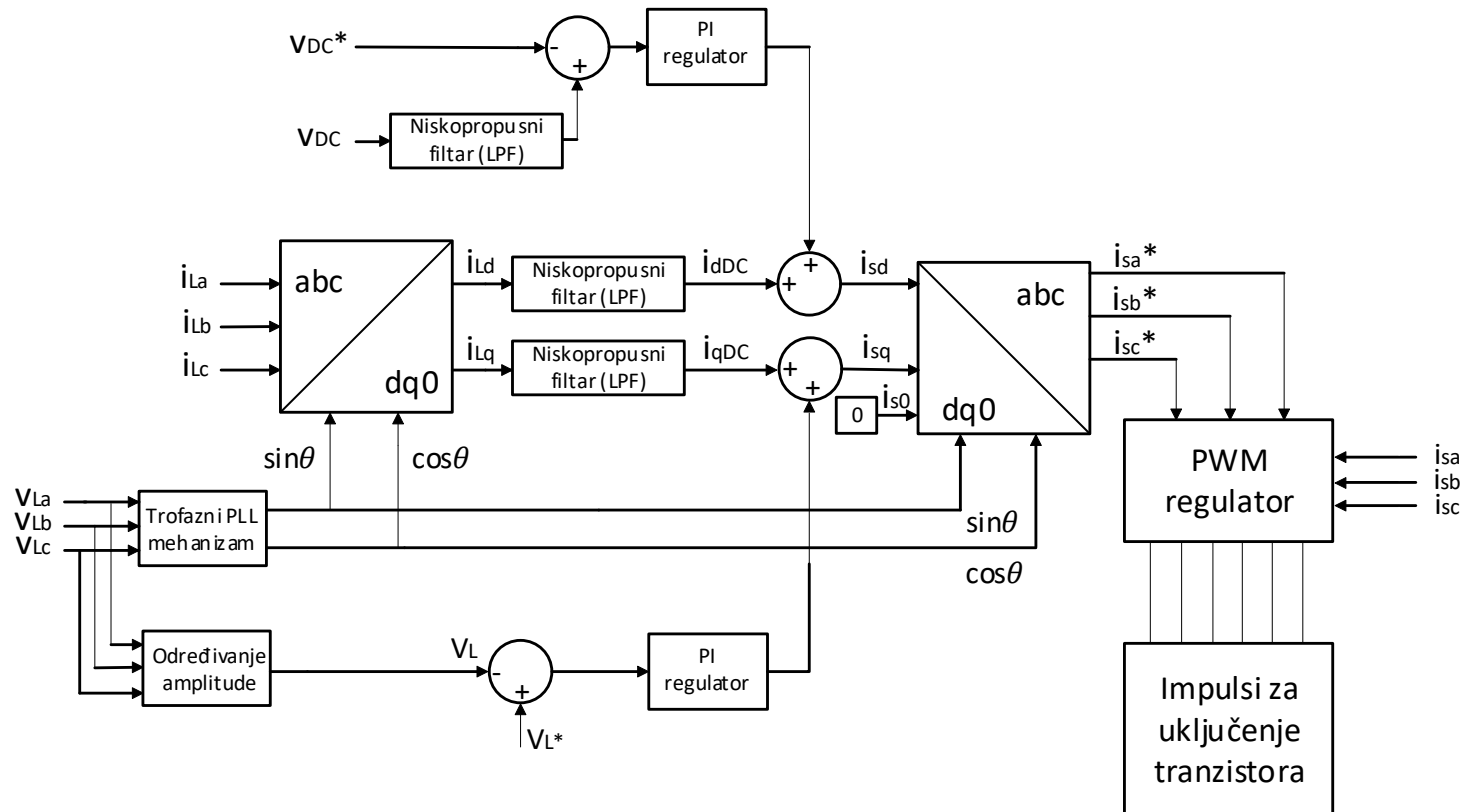
- Drugi PI regulator koristi se za održavanje referentne vrednosti napona opterećenja  $V_L^*$ . Kao izlazni signal ovog regulatora dobija se  $V_{qr}$  – reaktivna komponenta napona. Tada će referentna vrednost napona po q – osi biti:

$$v_q^* = v_{qDC} + v_{qr}$$

- Referentne vrednosti napona opterećenja dobijaju se korišćenjem inverzne Parkove transformacije. Za generisanje PWM impulsa za uključenje tranzistora koristi se signal greške, jednak razlici referentne ( $V_{La}^*, V_{Lb}^*, V_{Lc}^*$ ) i merene vrednosti ( $V_{La}, V_{Lb}, V_{Lc}$ ).

# Algoritam upravljanja serijskim APF za eliminaciju strujnih harmonika (II) [2, 5]

- Suština ovog algoritma jeste estimacija referentnih vrednosti mrežnih struja, a njegov blok dijagram prikazan je na donjoj slici. Injektiranjem napona redno sa naponom na mestu priključenja opterećenja, blokiraju se strujni harmonici. Osim toga algoritam obezbeđuje i održavanje konstantnog ulaznog napona invertora.



Principijelni blok dijagrama za upravljanje serijskim APF za eliminaciju strujnih harmonika

# Algoritam upravljanja serijskim APF za eliminaciju strujnih harmonika [2, 5]

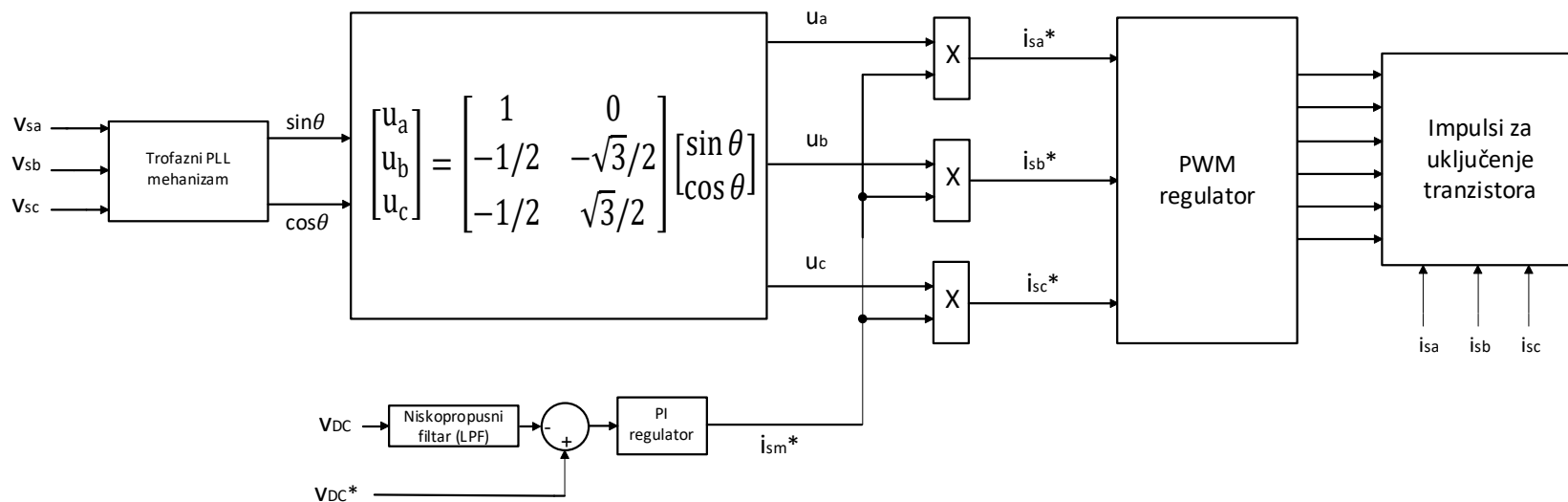
- I u ovom algoritmu se koristi sinhrono rotirajući koordinatni sistem, s tim što se za razliku od prethodnog estimiraju d i q komponente mrežne struje, korišćenjem Parkove transformacije. PLL algoritam se ponovo koristi za sinhronizaciju struja i napona opterećenja na mestu priključenja (PCC).
- Dobijene d i q komponente potom prolaze kroz niskopropusne filtre, za odvajanje osnovnog harmonika od ostalih. Jedan PI regulator kao ulazni signal ima razliku referentne i merene vrednosti jednosmernog napona, a kao izlaz daje komponentu struje koja pokriva gubitke i dodaje se osnovnoj komponenti struje po d osi. Drugi PI regulator se koristi za regulaciju amplitude napona nelinearnog potrošača, date sa:

$$V_L = \sqrt{\frac{2}{3}(v_{La}^2 + v_{Lb}^2 + v_{Lc}^2)}$$

- Izlazna veličina ovog regulatora dodaje se osnovnoj komponenti struje opterećenja po q – osi. Do željenih referentnih vrednosti struja mreže dolazimo korišćenjem inverzne Parkove transformacije.

# Algoritam upravljanja serijskim APF zasnovan na generisanju jediničnih vektora za eliminaciju strujnih harmonika (III) [2, 5]

- Blok dijagram algoritma za eliminaciju strujnih harmonika, uz održavanje konstantnog napona jednosmernih sabirnica (ulaznog napona invertora), dat je na donjoj slici.



Principijelni blok dijagrama za upravljanje serijskim APF za eliminaciju strujnih harmonika uz održavanje DC napona

# Algoritam upravljanja serijskim APF zasnovan na generisanju jediničnih vektora za eliminaciju strujnih harmonika (III) [2, 5]

- Filterom se upravlja tako da on injektira napone ( $V_{Ca}$ ,  $V_{Cb}$ ,  $V_{Cc}$ ) koji eliminišu izobličenja prisutna u mrežnoj struji ( $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$ ), obezbeđujući sinusoidalni oblik uz željenu amplitudu. Izobličeni naponi mreže su ulazne veličine PLL mehanizma, koji generiše dva jedinična vektora fazno pomerena za  $90^\circ$  ( $\sin\theta, \cos\theta$ ). Potom se ta dva vektora koriste za računanje fazno pomerenih jediničnih vektora faznih napona na priključcima:

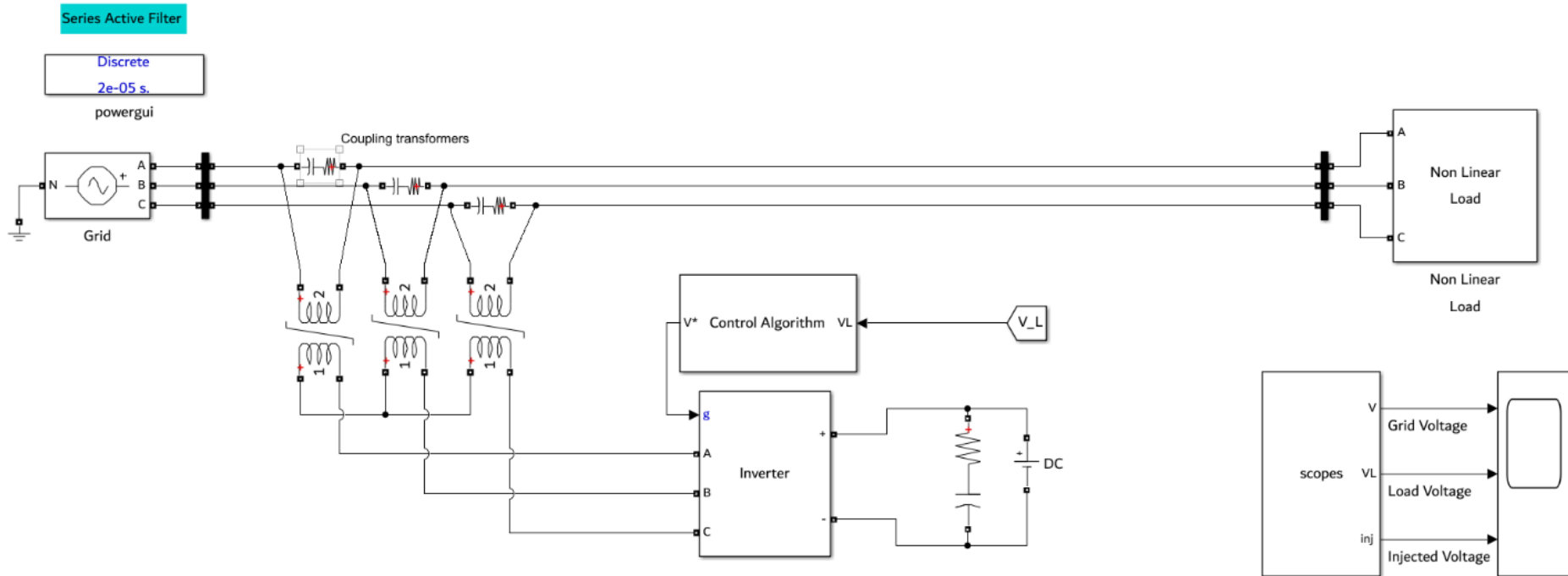
$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix}$$

- PI regulator se koristi za generisanje amplitude referentne vrednosti struja mreže ( $i_{sa}^*$ ,  $i_{sb}^*$ ,  $i_{sc}^*$ ), uz kontrolu napona jednosmernih sabirnica. Dobijena vršna vrednost se množi jediničnim vektorima dobijenih iz gornjeg izraza, kako bi se dobile referentne vrednosti mrežne struje:

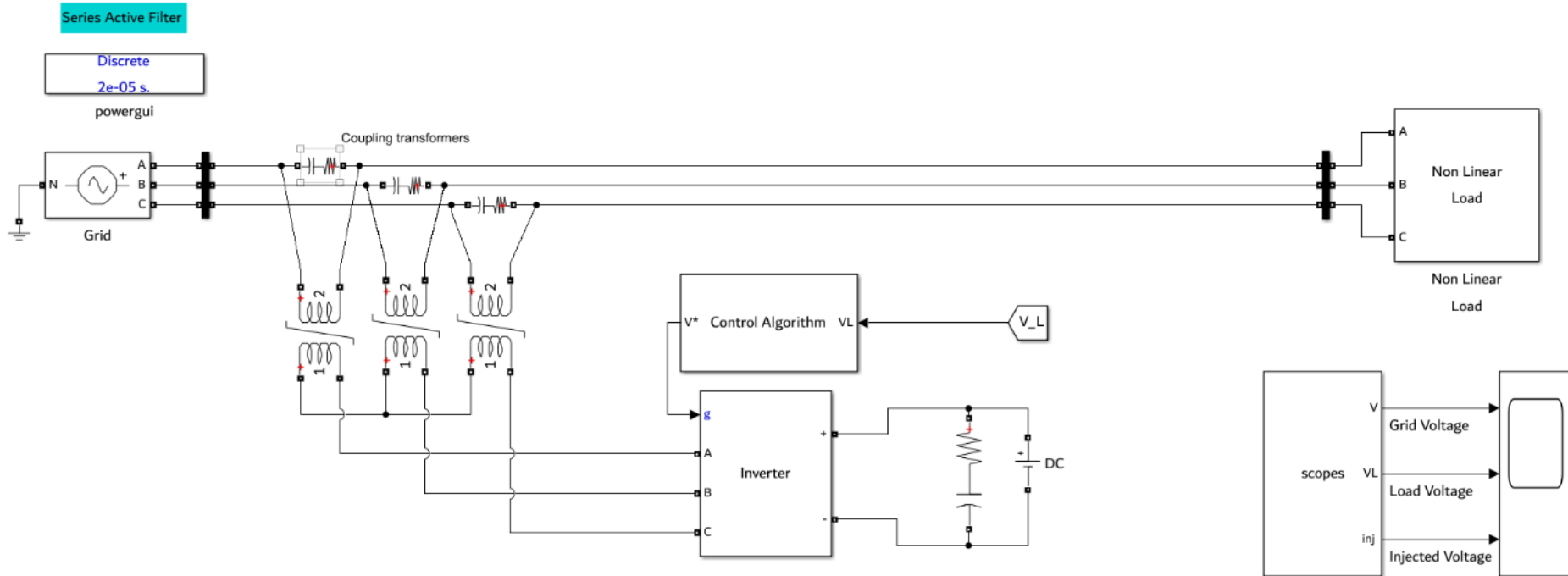
$$\begin{bmatrix} i_{sa}^* \\ i_{sb}^* \\ i_{sc}^* \end{bmatrix} = I_{sm}^* \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}$$

- Strujni PWM regulator služi za generisanje impulsa za uključanje tranzistora, kao i kod prethodnih algoritama. Analogno ovom algoritmu, može se napraviti onaj gde se eliminišu naponski umesto strujnih harmonika, uz održavanje DC napona.

# Primer primene algoritma upravljanja serijskim APF za eliminaciju naponskih harmonika [7]



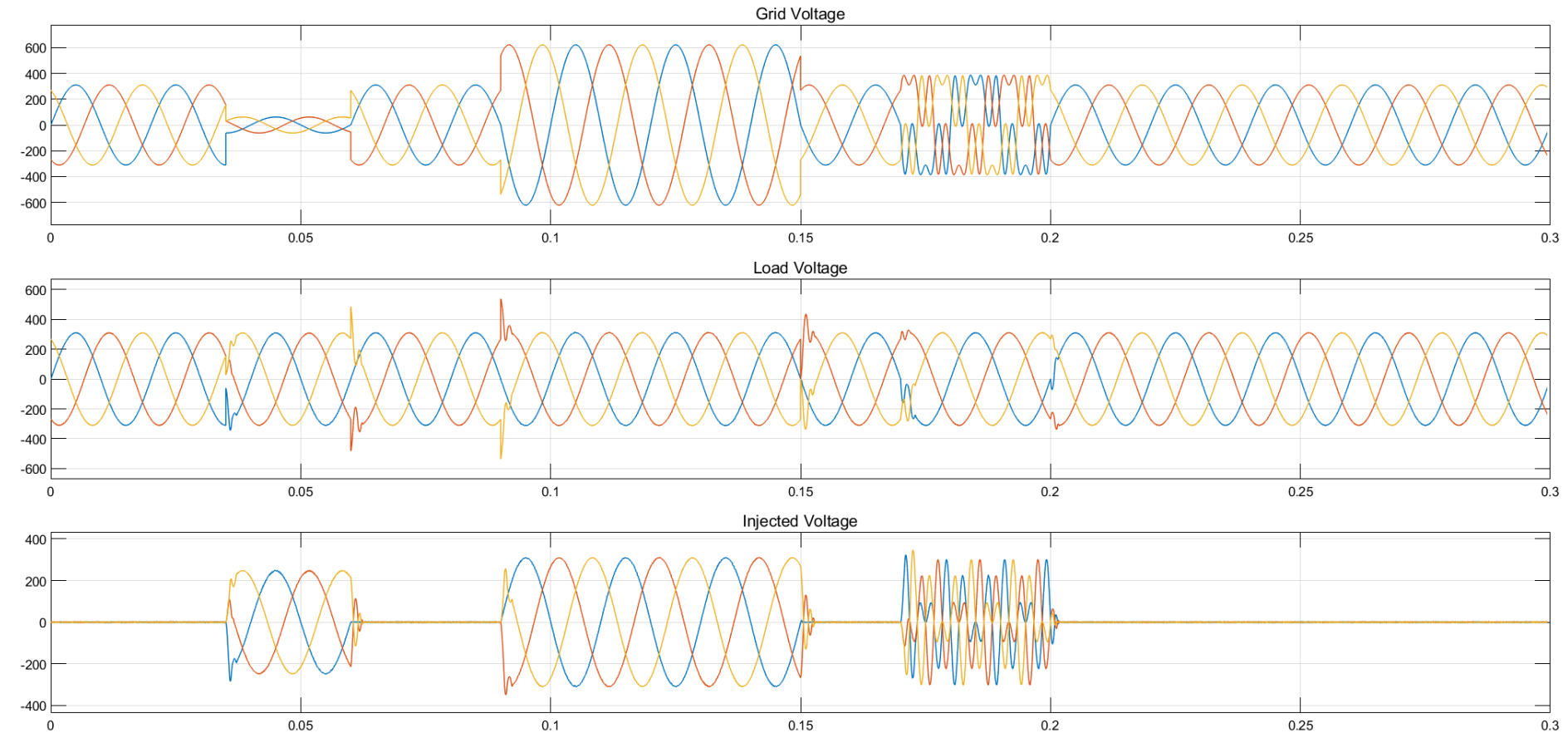
# Primer primene algoritma upravljanja serijskim APF za eliminaciju naponskih harmonika [7]





- Redni aktivni filteri se koriste i za stabilizaciju napona. Rezultati simulacije za sledeći ogled su prikazani na slici ispod:

- Mrežni napon ima nominalnu amplitudu i učestanost
- Mrežni napon ima propad amplitude od 70% nominalne vrednosti
- Mrežni napon ima nominalnu amplitudu i učestanost
- Mrežni napon ima porast amplitude od 50% nominalne vrednosti
- Mrežni napon ima peti i sedmi harmonik, relativne amplitude od 50% osnovnog harmonika
- Mrežni napon ima nominalnu amplitudu i učestanost



# Aktivni ispravljač [8]

- Glavni cilj: upoznavanje sa primenom aktivnog ispravljača u industrijskim elektromotornim pogonima sa ciljem povećanja energetske efikasnosti:

1.Rekuperacija energije kočenja u pogonima sa vertikalnim transportom tereta, kao i u toku smanjenja brzine u pogonima velikih inercija predstavljaju odlučujuće faktore za upotrebu aktivnih ispravljača.

2.Pogoni sa aktivnim ispravljačem rade sa približno prostoperiodičnom ulaznom strujom u motornom i u generatorskom režimu rada. Faktor snage prema mreži je približno jednak jedinici.

