



Naziv
dokumenta:

**Protokol o mjeranju zagrijavanja i
harmoniškog izobličenja mrežne struje
PWM usmjerivača**

Autori:

Mr. Ante Krietić
Prof. dr. sc. Božo Terzić

Rev.

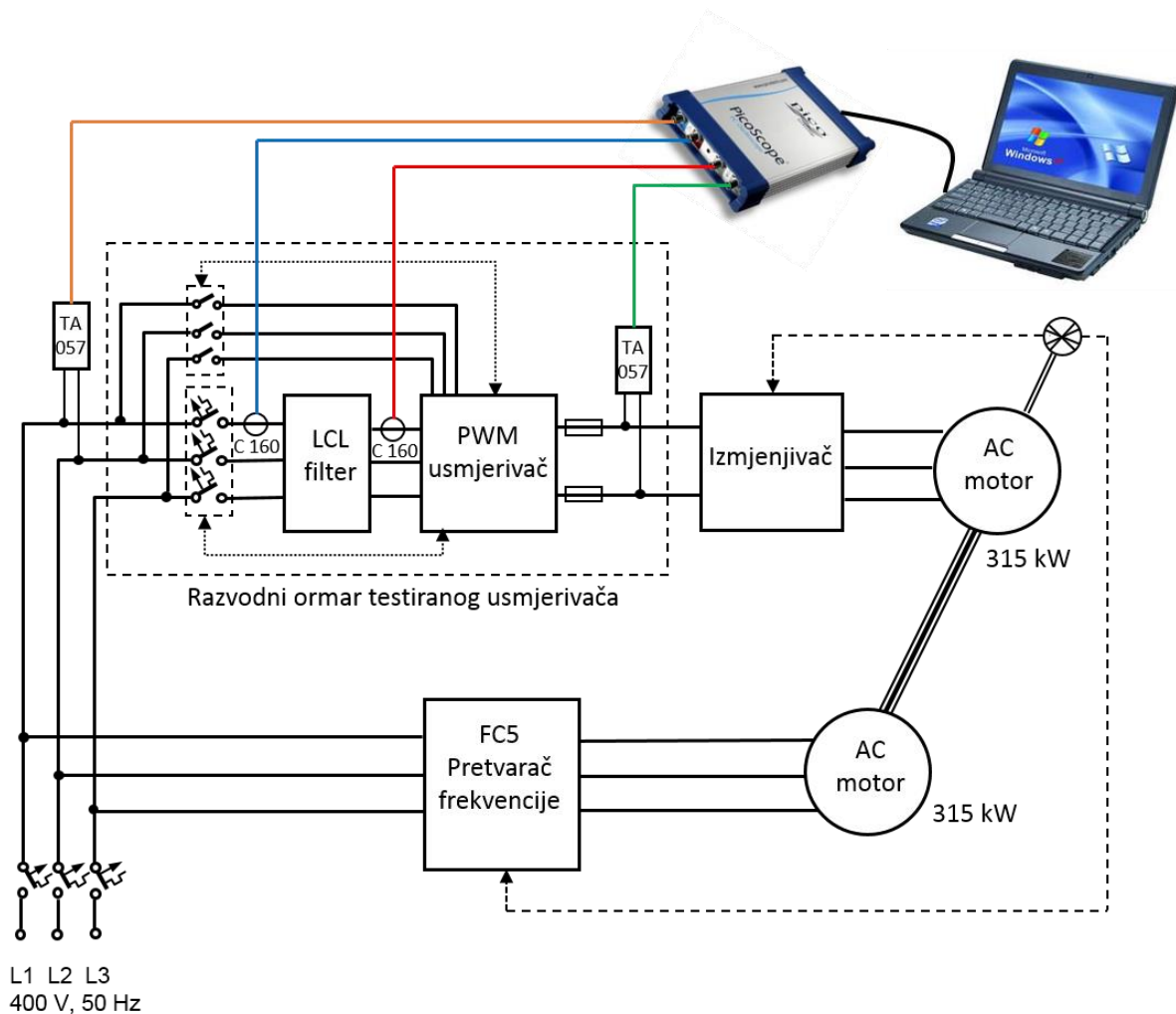
0.0

Datum:

25.01.2020.