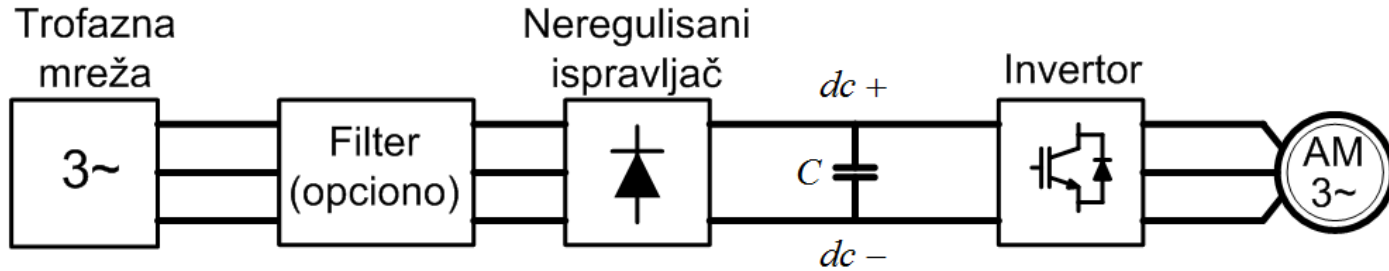
3.Po potrebi se može podesiti i drugačiji faktor snage kako bi se dinamički kompenzovala reaktivna snaga ostalih potrošača priključenih na iste sabirnice (PCC) kao i pogon sa aktivnim ispravljačem. Ovo je moguće samo ako postoji adekvatna rezerva u snazi pretvarača.

4. Mogućnost kompenzacije kratkotrajnih propada ili nesimetrije mrežnog napona

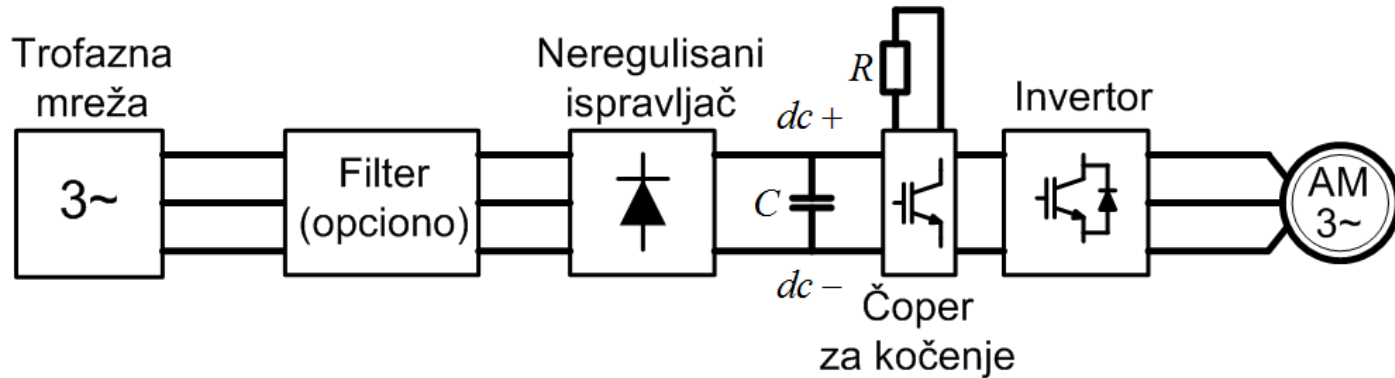
- Zbog standarda kojima se propisuju ograničene vrednosti viših harmonika za struje i napone i sve veće pažnje koja se tome posvećuje, aktivni ispravljači mogu zameniti diodne i u svim ostalim aplikacijama.

# Topologija frekventnog pretvarača u regulisanom elektromotornom pogonu sa asinhronim motorom [8]

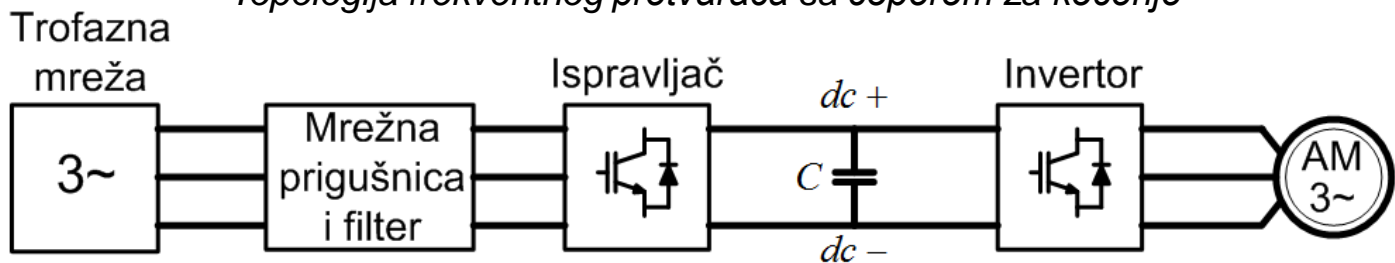
## Energetski deo



*Topologija frekventnog pretvarača sa nereguliranim ispravljačem*

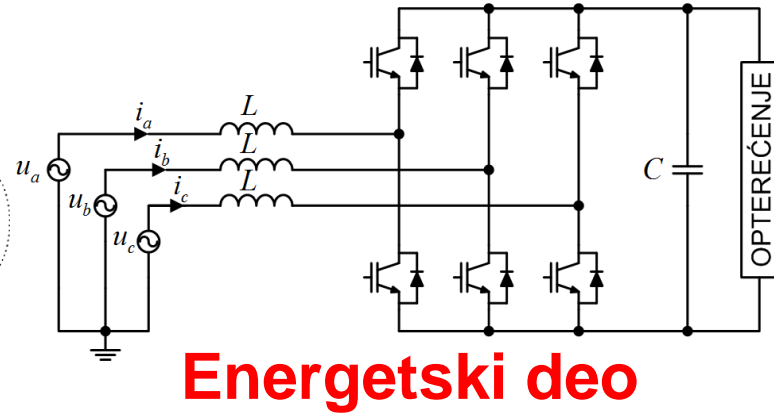
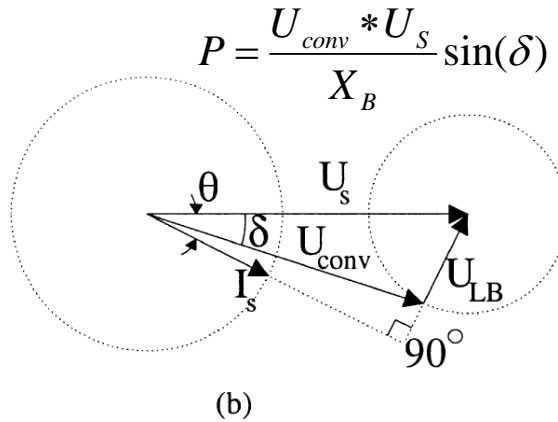
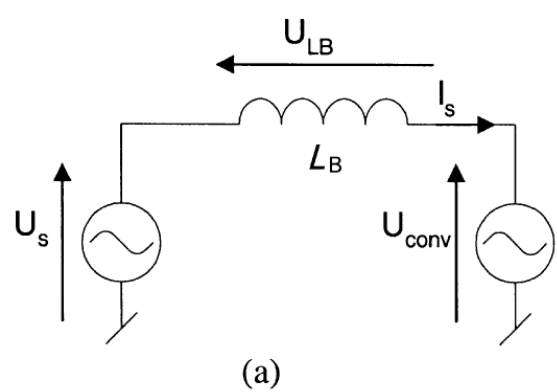


*Topologija frekventnog pretvarača sa čoperom za kočenje*



*Topologija frekventnog pretvarača sa aktivnim ispravljačem za regulisani elektromotorni pogon sa asinhronim motorom*

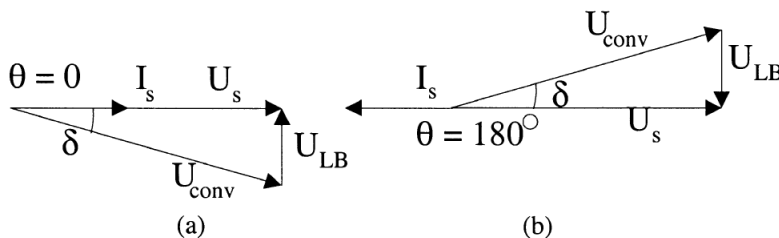
# Aktivni ispravljač: princip rada [6]



$$U_{conv} = \sqrt{U_s^2 + (X_B * I_s)^2}$$

- a) Jednostavan prikaz dva naponska izvora povezana preko neke induktivnosti  $L_B$
- b) Opšti fazorski dijagrama napona i struja za aktivni ispravljač

- Energetski deo aktivnog ispravljača je u potpunosti isti sa PWM naponskim invertorom. Očigledno je da način upravljanja ima veliki uticaj na generisanje viših harmonika.
- Osnovni način upravljanja se zasniva na upravljanju linijskom strujom koja stvara pad napona  $U_{LB}$  na induktivnosti  $L_B$ , koja povezuje dva naponska izvora (energetski pretvarač i izvor).



Fazorski dijagram za rad sa jediničnim faktorom snage

- a) Ispravljački režim rada
- b) Invertorski režim rada

# Aktivni ispravljač [6]

## Upravljački deo

Strategije upravljanja aktivnim (PWM) ispravljačima :

I - upravljanje zasnovano na naponu (VOC);  
(koje ima sličnosti sa vektorskim upravljanjem  
(FOC))

Upravljanje zasnovano na naponu  
(VOC)

Upravljanje zasnovano na  
virtualnom fluksu(VFOC)

II – direktno upravljanje snagom (DPC);  
(koje ima sličnosti sa  
direktnim upravljanjem momentom(DTC))

Upravljanje zasnovano na  
naponu(DPC)

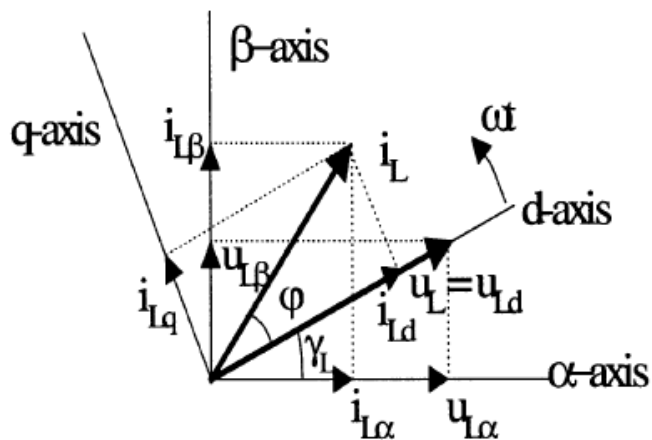
Upravljanje zasnovano na  
virtualnom fluksu (VF-  
DPC)

III - tehnologija sinhro-pretvarača- PWM ispravljač se ponaša kao virtualna sinhrona mašina (VSM) i poseduje dinamiku sinhronne mašine: razvijen za PWM pretvarače, bilo da se oni koriste na mrežnoj strani, ili na strani opterećenja, da bi se omogućila unifikacija integracije u „pametne“ elektro-energetske mreže.

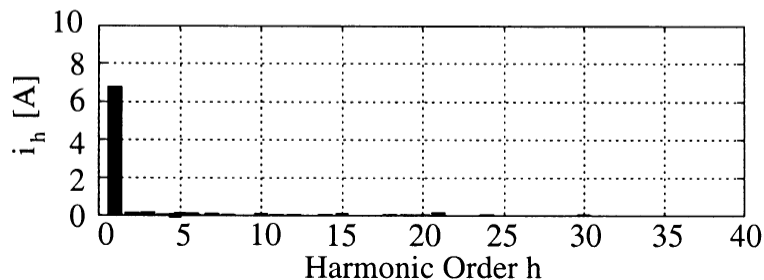
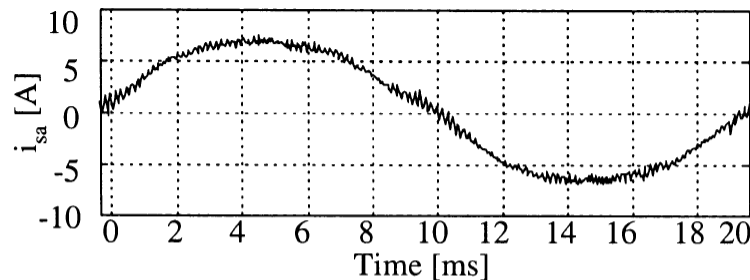
# Načini upravljanja [6]

## *Upravljanje zasnovano na naponu (VOC - voltage oriented control)*

- Najčešće primenjivan način upravljanja je VOC (voltage oriented control) u obrtnom  $dq$  referentnom sistemu, čijom upotrebom veličine (naponi i struje) kojima se upravlja postaju jednosmerne.



Transformacija napona i struja iz  $\alpha\beta$  u  $dq$  referentni sistem

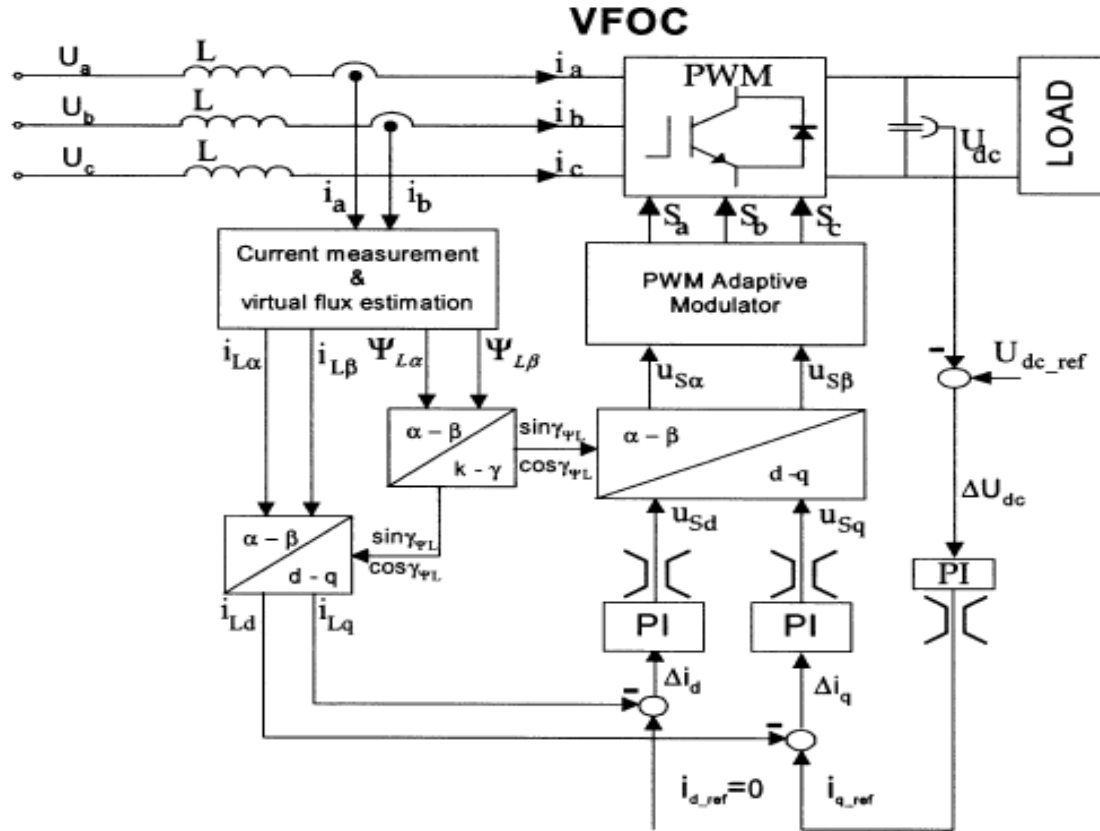


Snimljena linijska struja aktivnog ispravljača u laboratorijskim uslovima, zajedno sa Furijeovim spektrom: THDi=4,1%

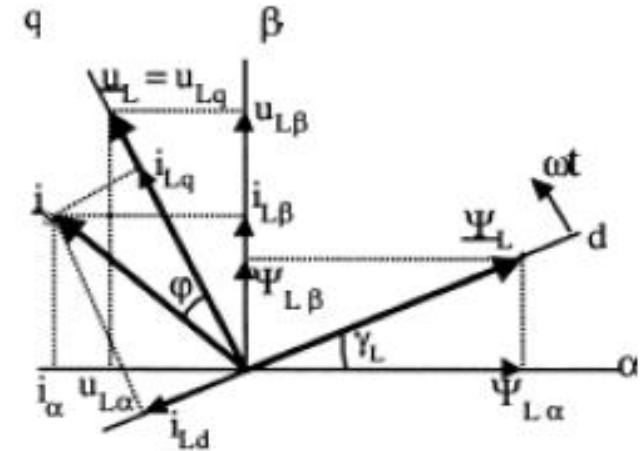
- Postavljanjem  $d$  ose obrtnog referentnog sistema u osu sa fazorom linijskog napona, dobija se jednostavan dinamički model u obrtnom referentnom sistemu. Vrednost za napon u  $q$  osi je po definiciji 0,  $u_q=0$ , pa mora da bude i struja  $i_q=0$ , da bi se imao jedinični faktor snage.

# Upravljanje zasnovano na viruelnom fluksu (VFOC - virtual flux oriented control) [6]

- Predstavlja poboljšanje upravljanja zasnovanog na naponu, zato što je smanjen uticaj poremećaja linijskog napona na transformacije u upravljačkom sistemu



Blok dijagram VFOC upravljačke strukture

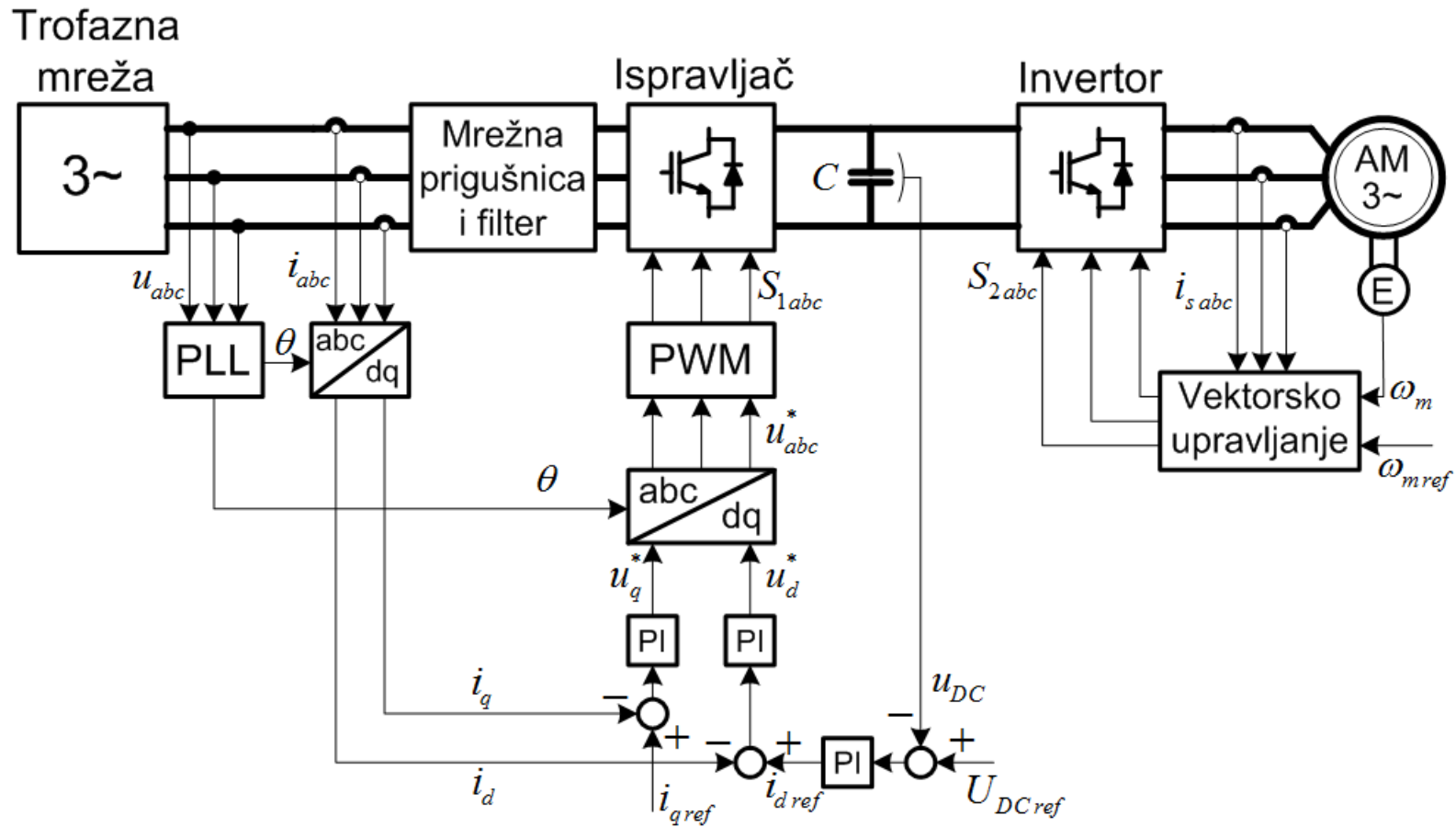


Fazorski dijagram za VFOC

- Ovi problemi kod VOC se mogu rešiti samo pomoću fazno spregnutih petlji (PLL), ali kvalitet odziva regulisanog sistema zavisi od toga koliko su efikasno projektovani PLL-ovi. Zbog toga je lakše ugao vektora linijskog napona zameniti uglom vektora virtuelnog fluksa (VF), zato što je ugao fluksa manje osetljiv od ugla napona na poremećaje linijskog napona, zahvaljujući prirodnom svojstvu integratora u izrazu za virtuelni fluks

# Aktivni ispravljač [8]

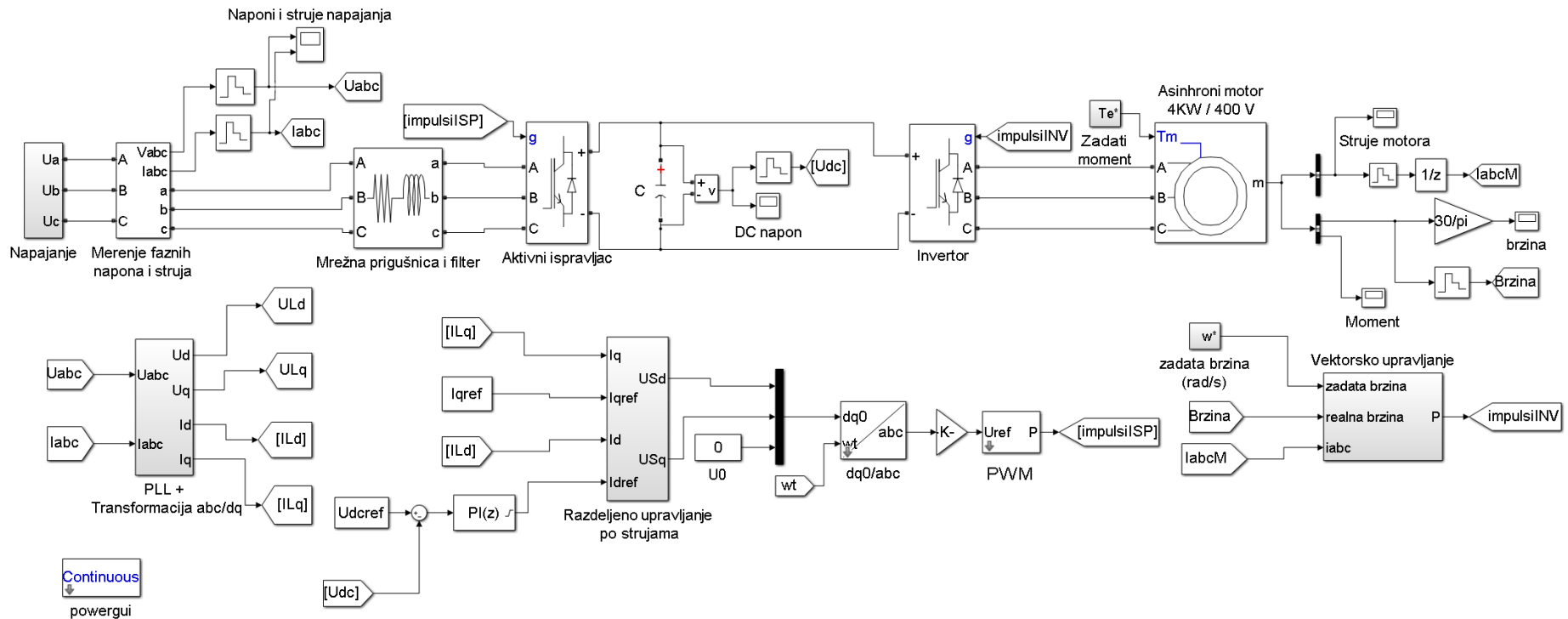
## Upravljački deo



Upravljački blok dijagram elektromotornog pogona sa aktivnim ispravljačem sa VOC upravljanjem

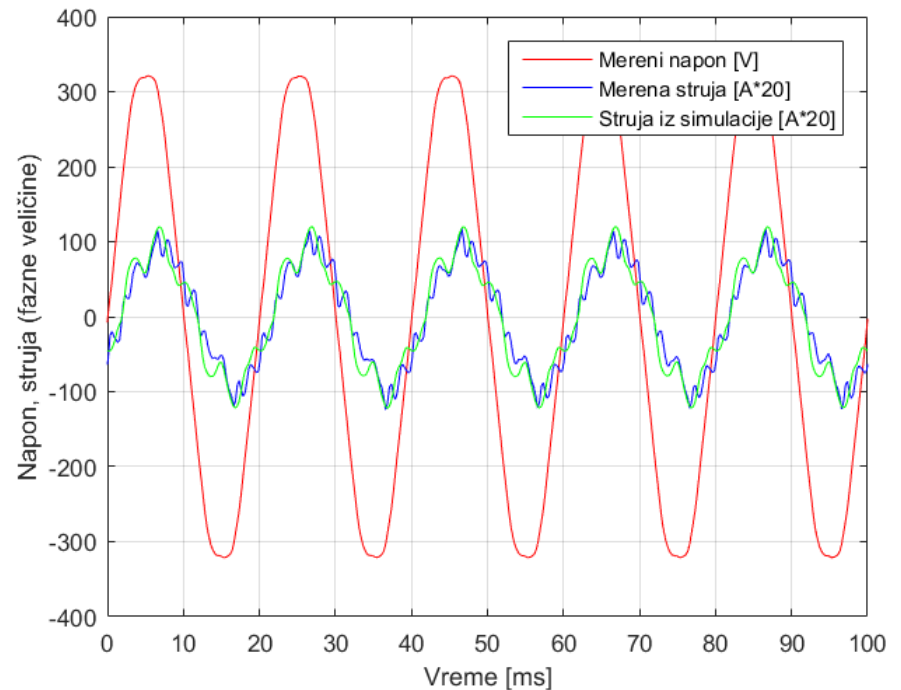
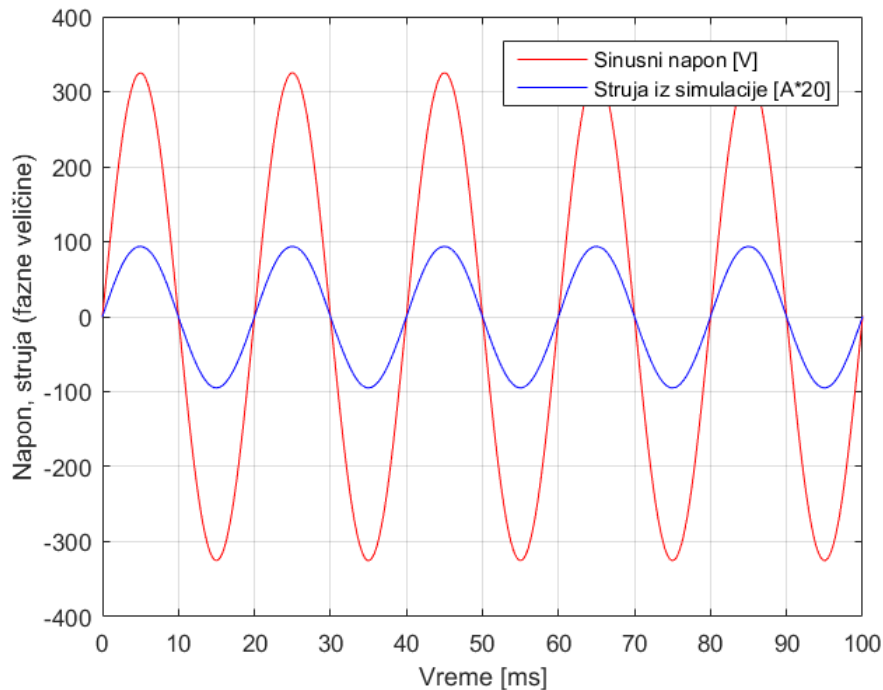


# Aktivni ispravljač [8]



*Blok dijagram simulacionog modela pogona sa aktivnim ispravljačem sa VOC upravljanjem*

# Aktivni ispravljač [8]



*Talasni oblik idealnog mrežnog napona i odgovarajuće mrežne struje dobijene simulacijom na modelu u motornom režimu rada elektromotornog pogona*

*Talasni oblici mrežnog napona i struje dobijeni merenjem u laboratoriji i talasni oblik struje dobijen simulacijom na modelu, u istim uslovima napajanja pogona (vrednost snimljena merenjem u laboratoriji) i u motornom režimu rada elektromotornog pogona*

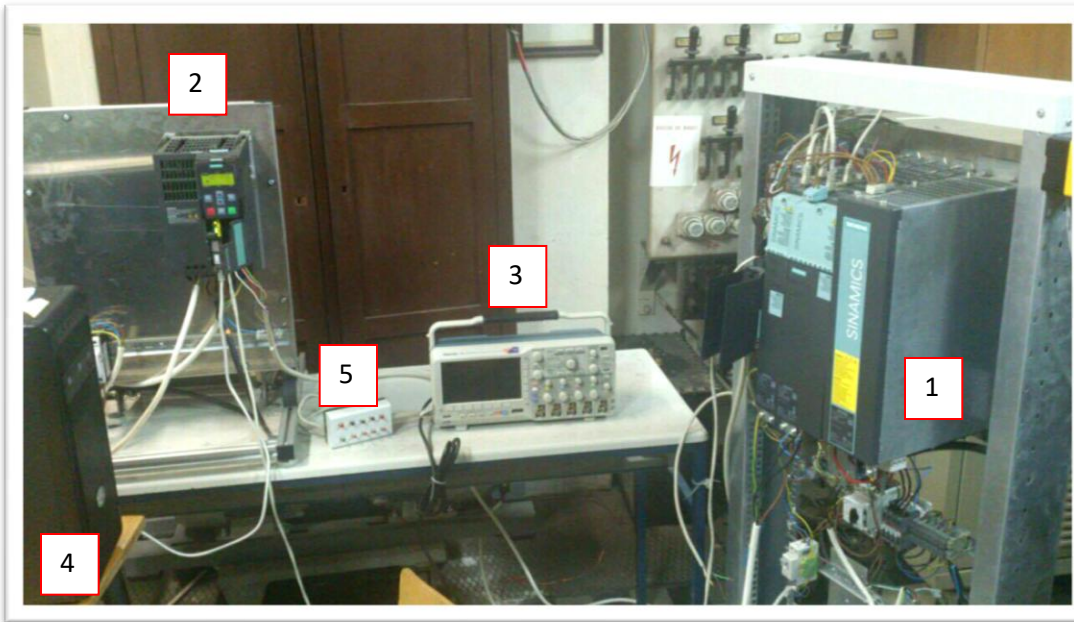
# Aktivni ispravljač [8]

- ✓ Samo u slučaju napajanja idealnim mrežnim naponom, dobiće se idealni talasni oblici mrežne struje, dok će se u ostalim slučajevima javiti odgovarajuća izobličenja u skladu sa izobličenjima mrežnog napona.
- ✓ Na osnovu toga, jasno se može utvrditi u vremenskim dijagramima snimljenim u toku eksperimenta, koja odstupanja od idealnog talasnog oblika su posledica neadekvatno podešenih vrednosti parametara, koja se eventualno mogu popraviti, a šta je posledica napajanja - što se može otkloniti u zavisnosti od mogućnosti upravljačkog algoritma, koje je predvideo i implementirao proizvođač opreme za ublažavanja štetnog uticaja izobličenja talasnog oblika mrežnog napona na talasni oblik mrežne struje.
- ✓ Pokazano je da se predstavljeni simulacioni model može koristiti za dalja ispitivanja ponašanja pogona u idealnim uslovima napajanja, kao i u uslovima koje je opasno ili nemoguće izvesti u laboratoriji

# Aktivni ispravljač [8]

## Laboratorijsko mesto

*Frekventni pretvarači i merna oprema*

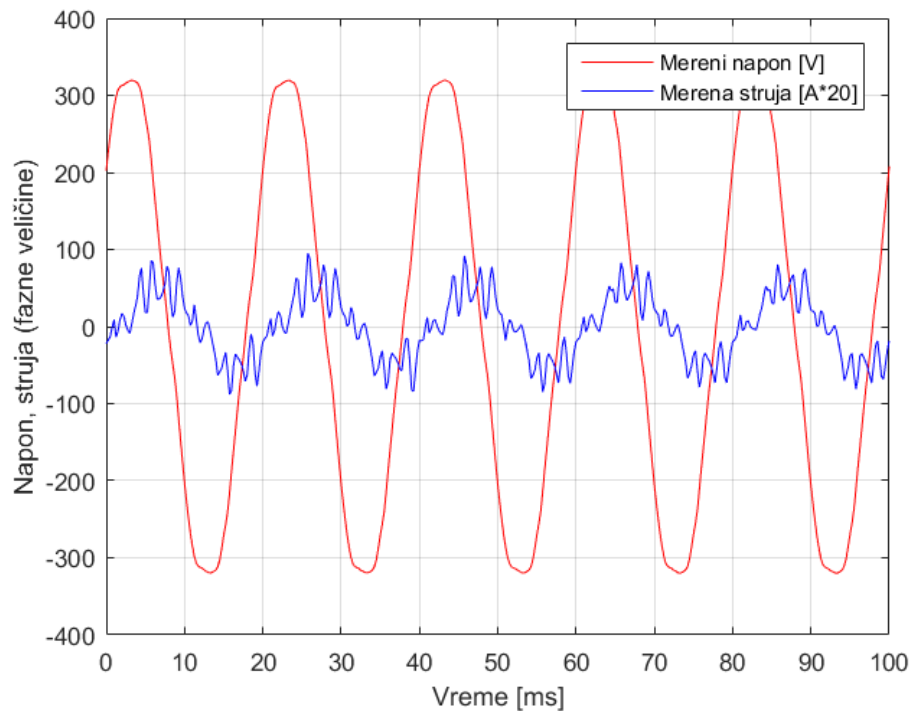


- 1-SINAMICS S120 Booksize Power Unit
- 2-SINAMICS G120
- 3- Osciloskop Tektronix
- 4- PC – sa softverom za upravljanje frekventnim pretvaračima S120 i G120
- 5-Kutija sa prekidačima povezanim na digitalne ulaze frekventnog pretvarača G120

*Dva kruto mehanički spregnuta asinhrona motora*



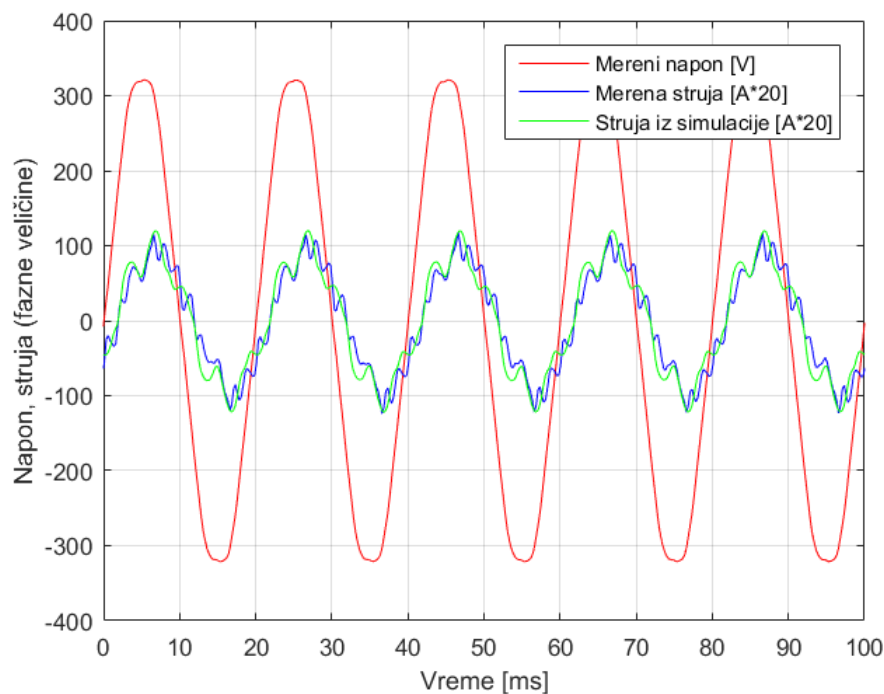
# Aktivni ispravljač u režimu praznog hoda



*Talasni oblik mrežnog napona i struje u režimu praznog hoda pretvarača, učestanost odabiranja 4kHz)  
( $THDi=37,216\%$ ,  $THDu=3,623\%$ )*

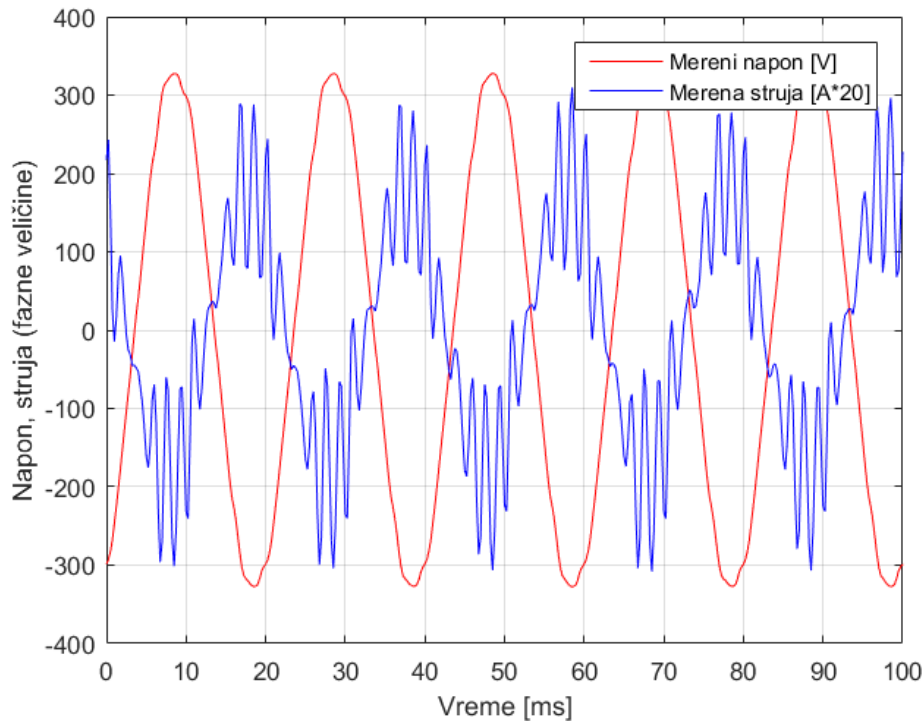
# Aktivni ispravljač u motornom režimu rada

*Amplitudski spektar mrežne struje – rad pretvarača sa pozitivnom aktivnom snagom ( $P=1886\text{ W}$ ,  $Q=445.6\text{ Var}$ ,  
 $S=2382\text{ VA}$ ,  $\lambda=0,792$ ,  $\cos\varphi=0,973$ ,  
 $THDi=17,579\%$ ,  $THDu=2.645\%$ )*



*Talasni oblici mrežnog napona i struje u motornom režimu rada elektromotornog pogona (motor je opterećen sa 50% nominalnog momenta opterećenja)*

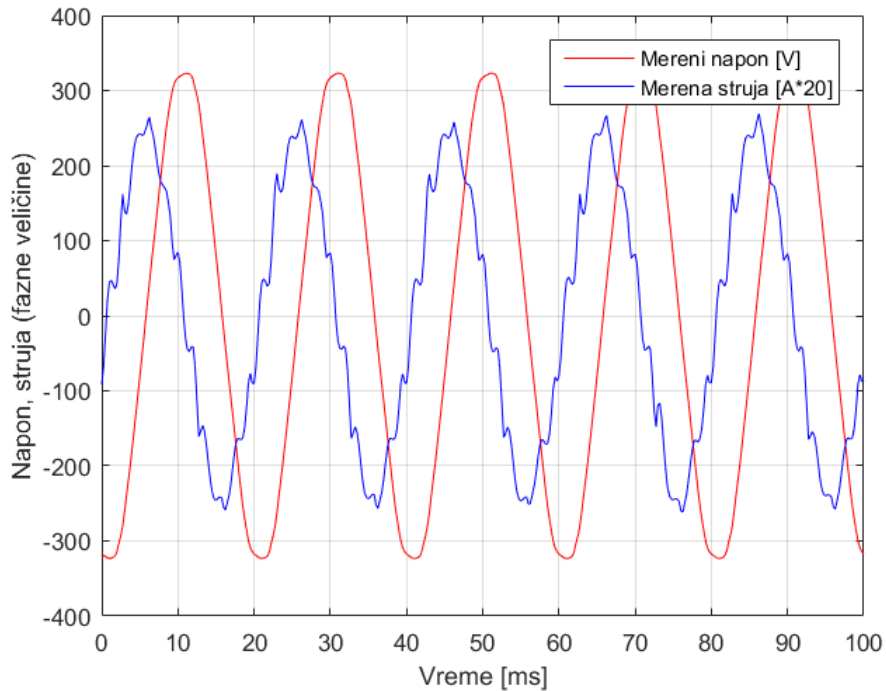
# Generatorski režim rada – rekuperacija energije u mrežu



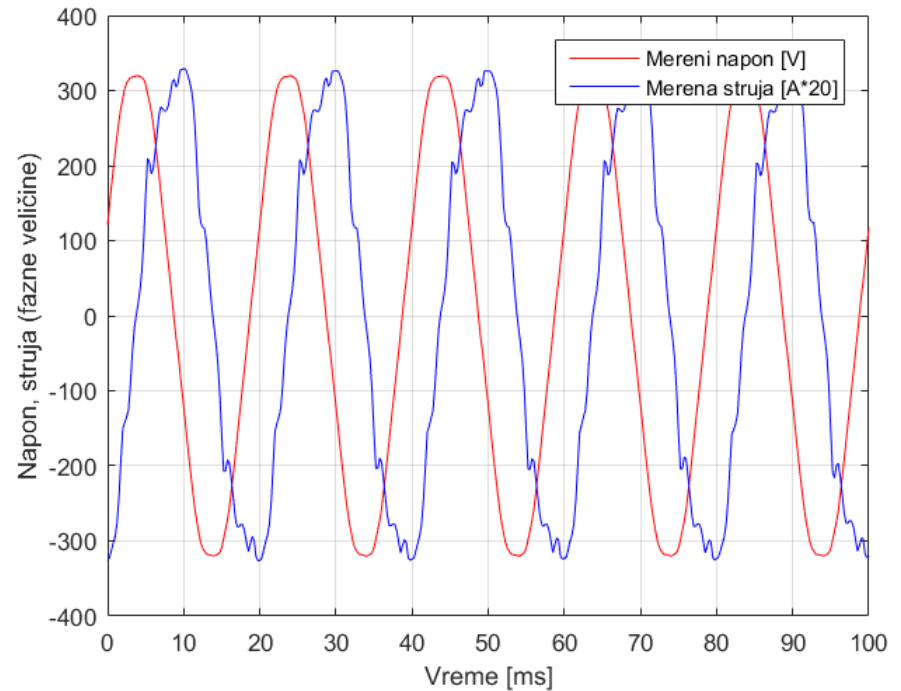
*Talasni oblici mrežnog napona i struje na ulazu u pretvarač - pretvarač radi sa negativnom aktivnom snagom ( $P=4465\text{ W}$ ,  $Q=444\text{ Var}$ ,  $S=5139\text{ VA}$ ,  $\lambda=-0,869$ ,  $\cos\varphi=-0,995$ ,  $THDi=47,033\%$ ,  $THDu=2,231\%$ )*

- Glavna prednost aktivnog ispravljača je rad sa negativnom aktivnom snagom, odnosno rekuperacija energije.
- U ovom režimu, aktivnu snagu generiše motor koji radi u režimu rekuperativnog kočenja. Energija se invertorom konvertuje i snabdeva jednosmerno međukolo pretvarača i injektira u napojnu mrežu.
- Gubici snage u pretvaraču nadoknađuju se iz generisane snage motora, što rezultuje nešto manjom snagom koja se vraća u mrežu, od one koju motor zaista proizvodi u generatorskom režimu rada.