1. Shema mjerenja

Na slici 1.1 prikazana je blokovska shema terećenja i mjerenja valnih oblika napona i struja svih testiranih PWM usmjerivača. Za terećenje radnom strujom koristi se motorska grupa snage 315 kW. U toj grupi jedan motor se napaja četverokvadratnim pretvaračem frekvencije proizvođača ABB, tip FC5, a drugi motor preko laboratorijskog izmjenjivača i testiranog PWM usmjerivača. Za podešavanje tereta, tj. radne struje PWM usmjerivača koristi se pretvarač frekvencije FC5, dok se jalova snaga podešava u testiranom usmjerivaču. Za snimanje valnih oblika napona i struja koristi se digitalni osciloskop tipa PicoScope 4424, s kojega se podaci prebacuju u laptop računalo. Za mjerenje struje mreže i struje usmjerivača koriste se strujna kliješta tipa C160, proizvođača Fluke, a za mjerenje linijskog napona mreže i istosmjernog napona usmjerivača koriste se naponske sonde tipa TA057, proizvođača PicoScope.



Sl. 1.1 Blokovska shema mjerenja

2. PWM usmjerivač snage 100 kVA s LCL filtrom tipa A

Na slici 2.1 prikazana je fotografija unutrašnjosti razvodnog ormara s oba PWM usmjerivača snage 100 kVA i pripadajućim LCL filtrima ispod njih. S usmjerivača su uklonjene prednje stranice, tako da su vidljive upravljačke jedinice i ventilatori za hlađenje IGBT mostova. Usmjerivači su istovjetni a razlikuju se samo u izvedbi i parametrima LCL filtra. Također, upravljački algoritmi i parametri su jednaki osim što se razlikuju u sklopnoj PWM frekvenciji.

Na lijevoj strani je usmjerivač sa slijedećim parametrima LCL filtra tipa A:

- Trofazna prigušnica na strani mreže $L_g = 40 \mu\text{H}/\text{fazi}$
- Kondenzatori u spoju zvijezda: $C_f = 60 \mu\text{F}/\text{fazi}$
- Trofazna prigušnica na strani pretvarača: $L_c = 120 \mu\text{H}/\text{fazi}$