# Kompenzacija reaktivne snage na mestu priključenja pretvarača na mrežu

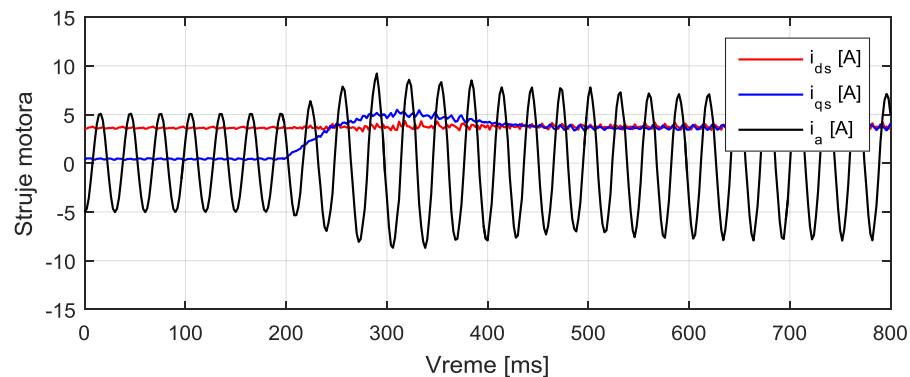
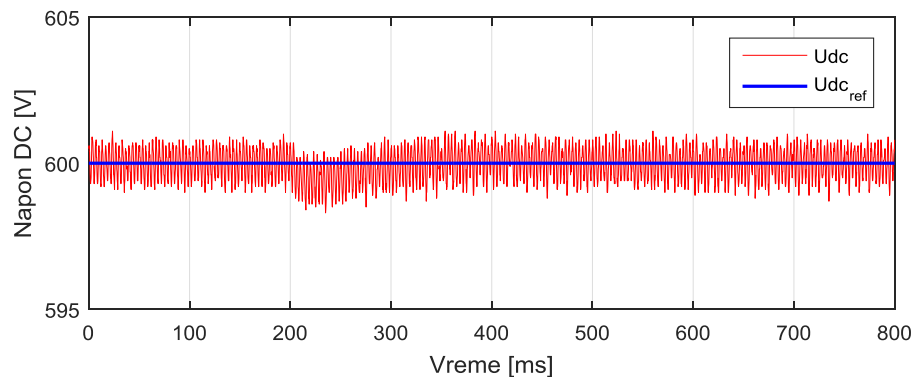
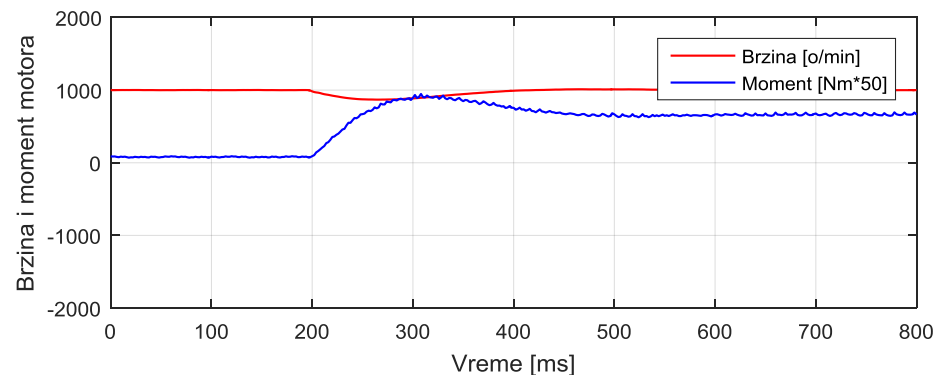
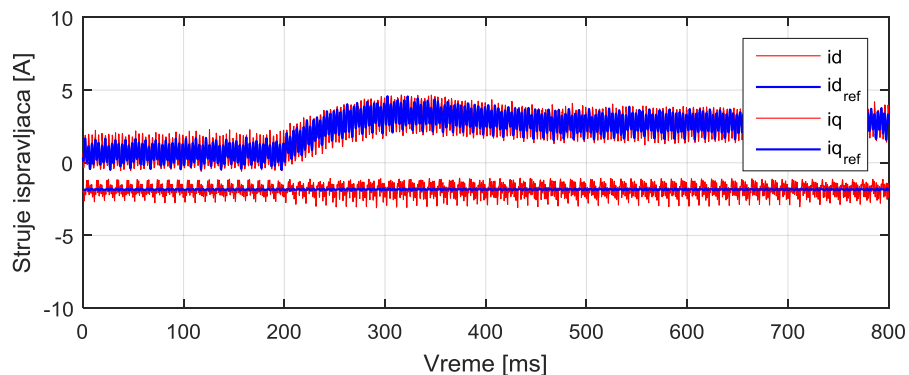


*Talasni oblici mrežnog napona i struje na ulazu u pretvarač - pretvarač radi sa nultom aktivnom i negativnom reaktivnom snagom (kapacitivno opterećenje, THDi=10,567%, THDu=2,316%)*



*Talasni oblici mrežnog napona i struje na ulazu u pretvarač - pretvarač radi sa nultom aktivnom i pozitivnom reaktivnom snagom (induktivno opterećenje, THDi=10,319%, THDu=2,101%)*

# Prelazni režimi rada aktivnog ispravljača – promena opterećenja u motornom režimu rada elektromotornog pogona

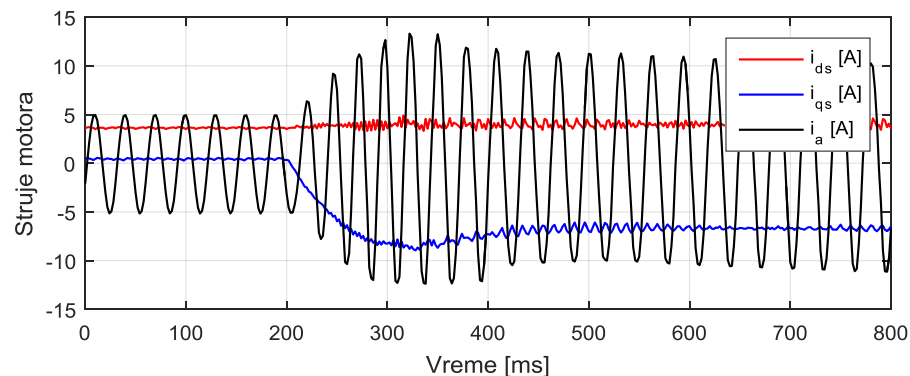
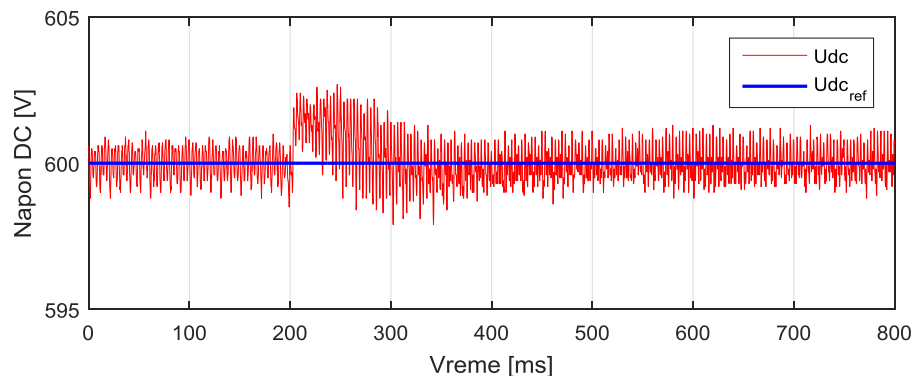
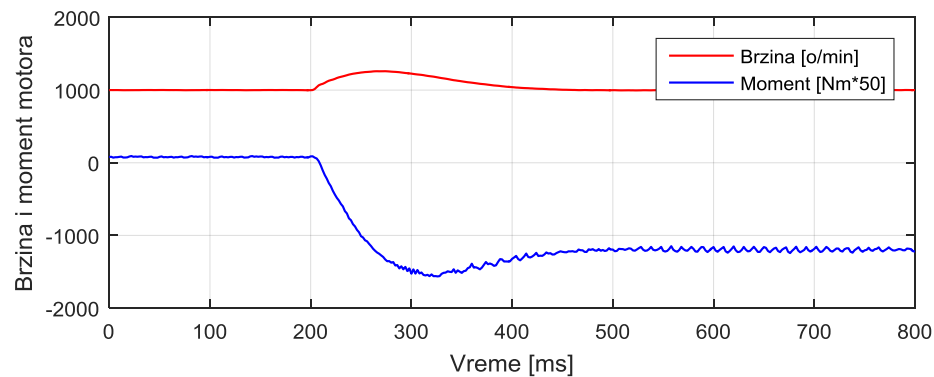
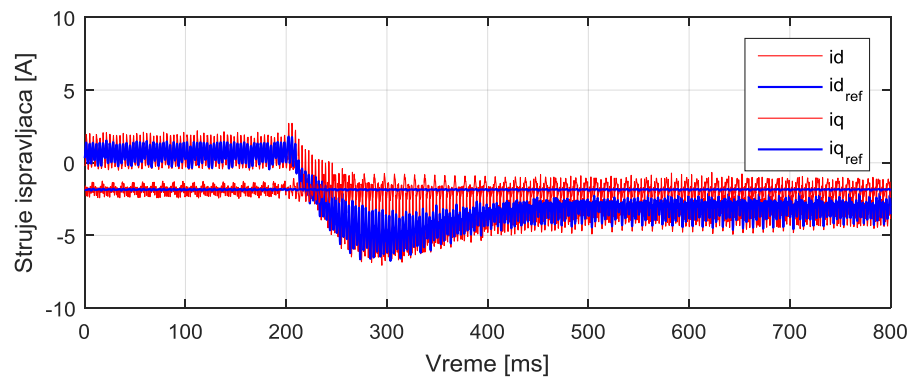


*Vremenski dijagrami karakterističnih veličina ispravljača pri naglom povećanju opterećenja motora – motorni režim rada: referentne i ostvarene komponente struja u sinhrono rotirajućem koordinatnom sistemu i referentni i ostvareni napon u jednosmernom međukolu*

*Vremenski dijagrami karakterističnih veličina pogona i invertora pri naglom povećanju opterećenja motora – motorni režim rada: brzina i moment motora, ostvarene vrednosti komponenti struja u sinhrono rotirajućem koordinatnom sistemu i fazna struja motora*



# Prelazni režimi rada aktivnog ispravljača – prelaz iz motornog u generatorski režim rada elektromotornog pogona



*Vremenski dijagrami karakterističnih veličina ispravljača pri nagloj promeni opterećenja motora – generatorski režim rada: referentne i ostvarene komponente struja u sinhrono rotirajućem koordinatnom sistemu i referentni i ostvareni napon u jednosmernom međukolu*

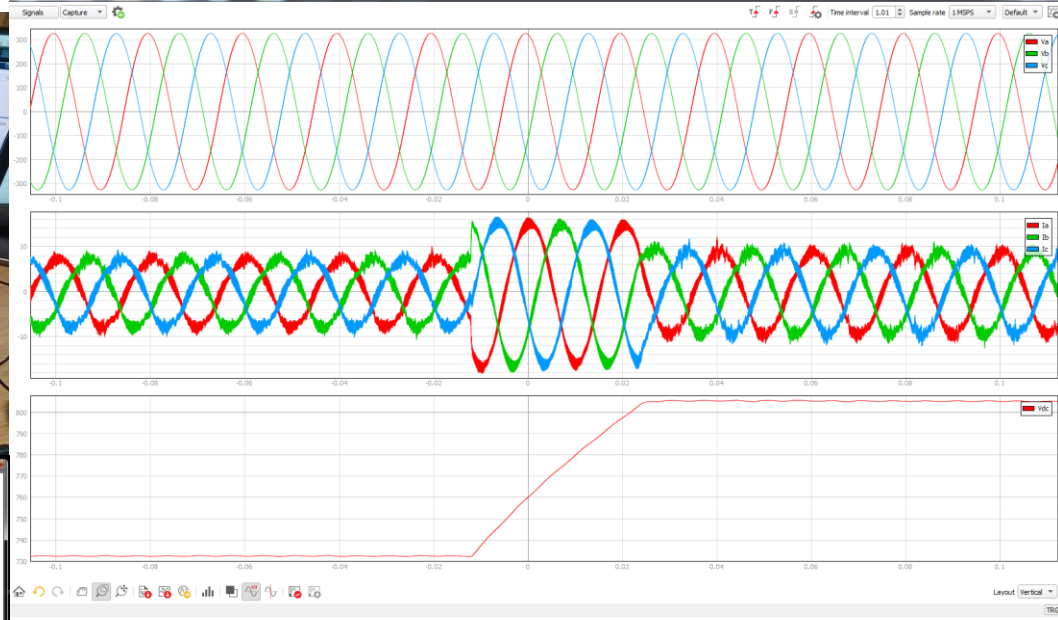
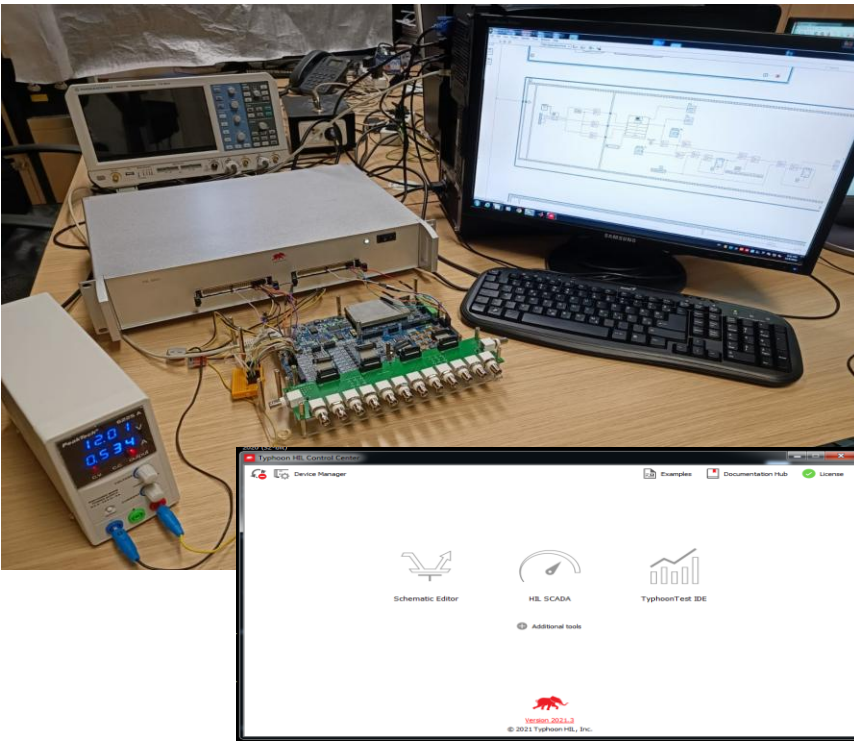
*Vremenski dijagrami karakterističnih veličina pogona i invertora pri nagloj promeni opterećenja motora – generatorski režim rada: brzina i moment motora, ostvarene vrednosti komponenti struja u sinhrono rotirajućem koordinatnom sistemu i fazna struja motora*

# ZAKLJUČAK

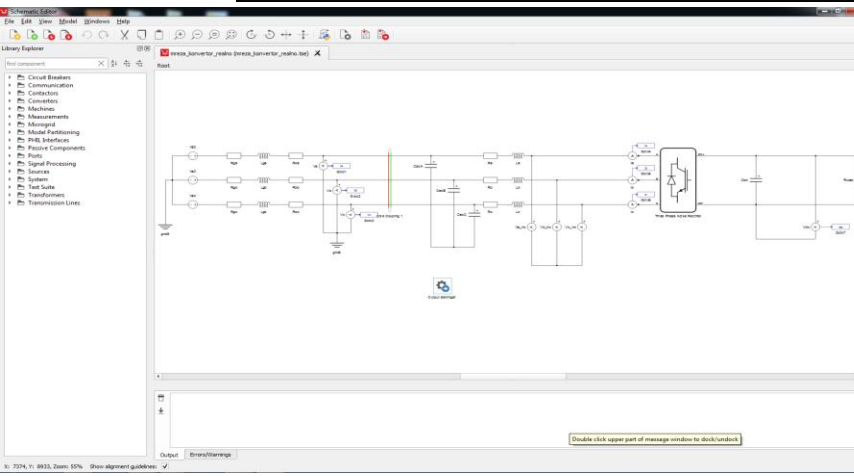
Značajna ušteda energije se može ostvariti:

- ✓ radom pogona u energetske optimalnoj radnoj tački sa stanovišta tehnološkog procesa,
- ✓ odabirom energetske efikasnijih komponenti pogona ,
- ✓ optimizacijom gubitaka u motoru i pretvaraču (bitna samo ako su komponente pogona izabrane sa dovoljnom rezervom nominalne snage),
- ✓ **Primena regulisanih aktivnih ispravljača kao ulazne komponente frekventnog pretvarača pruža još više mogućnosti za poboljšanje energetske efikasnosti elektromotornog pogona.**
  - Rekuperacija energije u pogonima sa vertikalnim transportom tereta, ili tokom usporavanja pogona koji imaju veliku inerciju .
  - Rad pogona sa prostoperiodičnom mrežnom strujom i u motornom i u generatorskom režimu.
  - **Faktor snage prema mreži je približno jednak jedinici**, ali po potrebi može biti podešen i drugačije kako bi se dinamički kompenzovala reaktivna snaga ostalih potrošača priključenih na iste sabirnice kao i pogon sa aktivnim ispravljačem (ovo je moguće samo ako postoji adekvatna rezerva u snazi pretvarača).

# Realizacija aktivnog ispravljača sa VOC – Hardware In the Loop laboratorijska postavka (Typhoon HIL 602+, PED Board) [9]

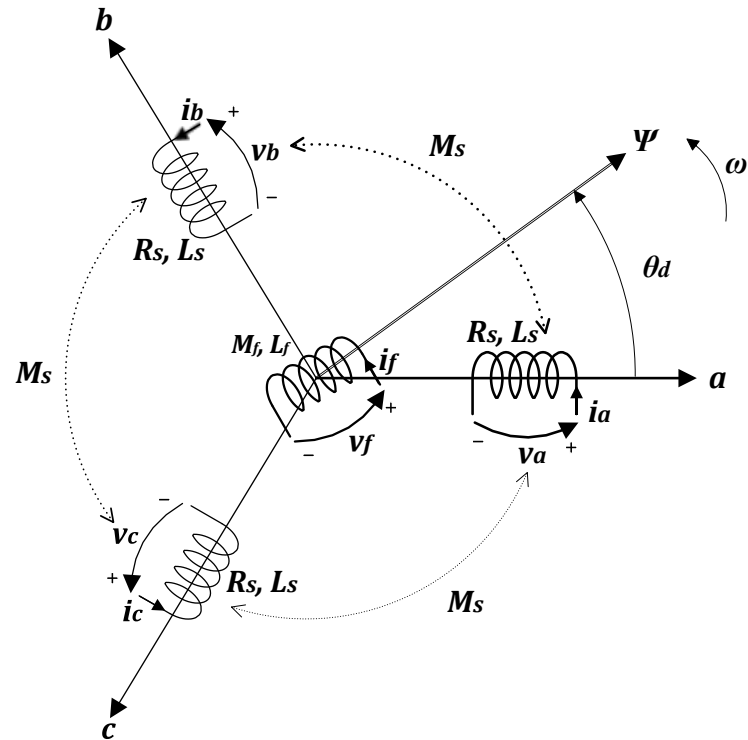
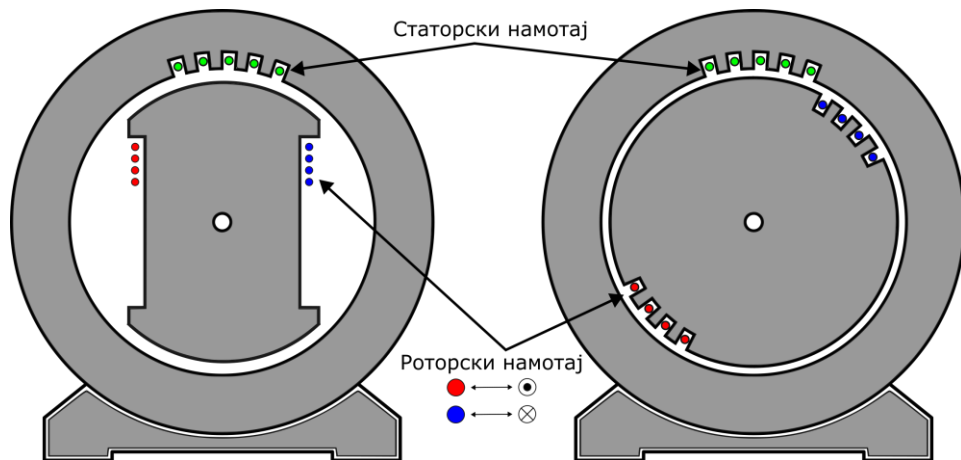


fazni naponi mreže, fazne struje, jednosmerni napon



Software interface showing a control block diagram and a digital display. The digital display shows a voltage of 752.84 V. A 'Capture Scope' dialog box is open, and a 'Message Log' is visible at the bottom.

# Hardware In the Loop simulacija Virtuelnog sinhronog motora laboratorijska postavka (Typhoon HIL 602+, PED Board) [10]



$$e_a = -M_f i_f \omega \sin(\theta_d) + M_f \frac{di_f}{dt} \cos(\theta_d)$$

$$T_e = pM_f i_f [i_a \sin(\theta_d) + i_b \sin(\theta_d - 120^\circ) + i_c \sin(\theta_d - 240^\circ)]$$

$$e_b = -M_f i_f \omega \sin(\theta_d - 120^\circ) + M_f \frac{di_f}{dt} \cos(\theta_d - 120^\circ)$$

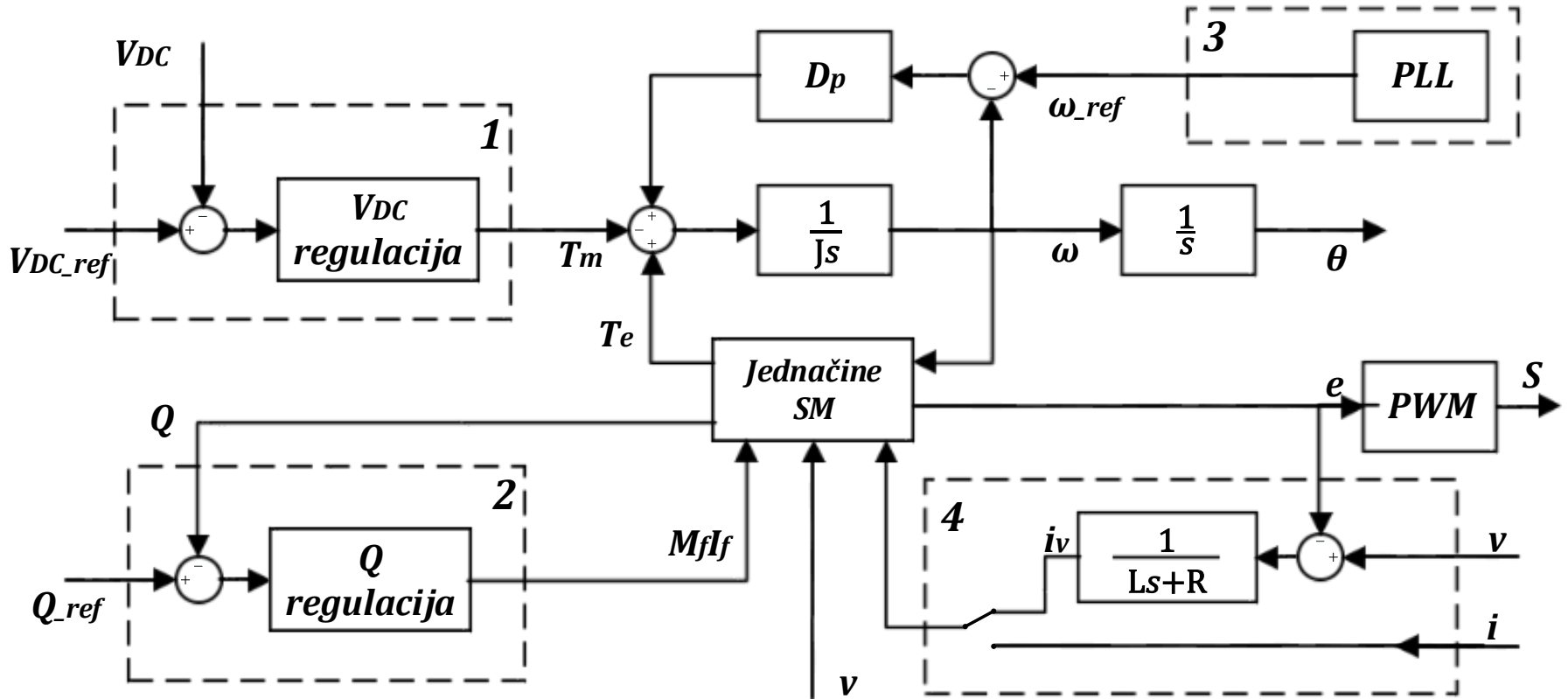
$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_m - D_p (\omega - \omega_{grid})$$

$$e_c = -M_f i_f \omega \sin(\theta_d - 240^\circ) + M_f \frac{di_f}{dt} \cos(\theta_d - 240^\circ)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} [i_a (u_b - u_c) + i_b (u_c - u_a) + i_c (u_a - u_b)]$$

Referentni signali za PWM

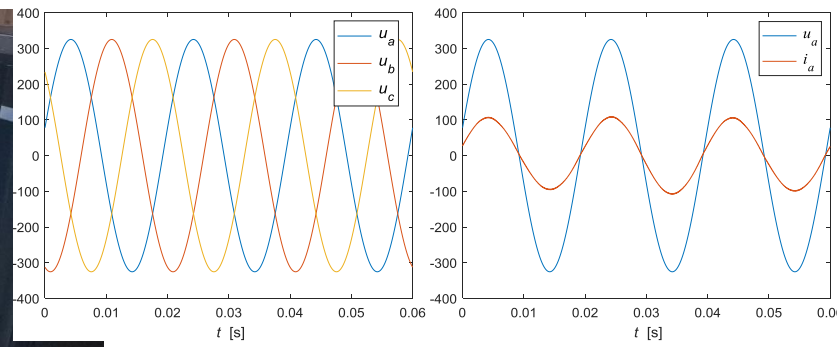
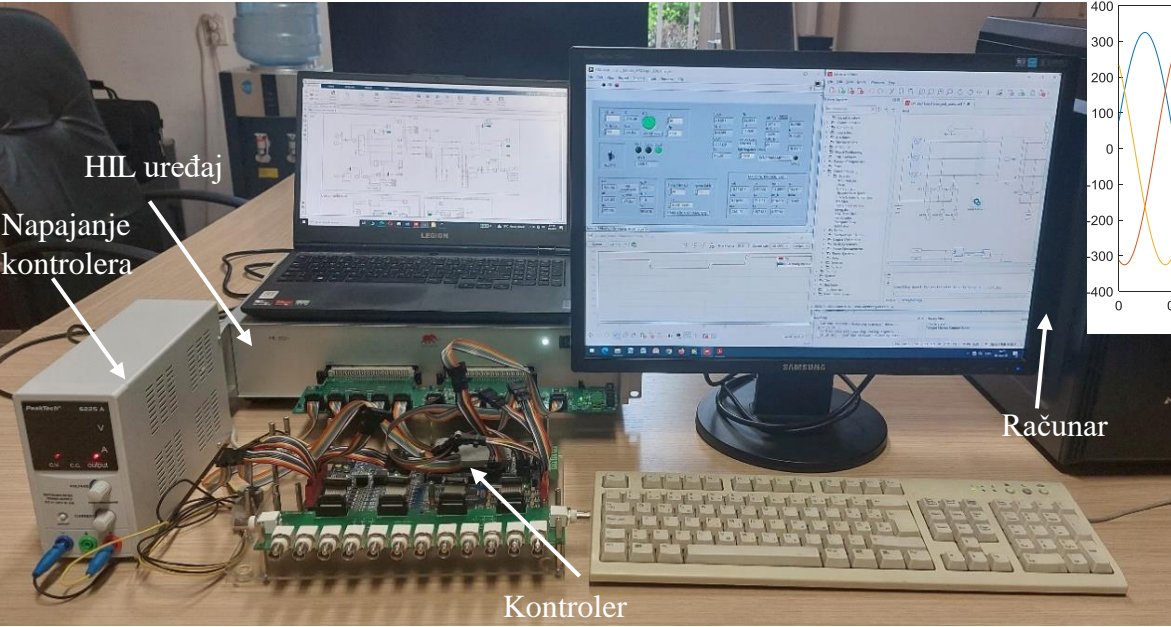
# Hardware In the Loop simulacija Virtuelnog sinhronog motora laboratorijska postavka (Typhoon HIL 602+, PED Board) [10]



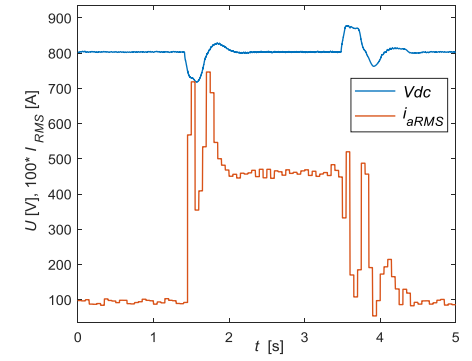
Upravljački blok dijagram:

1. Regulator jednosmernog napona; 2. Regulator reaktivne snage; 3. Fazno sinhronizovana petlja; 4. Blok za sinhronizaciju sa mrežom

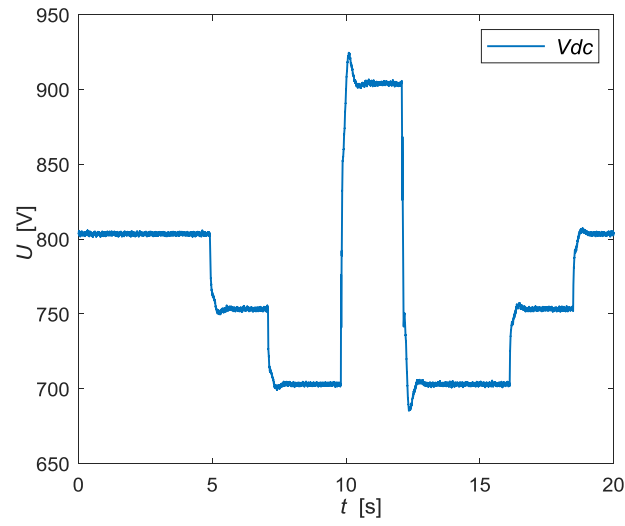
# Hardware In the Loop simulacija Virtuelnog sinhronog motora laboratorijska postavka (Typhoon HIL 602+, PED Board) [10]



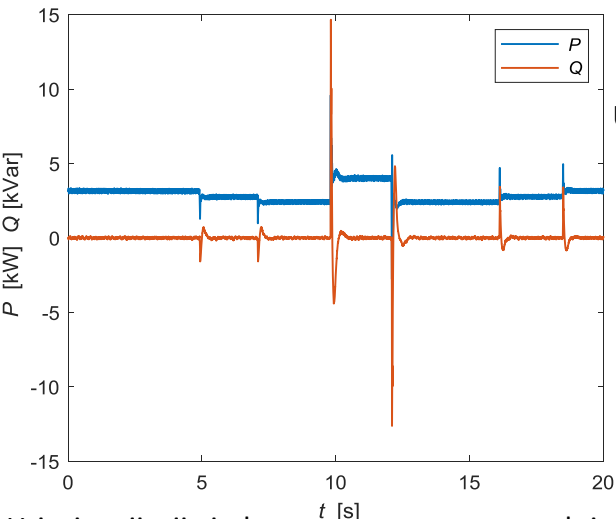
Fazni naponi mreže (levo), napon i struja faze a



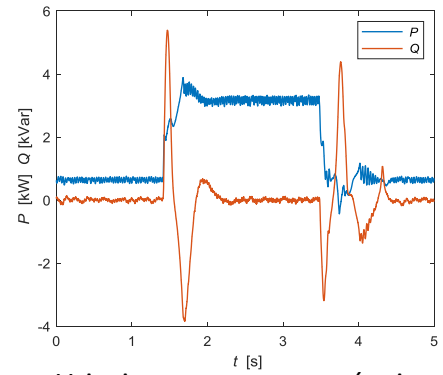
Uticaj promene opterećenja na jednosmerni napon



Varijacije jednosmernog napona



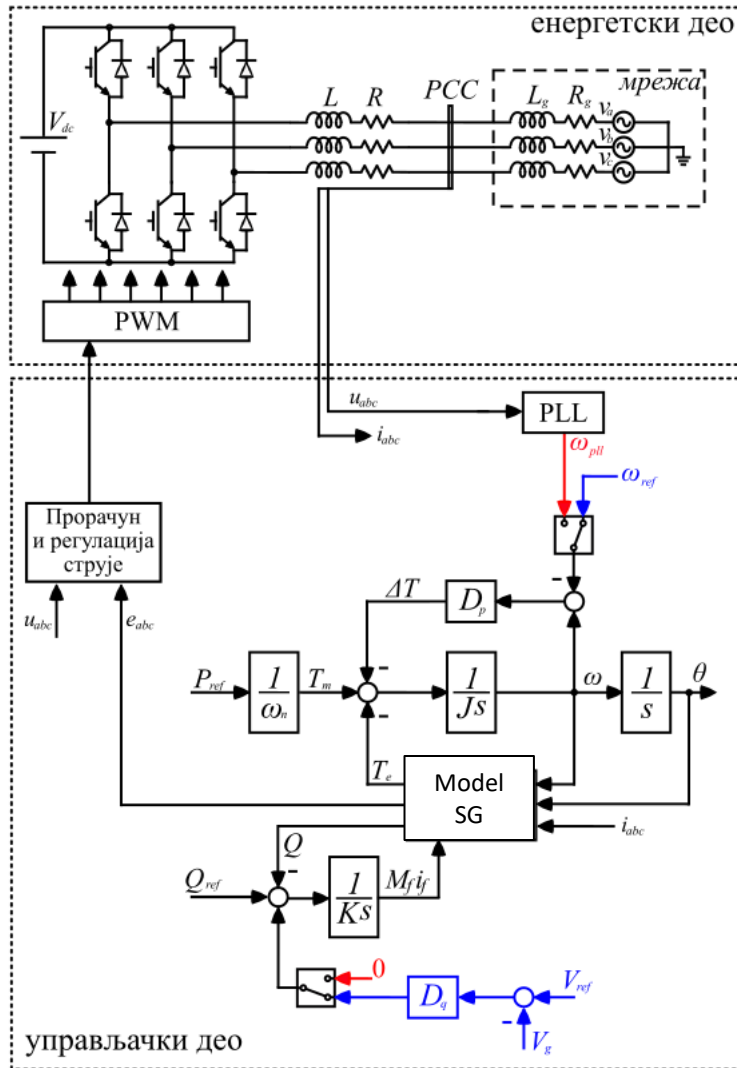
Uticaj varijacija jednosmernog napona na aktivnu i reaktivnu snagu



Uticaj promene opterećenja na aktivnu i reaktivnu snagu



# Hardware In the Loop simulacija Virtuelnog sinhronog generatora laboratorijska postavka (Typhoon HIL 602+, PED Board) [11]



## Model SG

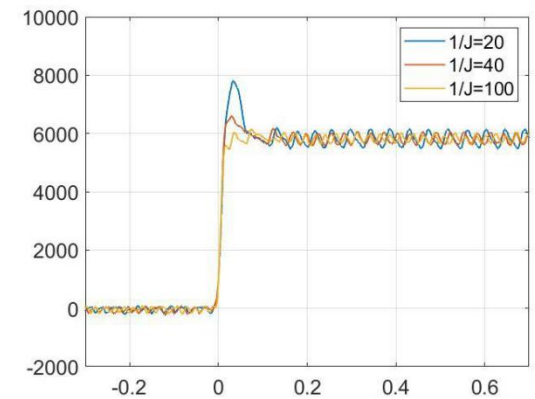
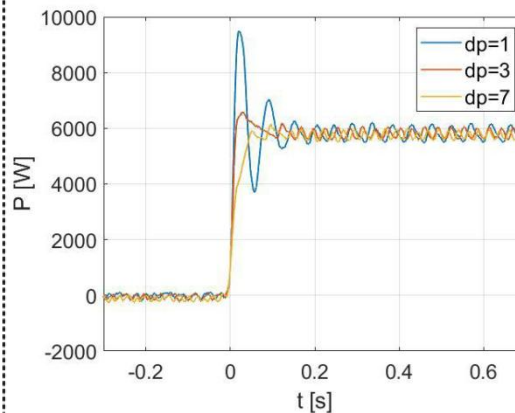
$$e_a = -M_f i_f \omega \sin(\theta_d) + M_f \frac{di_f}{dt} \cos(\theta_d)$$

$$e_b = -M_f i_f \omega \sin\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) + M_f \frac{di_f}{dt} \cos\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$e_c = -M_f i_f \omega \sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) + M_f \frac{di_f}{dt} \cos\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$T_e = -\frac{dW}{d\theta_m} = -p \frac{dW}{d\theta_d} = p M_f i_f [i_a \sin(\theta_d) + i_b \sin\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right)]$$

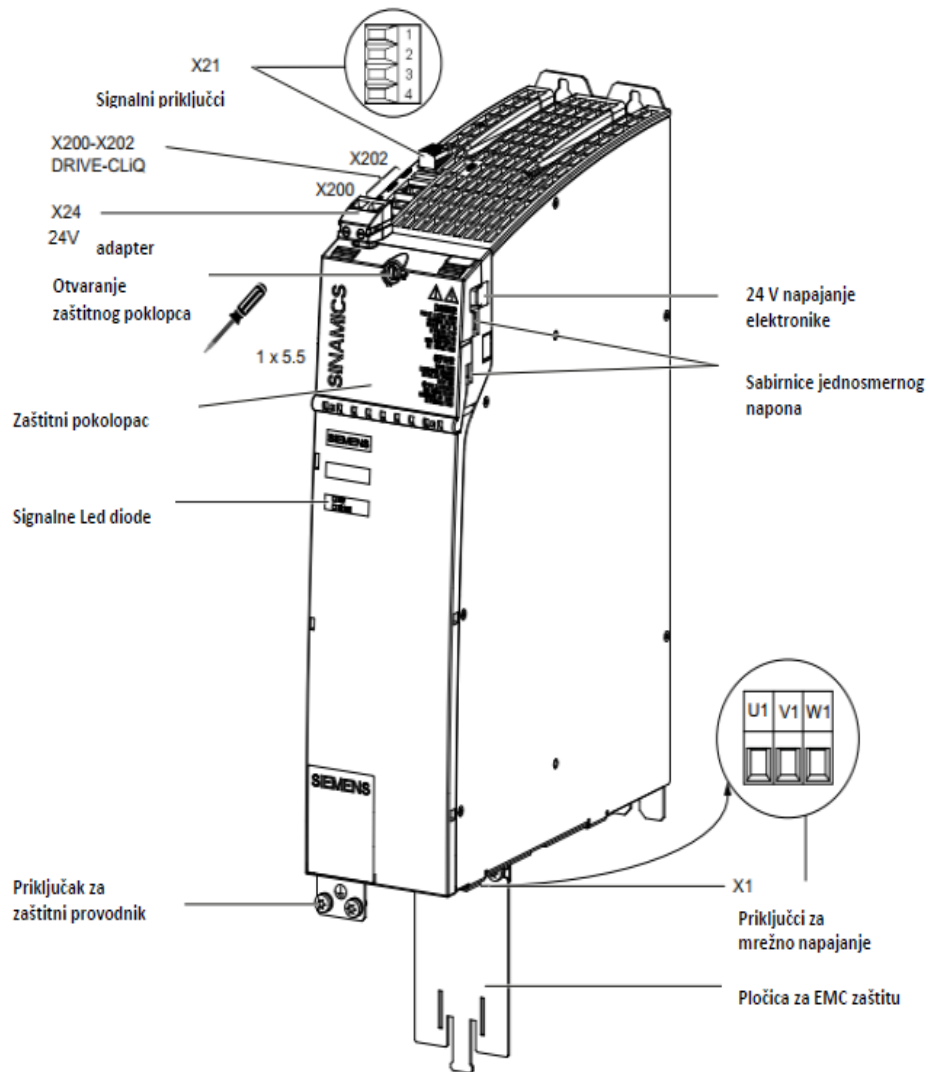
$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} [(v_b - v_c)i_a + (v_c - v_a)i_b + (v_a - v_b)i_c]$$



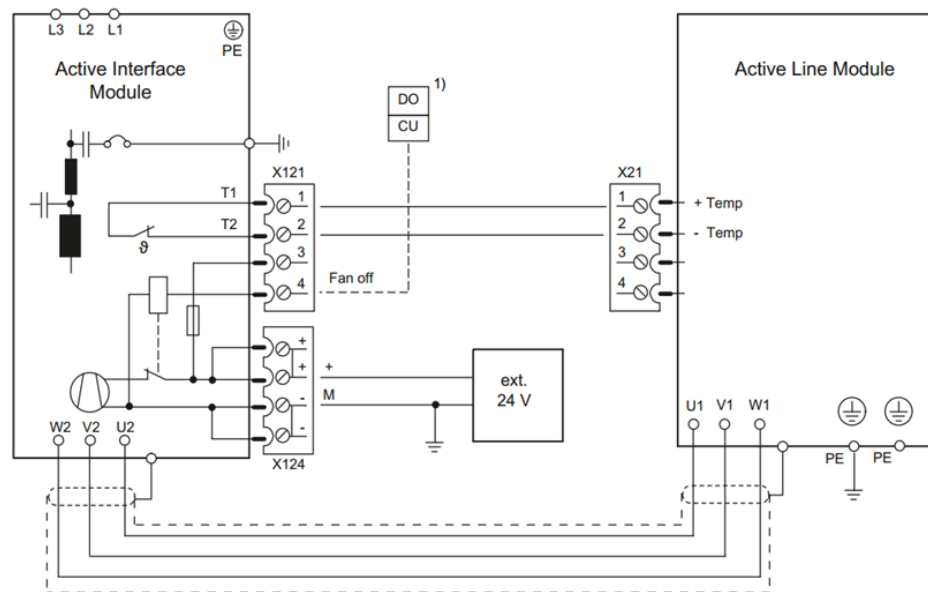
Odzivi invertora dobijeni u HIL simulaciji za različite  
vrednosti parametara  $D_p$  i  $J$

Formiranje GFM invertora (plava boja) i GFL invertora  
(crvena boja) koristeći koncept VSG

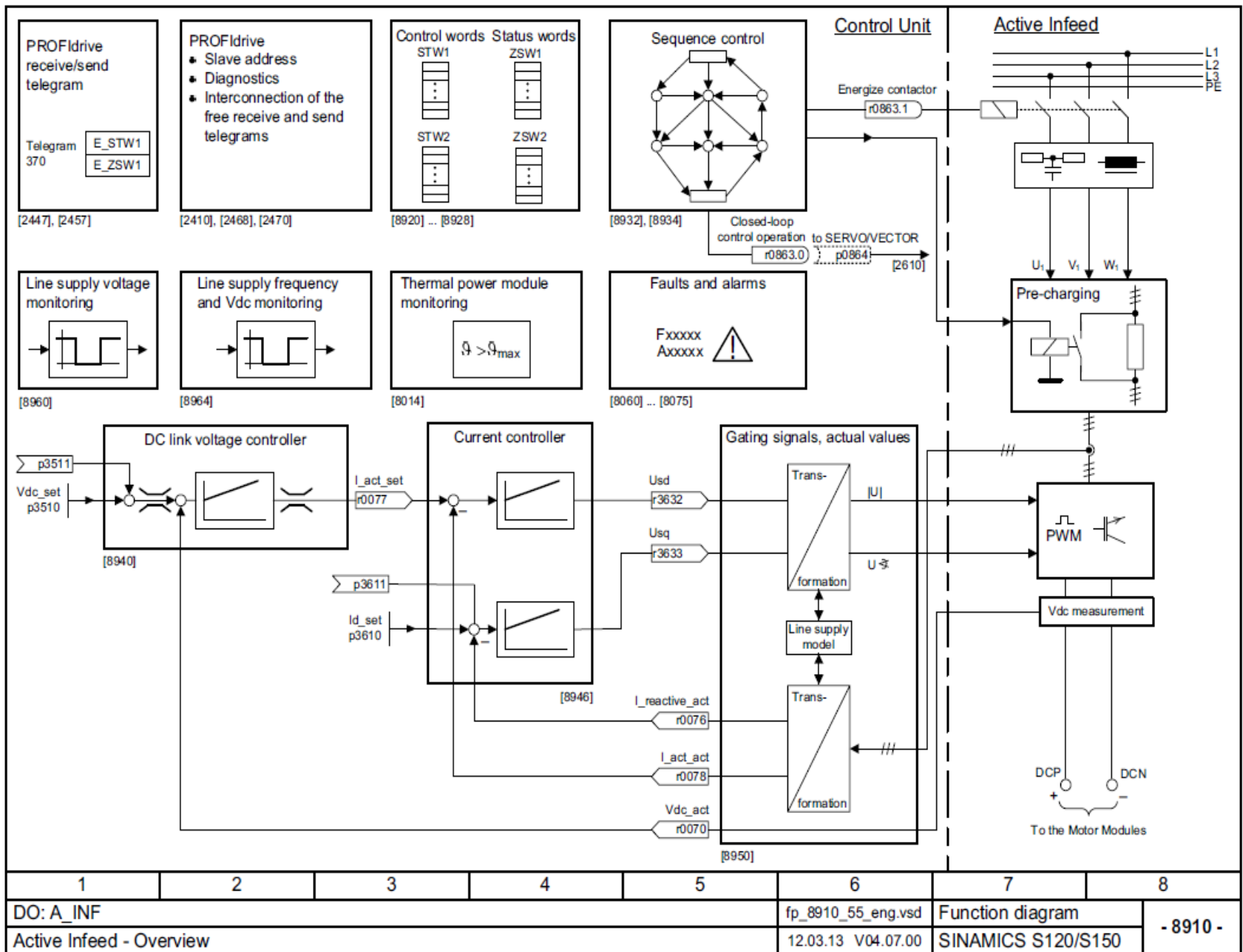
# Industrijski uređaj: Aktivni ispravljač - *Siemens* *Active Line Module* [12,13]



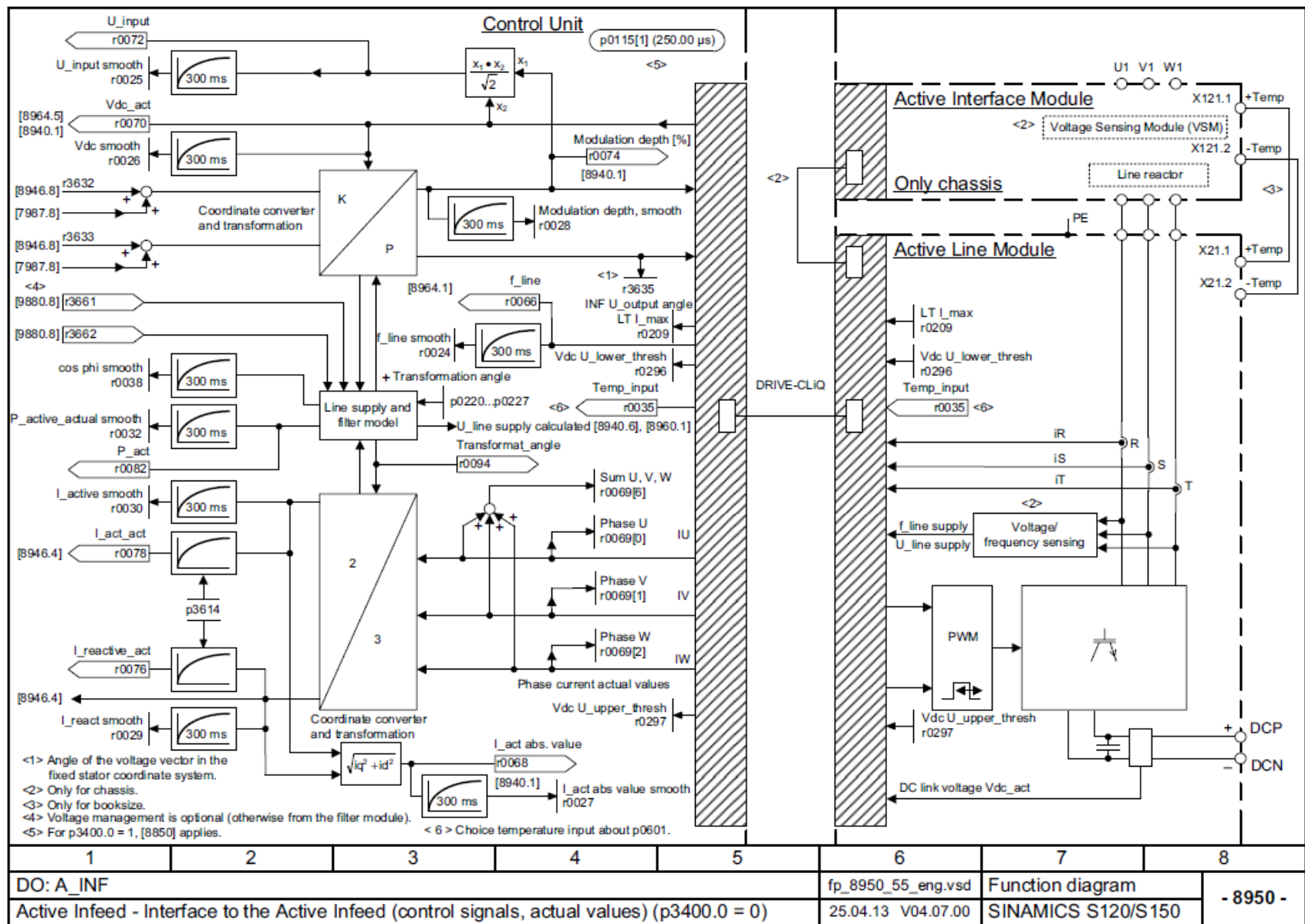
Šema veze aktivnog ispravljača i pasivnog filtera (*Active Interface Module* + *Active Line Module*) [4]







Funkcijski dijagram aktivnog PWM ispravljača [9]

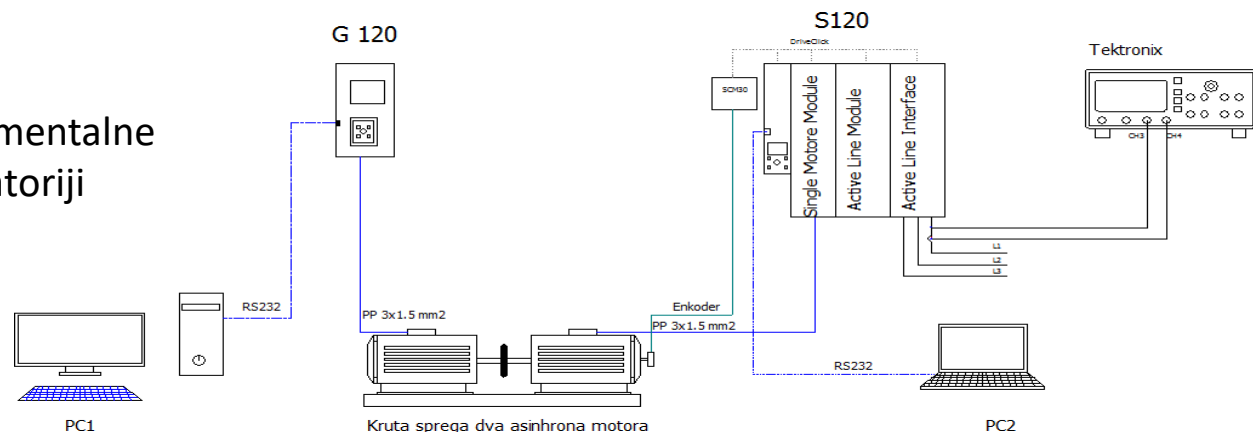


Detaljni blok dijagram ispravljača Active Line module: upravljački signali, trenutne vrednosti [9]

# Industrijski uređaj: Aktivni ispravljač - *Siemens* *Active Line Module*

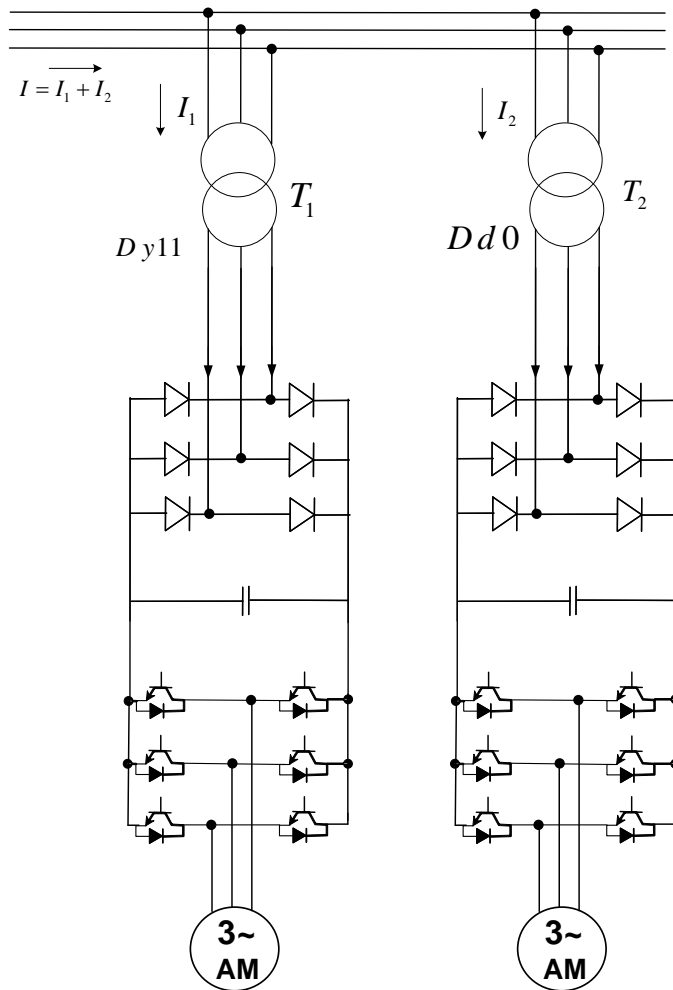
- Na prethodnim blok dijagramima, komponenta  $V_{dc\_set}$  predstavlja vrednost napona u jednosmernom međukolu i ta vrednost je podešena na 600V, razlika  $V_{dc\_set}$  i  $V_{dc\_act}$  se dovodi na ulaz regulatora napona jednosmernog međukola na čijem izlazu se dobija referentna vrednost  $I_{act\_set}$ . Vrednosti struja  $I_{act\_act}$  i  $I_{react\_act}$  predstavljaju aktivnu i reaktivnu komponentu kompleksnog vektora struje kojom se napaja ispravljač.
- Signal greške na ulazu u regulator struje predstavlja razliku referentnih i aktuelnih (trenutnih) vrednosti signala  $I_{act\_set}$  i  $I_{act\_act}$ , kao i  $I_{d\_set}$  i  $I_{react\_act}$ . Razdvajanjem kompleksnog vektora struje na aktivnu i reaktivnu komponentu moguće je vršiti nezavisnu kontrolu protoka aktivne i reaktivne energije.
- Upravljanje Siemens-ovim aktivnim ispravljačem zasnovano je na upravljanje naponom, VOC.

Blok dijagram eksperimentalne postavke u laboratoriji



# Rezime kroz reč proizvođača opreme

## Podsećanje...12- pulsna konfiguracija: dva 6-pulsna mosta



$$A_{kq\pm 1} = \frac{(-1)^k q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{q}\right)}{(kq \pm 1)\pi} \cos(kq\delta)$$

$A_{kq\pm 1}$       **Koeficijent viših strujnih harmonika primara transformatora**

$n = kq \pm 1$       **Redni broj harmonika**

$k = 1, 2, 3, \dots$

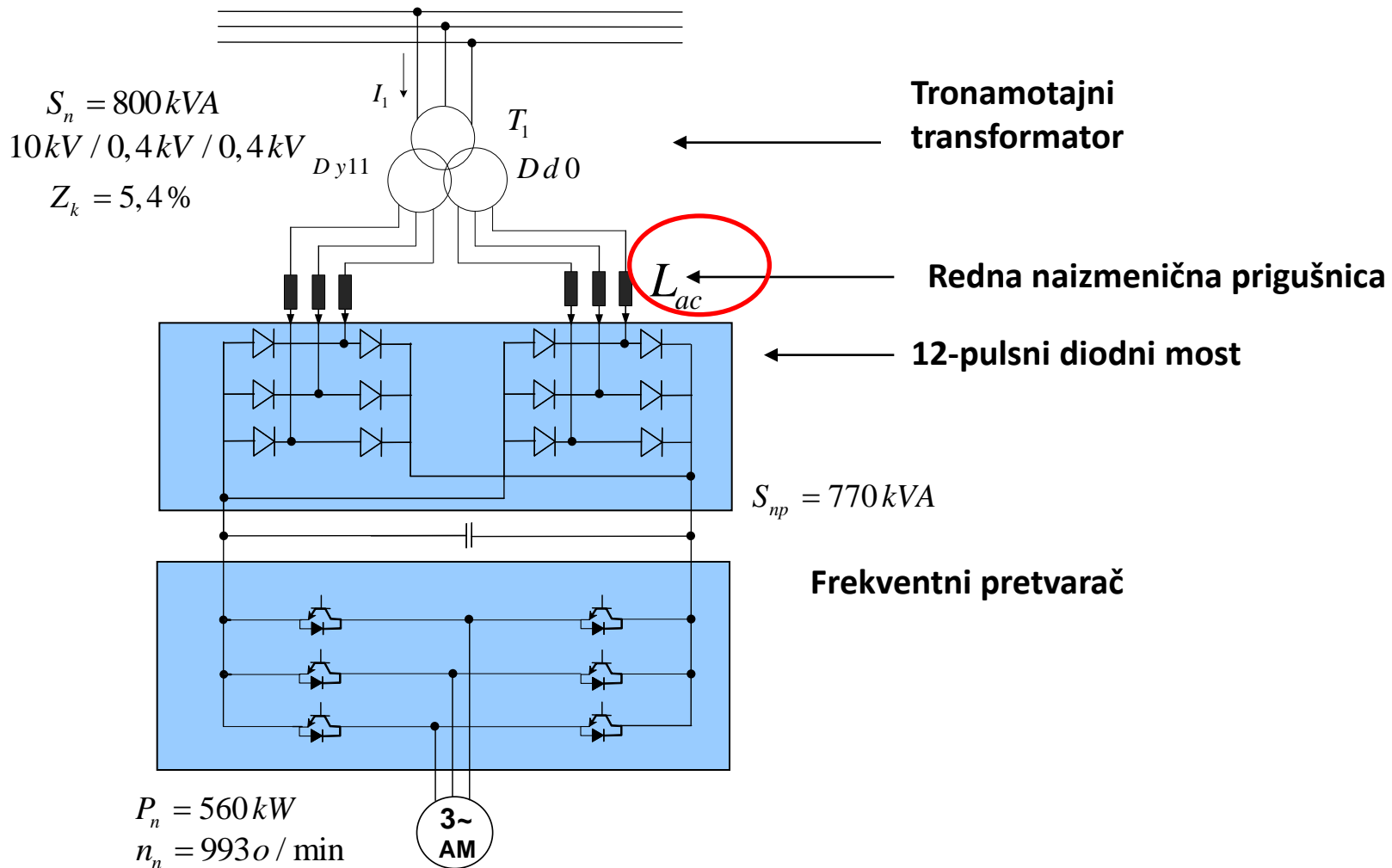
$q = 6$       **Broj komutacija u toku jedne periode**

$\delta$       **Ugao koji predstavlja fazni pomeraj faznih napona primara i sekundara transformatora (grupa sprege)**

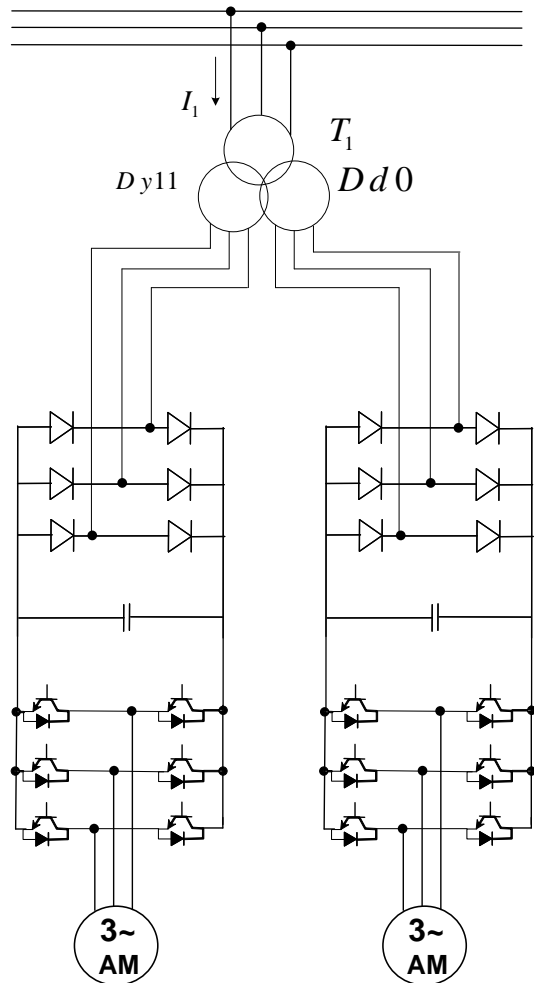
$\delta_1 = 30^\circ$        $Dy11$       **Za trafo T1**

$\delta_2 = 0^\circ$        $Dd0$       **Za trafo T2**

# 12-pulsni ispravljač – harmonijski sadržaj (ABB)



# Podsećanje...12- impulsna veza dva 6-pulsna mosta, jedan tronamotajni transformator (ABB)



$$A_{kq\pm 1} = \frac{(-1)^k q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{q}\right)}{(kq \pm 1)\pi} \cos(kq\delta)$$

$A_{kq\pm 1}$       **Koeficijent viših strujnih harmonika primara transformatora**

$n = kq \pm 1$       **Redni broj harmonika**

$k = 1, 2, 3, \dots$

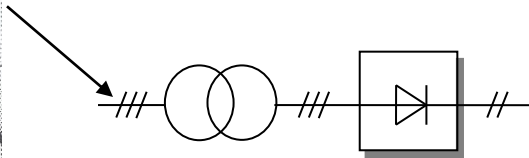
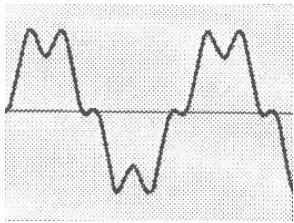
$q = 6$       **Broj komutacija u toku jedne periode**

$\delta$       **Ugao koji predstavlja fazni pomeraj faznih napona primara i sekundara transformatora (grupa sprege)**

$\delta_1 = 30^0$        $Dy11$       **Za trafo T1**

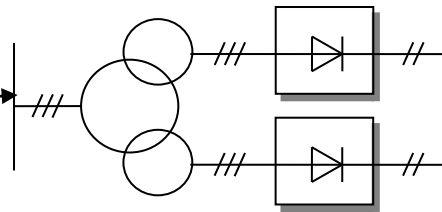
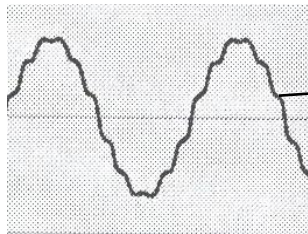
$\delta_2 = 0^0$        $Dd0$       **Za trafo T2**

# Poređenje različitih konfiguracija pretvarača [14]



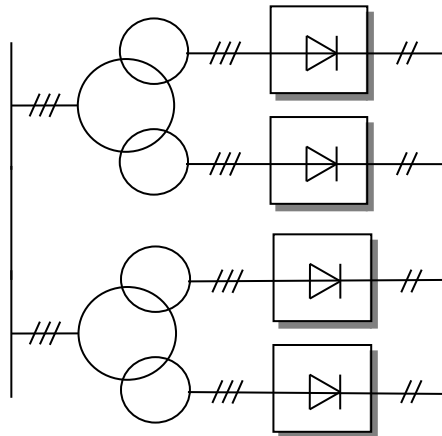
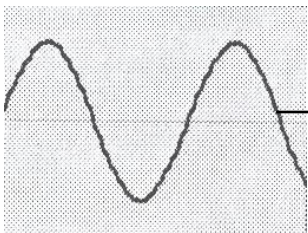
## 6-pulsni ispravljač

- Ispravljačko kolo kod 3-faznih pretvarača je 6-pulsni diodni most.
- Sastoji se od šest neupravljivih poluprovodnika (dioda),



## 12-pulsni ispravljač

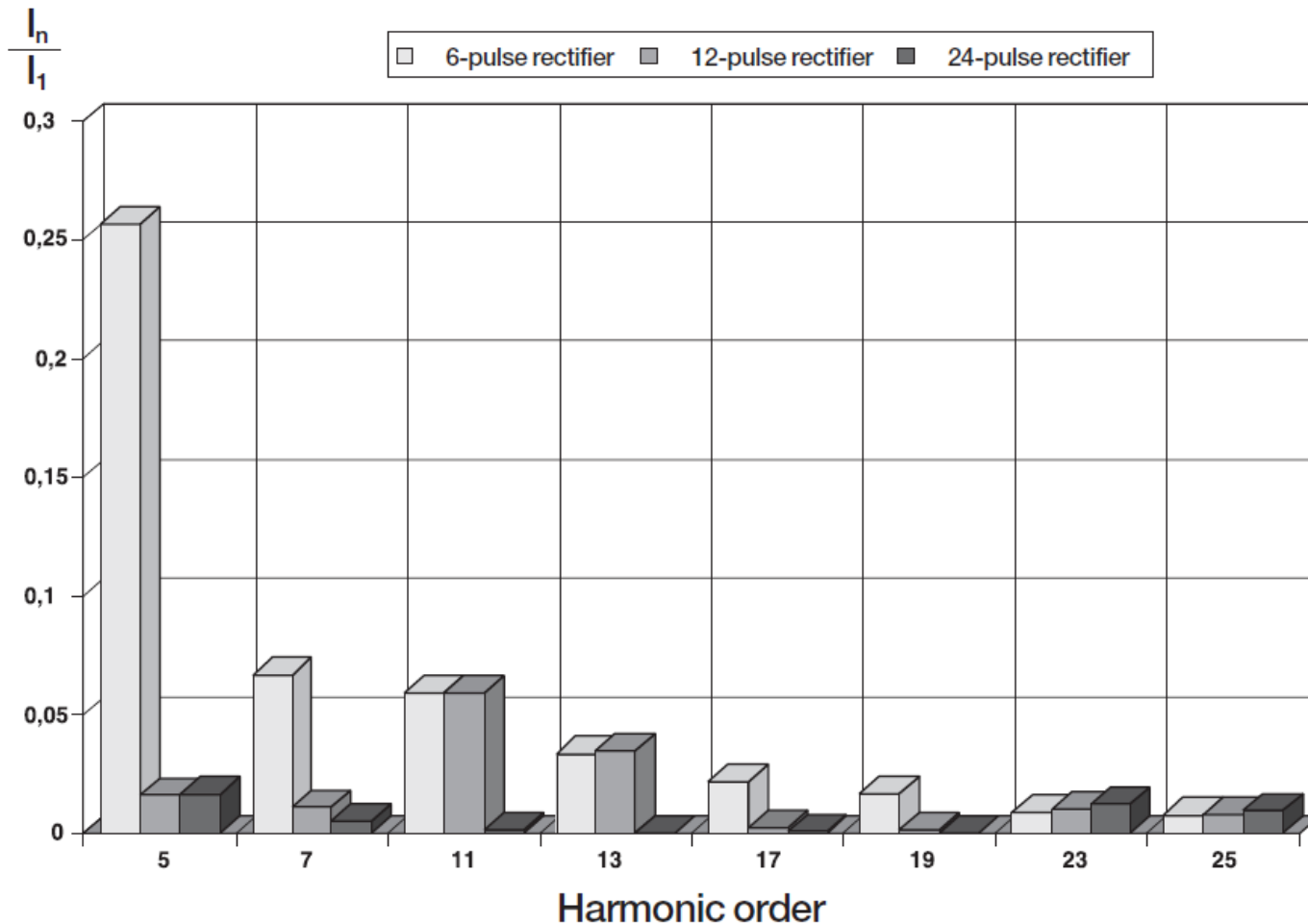
- Dva 6-pulsna ispravljača u paraleli za napajanje zajedničkog jednosmernog kola.
- Napajanje iz tronamotajnog transformatora sa faznim pomerajem sekundara od  $30^{\circ}$ .
- eliminacija 5 i 7 harmonika**



## 24-impulsni ispravljač

- Dva 12-pulsna ispravljača u paraleli za napajanje zajedničkog jednosmernog kola.
- Napajanje iz dva tronamotajna transformatora sa faznim pomerajem sekundara od  $15^{\circ}$ .
- eliminacija 5, 7, i 11, 13 harmonika**

# Harmonijske komponente kod različnih konfiguracija ispravljača [14]

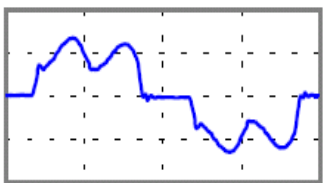
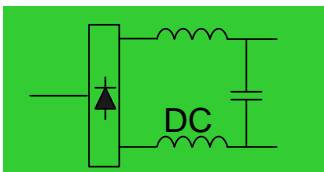




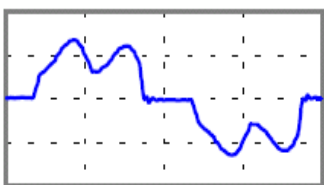
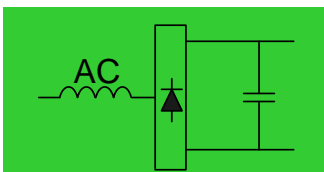
# Prednosti primene više-pulsnog ispravljača u elektromotornom pogonu [1]

- ✓ Robusnost
- ✓ Poznata tehnologija – jednostavnost – priključi i uključi (plug and play)
- ✓ Često zahtevano od strane investitora
- ✓ Pretvarač je galvanski izolovan od mreže
- ✓ Bez dodatnih troškova iako je potreban transformator (npr. u aplikacijama sa transformatorom ispred i iza pretvarača, ili u pogonima veoma velikih snaga)
- ✓ Ne generišu se smetnje na visokim učestanostima
- ✓ Transformator sa dva sekundara (tronamotajni) ima nižu cenu za pogone snage preko 200kW (12 impulsno rešenje)
- ✓ THDi ima vrednost od 12% - 15% sa idealnom mrežom

# Danfoss: Prigušnice u jednosmernom međukolu ili na naizmjeničnoj strani ispravljača [1]:



HARMONICI STRUJE	
Osnov.	36,2 A
THiD	42,5%
Eff. struja	39,5 A



HARMONICI STRUJE	
Osnov.	36,8 A
THiD	43,8%
Eff. struja	40,2 A

## Najvažnije dobre osobine primene prigušnica u jednosmernom međukolu

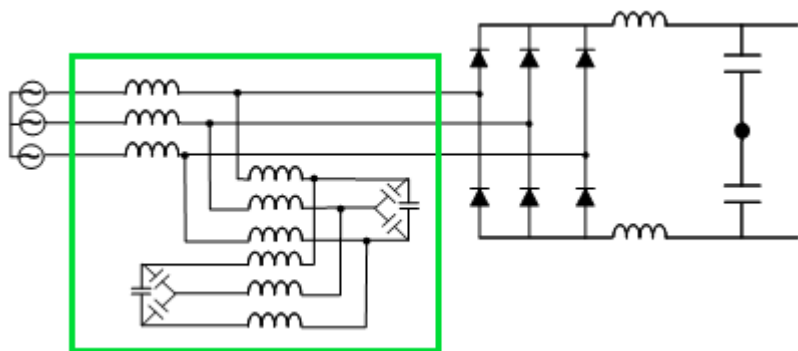
- ✓ Pruža zadovoljavajuće performanse u smanjenju harmonijskog izobličenja
- ✓ Izobličenje je drastično umanjeno
- ✓ Praktično / jednostavno
- ✓ Cena prigušnica uključena u cenu pretvarača
- ✓ Nema komponente struje na mrežnoj učestanosti, čime se smanjuju gubici u odnosu na primenu prigušnica na naizmjeničnoj strani ispravljača.
- ✓ Manja fluktuacija jednosmernog napona - duži životni vek kondenzatora
- ✓ Manja fluktuacija jednosmernog napona - stabilnije upravljanje motorom i **veći moment motora**
- ✓ Samo dve prigušnice su potrebne – manje dimenzije

Primena prigušnica na naizmjeničnoj strani ispravljača, kao što je prikazano na slici, pruža nešto lošije performanse u poređenju sa primenom prigušnica u jednosmernom međukolu, ali postoje i neke prednosti ovog rešenja:

- ✓ Komutacija diodnog ispravljača ne utiče na mrežu
- ✓ **Štite pretvarač od poremećaja napona napajanja (naponskih tranzijenata)**
- ✓ Bolje rezultati u redukciji harmonika visokog reda



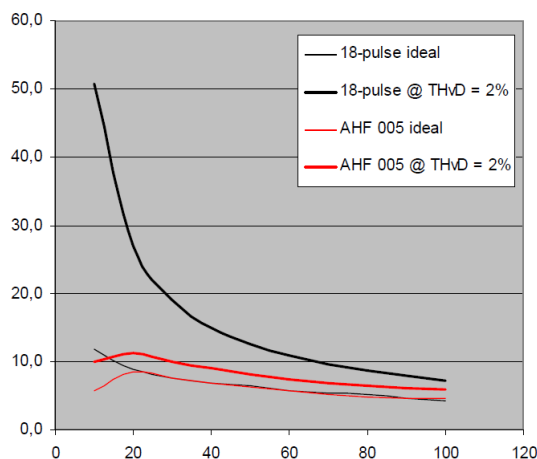
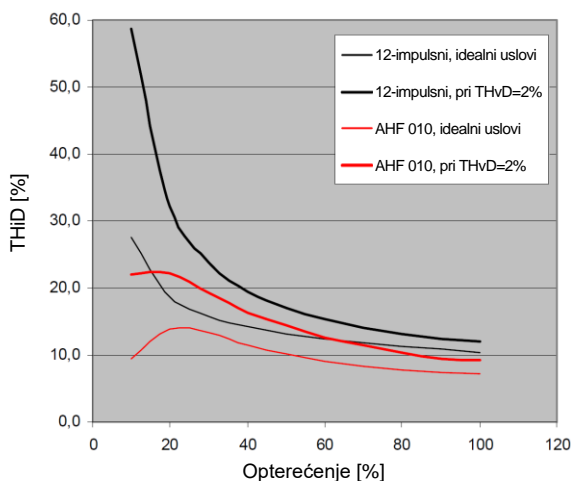
# Danfoss-ov napredni filter harmonika [1]:



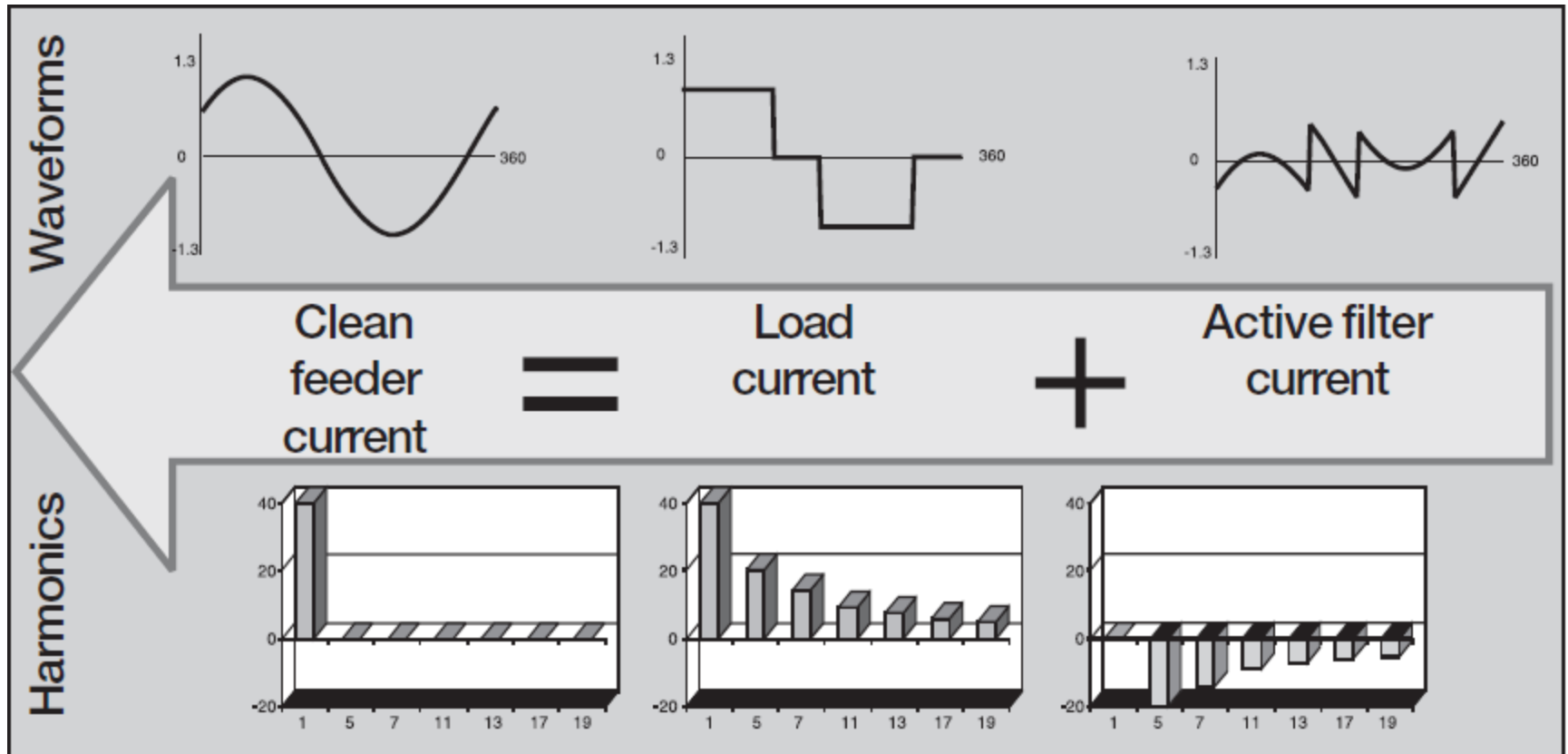
Uprošćeni blok dijagram AHF filtera

## Prednosti primene naprednih filtera harmonika

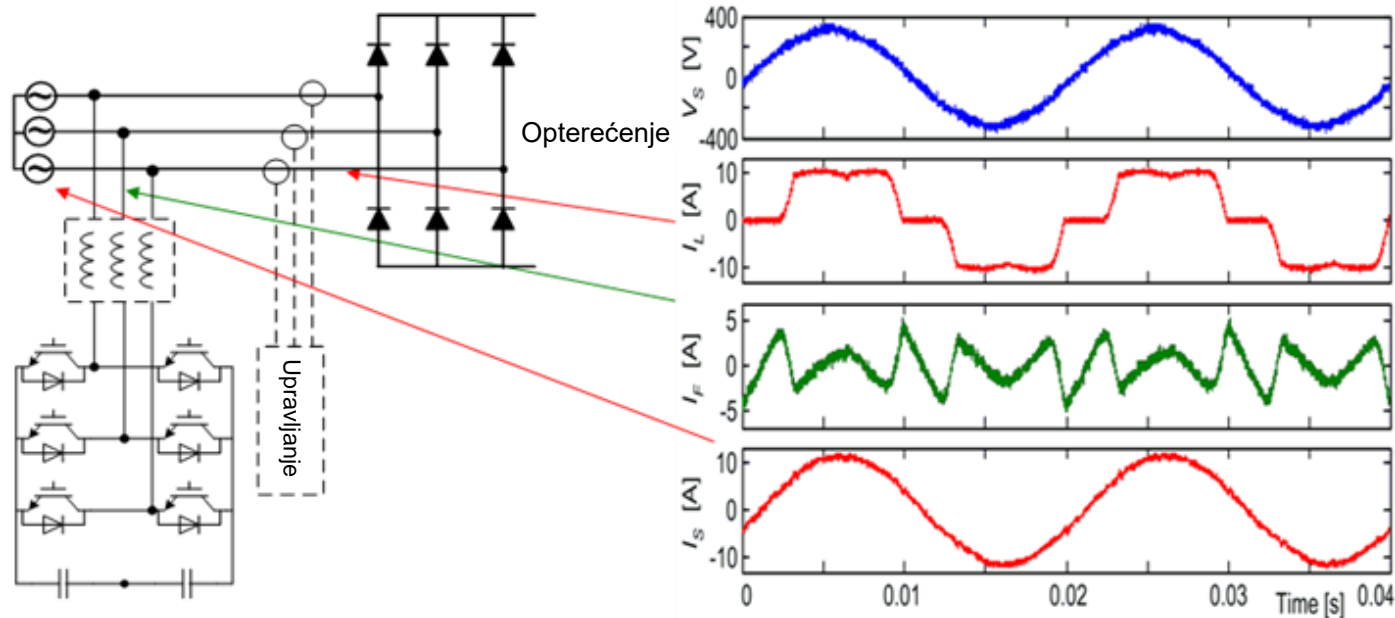
- Jednostavno puštanje u rad, nema podešavanja parametara
- Rešenje koje ne zahteva periodično održavanje
- Jedan filter može da zaštiti više pretvarača
- Projektovani da ispune preporuke o ograničenju izobličenja struja IEEE 519-1992
- AHF 010 obezbeđuje vrednost THDi < 10%, što je isti ili bolji rezultat, uz manju cenu od primene 12 - pulsog pretvarača
- AHF 005 obezbeđuje vrednost THDi < 5%, što je isti ili bolji rezultat, uz manju cenu od primene 18 - pulsog pretvarača



# Aktivni filteri [14]



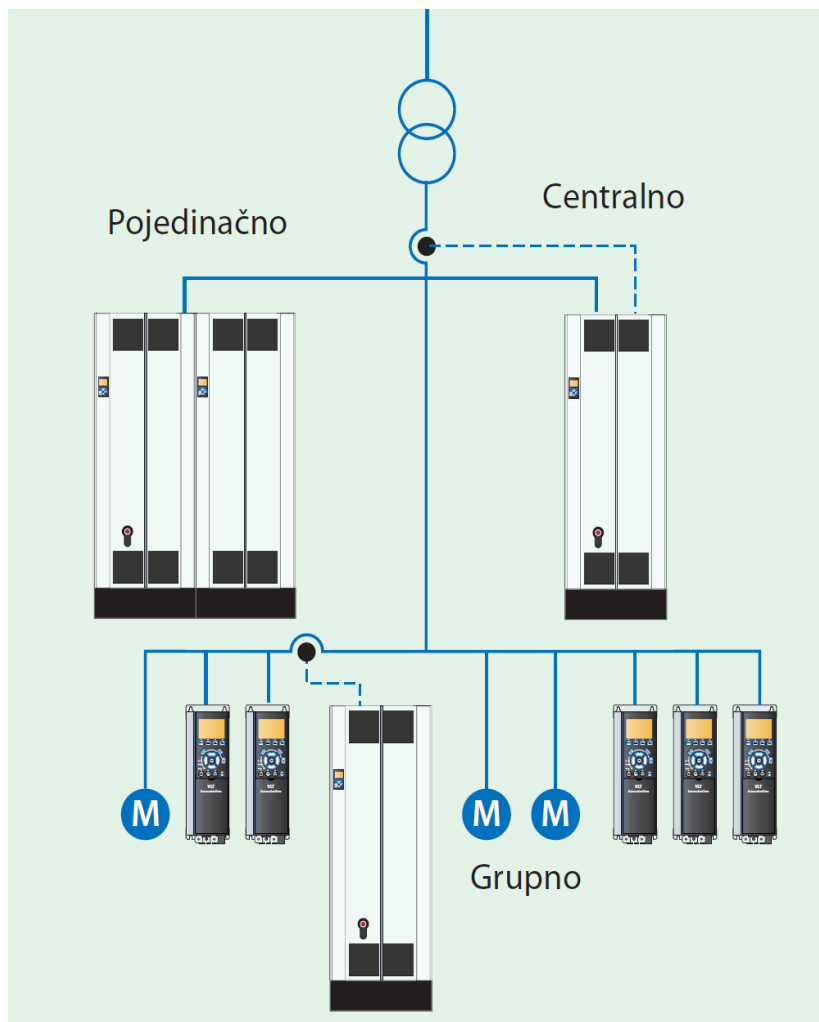
# Napredni aktivni filter (Advanced Active Filter) (Danfoss AAF 006) [15]



Uprošćeni blok dijagram načina funkcionisanja AAF filtera

- Pored smanjenja harmonijskih izobličenja aktivni filteri pružaju i:
  - ✓ dinamičku kompenzaciju reaktivne snage
  - ✓ uravnoteženje opterećenja trofazne mreže
  - ✓ smanjenje smetnji koje izazivaju flikere
  - ✓ prigušenje rezonanse mreže

- Rezultat je optimizovano korišćenje energije, veća efikasnost sistema i bolji pogonski uslovi.
- Zahvaljujući brzom vremenu odziva, prigušuju se rezonantne oscilacije i tako smanjuje verovatnoća isključenja i zaustavljanja proizvodnje.
- Filter radi sa najmanjom mogućom prekidačkom učestanošću kako bi se smanjili gubici IGBT tranzistora u pretvaraču.
- To od ugrađenog LCL filtera zahteva veći stepen filtriranja, čime se i zagrevanje prebacuje sa IGBT modula na filter koji ima veći toplotni kapacitet i bolje podnosi zagrevanje.
- Na ovaj način je osigurana visoka energetska efikasnost, posebno pri opterećenju manjem od nominalnog, i poboljšana termička osetljivost.
- Kako bi se potrošnja energije dodatno smanjila, moguće je aktivirati način rada u kojem će uređaj biti u stanju „mirovanja“ ukoliko filtriranje nije potrebno. Tada je kompenzacija isključena, ali je nadzor mreže i dalje aktivan.
- Ukoliko se uslovi promene i kompenzacija harmonika ponovno postane potrebna, filter odmah izlazi iz stanja mirovanja i gotovo istovremeno daje punu harmonijsku kompenzaciju.



## Centralna kompenzacija

Filter se ugrađuje paralelno sa opterećenjem na mestu glavnog priključka bez intervencija na postojećoj instalaciji i ceo pogon će biti kompenzovan sa jednog mesta, čak i na srednjem naponu preko transformatora.

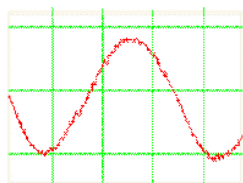
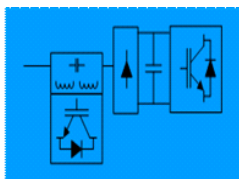
## Pojedinačna kompenzacija

Koriste se **frekventni pretvarači sa malim harmonijskim izobličenjem**, koji imaju ugrađene napredne aktivne filtere za kompenzaciju harmonika. Strujni transformatori su ugrađeni u pretvarač.

## Grupna kompenzacija

Moguća je kompenzacija odabrane grupe potrošača. Napredni aktivni filter se automatski prilagođava opterećenju i nezavisan je u odnosu na stabilnost napojne mreže.

# Frekventni pretvarač sa malim harmonijskim izobličenjem (Danfoss LHD) [1]



HARMONICI STRUJE	
Osnov.	36,0 A
THiD	<5,0%
Eff. struja	36,2 A

Talasnii oblik ulazne struje frekventnog pretvarača sa malim harmonijskim izobličenjem

- Kombinacija aktivnog filtera i standardnog frekventnog pretvarača. Projektovan je tako da ima minimalan broj komponenti u glavnom energetsom kolu.
- Povezuje se paralelno u odnosu na glavno energetska kolo pretvarača. Na taj način se postiže veća energetska efikasnost, zahvaljujući činjenici da kroz filter ne prolazi celokupna struja opterećenja, već samo deo koji je potreban da se ostvari željeni sinusni talasni oblik, ponište harmonici, popravi faktor snage ili ujednače struje po fazama u dovodnom vodu.

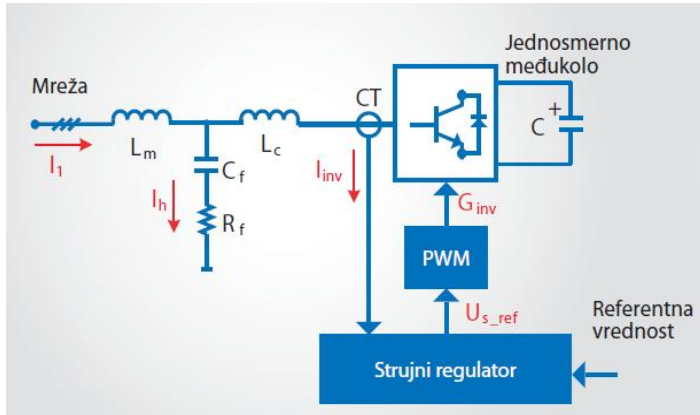
## Prednosti korišćenja frekventnog pretvarača sa malim harmonijskim izobličenjem:

- Jednostavan izbor i instalacija
- Najveća efikasnost (automatsko podešavanje prekidačke učestanosti da bi se smanjili gubici usled komutacije)
- Hlađenje kroz leđni ventilacioni kanal – smanjen prodor prašine unutar kućišta
- Pregled stanja mreže na LCP panelu
- Najbolje potiskivanje harmonika (čak i parnih harmonika)
- Najmanja osetljivost na poremećaje u napojnoj mreži
- Suzbijanje harmonika nezavisno od opterećenja pogona
- Pogon je sposoban za rad čak iako se javi smetnja na filteru
- Nema povećanja napona u jednosmernom međukolu
- Režim mirovanja ukoliko suzbijanje harmonika nije potrebno
- Usklađen sa dU/dt normativima EN 60034-17
- Pravi faktor snage > 0,98
- Ispunjava preporuke IEEE (takođe za parne harmonike)



## Dva osnovna principa upravljanja koja se koriste

- Naponski orijentisano upravljanje
- Direktno upravljanje



### Naponski orijentisano upravljanje:

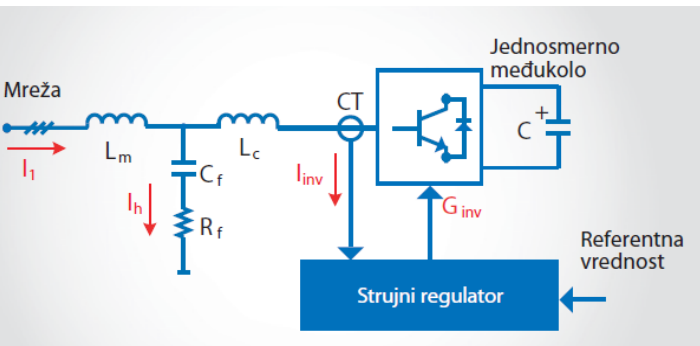
- Poznato i pod nazivom PWM upravljanje (sa hardverskom i softverskom realizacijom)
- Ostali proizvođači aktivnih filtera koriste PWM upravljanje (najčešće softversko). Različite varijante upravljanja postoje, tehnike su preuzete iz upravljanja elektromotornim pogonima.
- Prednosti: Preciznost, Malo harmonijsko izobličenje struje THDi i dobra kompenzacija pojedinih harmonika

### Direktno upravljanje:

Upravljanje prekidačima (IGBT) direktno iz strujnih regulatora

Upravljanje slično sa DTC metodom upravljanja motorom

Prednosti: Brži odziv, robusnost u slučaju brzih promena u sistemu (harmonici, flikeri, promena mrežne impedanse).



# Karakteristične aplikacije u kojima harmonijsko izobličenje zahteva procenu [16]

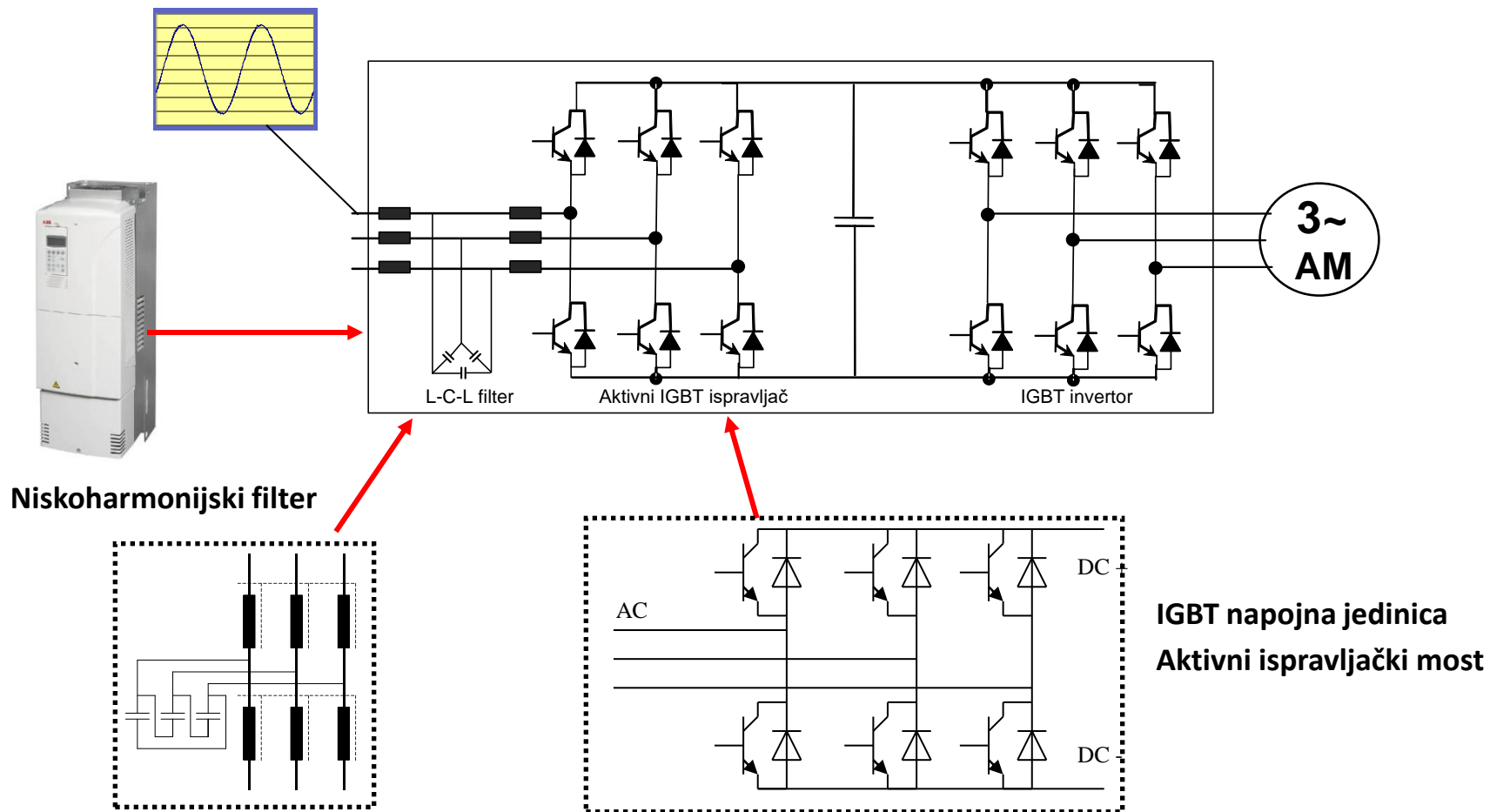
Poštovanje standarda:

Područje	Aplikacija	Dobitak
Ugovaranje specifičnih novih projekata:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Voda i otpadne vode</li> <li>- Ventilatori i kompresori</li> <li>- Industrija hrane i pića</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poštovanje normi</li> <li>- Smanjenje harmonijskih izobličenja na mreži</li> </ul>
Realizacija zahtevnih projekata/osetljivo okruženje:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Građevina</li> <li>- Nafta i gas</li> <li>- „Čiste“ prostorije</li> <li>- Aerodromi</li> <li>- Energetska postrojenja</li> <li>- Obrada otpadnih voda</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poštovanje normi</li> <li>- Smanjenje smetnji koje izazivaju flikere</li> <li>- Siguran rad postrojenja</li> <li>- Prigušenje rezonancije</li> </ul>

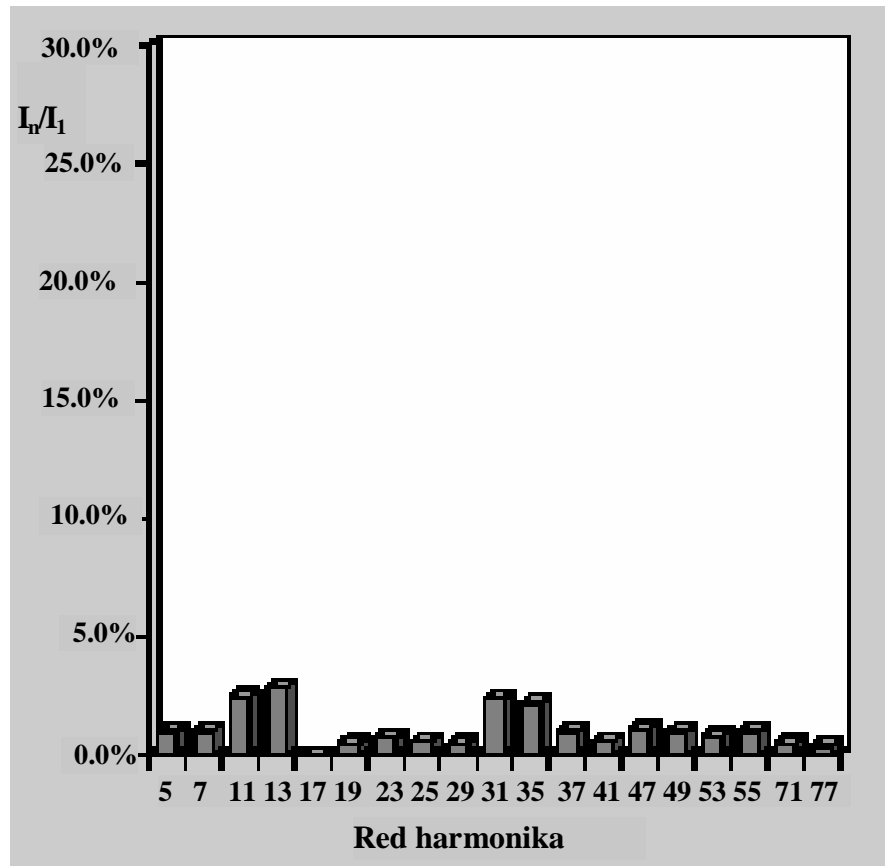
Naročito izložena područja:

Područje	Aplikacija	Dobitak
Autonomne distributivne mreže ili područja sa napajanjem iz sopstvenih generatora:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pomorske instalacije</li> <li>- pomorski sektor</li> <li>- bolnice</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dodatno osigurava kvalitet napajanja na primarnoj i sekundarnoj mreži</li> <li>- Smanjenje smetnji koje izazivaju flikere</li> <li>- izbegavanje reagovanja zaštite</li> </ul>
Nedovoljan kapacitet napojne mreže:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- područja visokog stepena razvoja</li> <li>- zemlje u razvoju</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- povećava mogućnost opterećenja transformatora</li> <li>- povećava faktor snage</li> </ul>
Udaljena područja:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- udaljena područja</li> <li>- rudnici</li> <li>- nafta i gas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- smanjuje opterećenje sistema povećanjem istinskog faktora snage</li> <li>- izbegavanje reagovanja zaštite i osiguran pouzdan rad</li> </ul>

# Novi frekventni pretvarači sa aktivnim ispravljačkim mostom i harmonijskim filterom [14]



# Viši harmonici - ispod 1%



Sadržaj viših harmonika kod aktivnog ispravljača  
(sa IGBT mostom)

## 6 Pulse

No chokes  
100 % load

Manufacturing cost 100%

Fund	5th	7th	11th	13th	17th	19th
100 %	63 %	54 %	10 %	6.1 %	6.7 %	4.8 %

With chokes  
100 % load

Manufacturing cost 120%

Fund	5th	7th	11th	13th	17th	19th
100 %	30 %	12 %	8.9 %	5.6 %	4.4 %	4.1 %

## 24 Pulse

Manufacturing cost 250%

Fund	5th	7th	11th	13th	17th	19th
100 %	4.0 %	2.7 %	1.0 %	0.7 %	1.4 %	1.4 %

## 12 Pulse

Polygon Transformer  
100 % load

Manufacturing cost 200%

Fund	5th	7th	11th	13th	17th	19th
100 %	11 %	5.8 %	6.2 %	4.7 %	1.7 %	1.4 %

## Active Rectifier

Manufacturing cost 250%

Fund	5th	7th	11th	13th	17th	19th
100 %	2.6 %	3.4 %	3.0 %	0.1 %	2.1 %	2.2 %

Double wound Transformer  
100 % load

Manufacturing cost 210%

Fund	5th	7th	11th	13th	17th	19th
100 %	3.6 %	2.6 %	7.5 %	5.2 %	1.2 %	1.3 %

Prikaz rešenja za filtriranje viših harmonijskih komponenti sa cenom proizvodnje [16]

# Literatura:

- [1] **Danfoss**, Handbook | VLT® Frequency Converters: facts Worth Knowing about Frequency Converters, 2014, [www.danfoss.rs/vlt](http://www.danfoss.rs/vlt)
- [2] Bhim Singh , Ambrish Chandra , Kamal Al-Haddad, **Power Quality: Problems and Mitigation Techniques**, , Wiley, Feb. 2015, ISBN: 978-1-118-92205-7
- [3] **The Power Electronics Handbook**, Edited by Timothy L . Skvarenina, Chapter 17. Power Quality and Utility Interface Issues  
Wayne Galli, Timothy L. Skvarenina, Badrul H. Chowdhury, Hirofumi Akagi, Rajapandian Ay anar, Amit Kumar Jain, CRC Press 2001, Print ISBN: 978-0-8493-7336-7, eBook ISBN: 978-1-4200-3706-7
- [4] S. Vukojičić, S. Pavlović, L. Ristić, **Passive, active and hybrid filters as a part of the energy efficient electrical drives curriculum**, XX International Symposium on Power Electronics - Ee 2019, pp. 1 - 6, Novi Sad, Oct, 2019.
- [5] **Načini za ublažavanje harmonika u industrijskim aplikacijama sa regulisanim elektromotornim pogonima**, Master rad, Nevena Parametić, ETF Beograd, sept. 2020.
- [6] **Control in Power Electronics**, Selected Problems, A volume in Academic Press Series in Engineering, *Edited by: Marian P. Kazmierkowski, R. Krishnan and Frede Blaabjerg*  
Chapter 12. Power Quality and Adjustable Speed Drives, STEFFAN HANSEN and PETER NIELSEN  
Danfoss Drives A/S, Grasten, Denmark, ISBN: 978-0-12-402772-5
- [7] **Aktivni redni filter**, Semestralni rad iz Energetskki efikasnih elektromotornih pogona, Miodrag Joksimović, ETF Beograd, sept. 2020.
- [8] Marko Šinik, Leposava Ristić, Milan Bebić, Saša Štatkić, Dragan Jevtić, Neša Rašić, Bogdan Brković, **Primena aktivnih ispravljača u elektromotornim pogonima visoke energetske efikasnosti**, ENEF 2017, Banja Luka, 3-4. novembar 2017. godine, pp. 69 – 76
- [9] **Razvoj algoritma za upravljanje trofaznim aktivnim ispravljačem**, Master rad, Katarina Maksić, ETF Beograd, sept. 2022.
- [10] M. Tanasić, B. Brković, M. Majstorović, L. Ristić, **Hardware-in-the-Loop Simulation of a Virtual Synchronous Motor**, XXII International Symposium on Power Electronics - Ee 2023, pp. 1 - 6, Novi Sad, Oct, 2023.

# Literatura:

- [11] J. Gluščević, Ž. Janda, J. Dragosavac, L. Ristić, **Enhancing stability of Grid-Following inverter for renewables**, XXII International Symposium on Power Electronics - Ee 2023, pp. 1 - 6, Novi Sad, Oct, 2023.
- [12] **Siemens, SINAMICS S120, Function Manual 01/2012**
- [13] **Analiza rada aktivnog ispravljača u elektromotornom pogonu sa frekventnim pretvaračem**, Master rad, Radojica Tomašević, ETF Beograd, sept. 2016
- [14] **ABB, Guide to Harmonics with AC Drives, Techniicall Guide No. 6**
- [15] **Danfoss, Pouzdano potiskivanje harmonika za vaš pogon, files.danfoss.com › download › Drives**
- [16] **Harmonic distortions & solutions, ABB S'pore, DM, Motor & Drives, PC Wong, April 12, 2010**