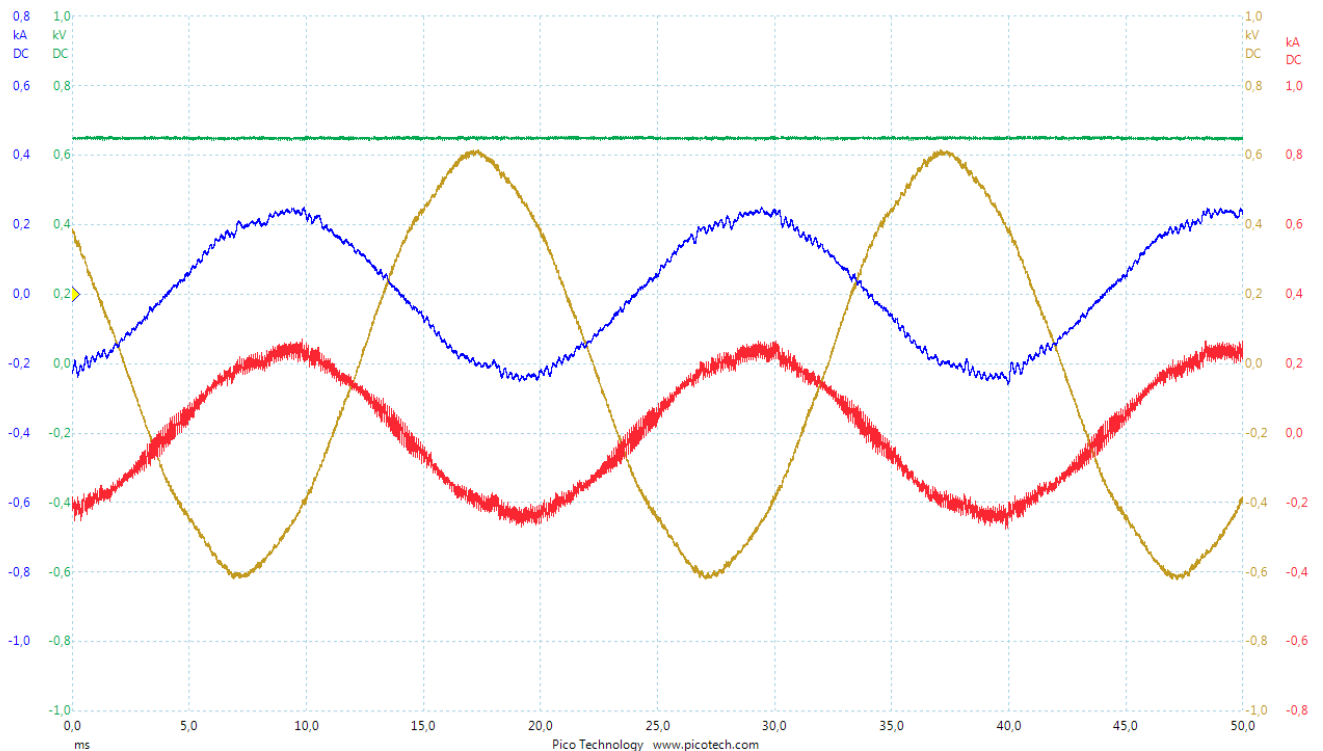


Sl. 2.1. Fotografija unutrašnjosti razvodnog ormara s oba PWM usmjerivača snage 100 kVA i pripadajućim LCL filtrima ispod njih

Sklopna PWM frekvencija IGBT sklopki usmjerivača je $f_{PWM}=12$ kHz. Specifičnost ovog LCL filtra je primjena pretvaračke prigušnice ($L_c=120$ μ H/fazi) koja ima amorfnu jezgru radi minimiziranja gubitaka uslijed visoko frekvencijskih pulzacija struje.

2.1. Valni oblici i harmoničko izobličenje struje mreže

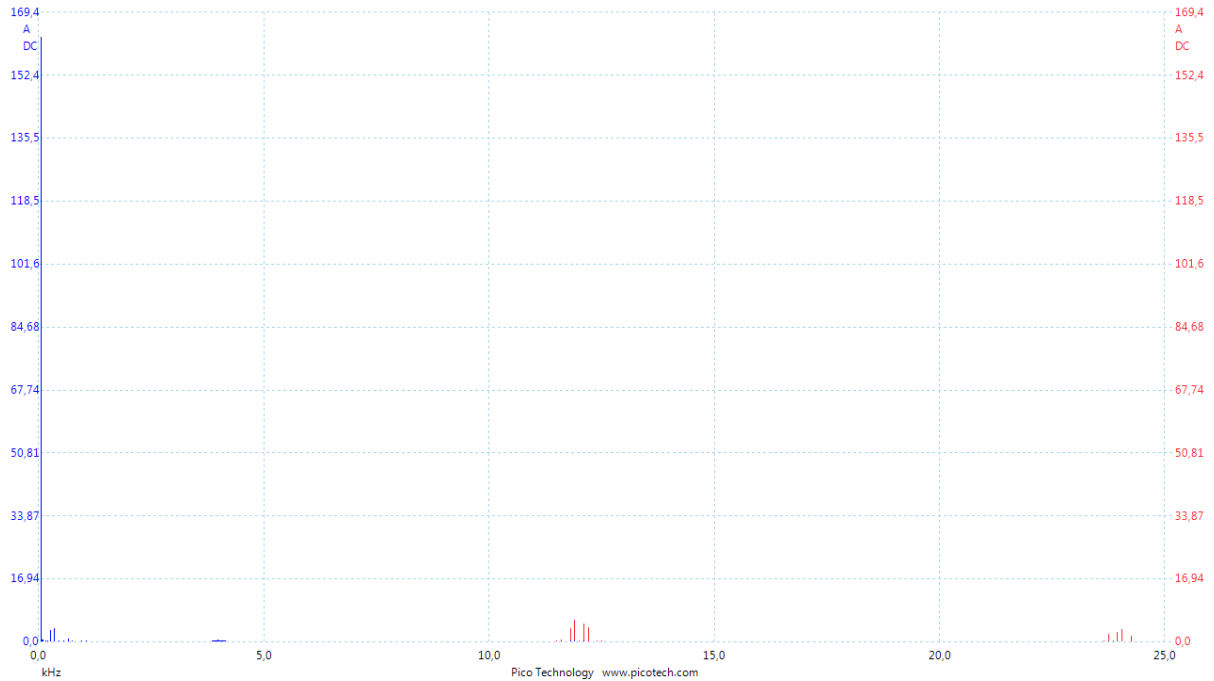
Na slici 2.2 prikazani su valni oblici struje mreže, struje usmjerivača, linijski napon mreže i istosmjerni napon usmjerivača za nazivnu struju usmjerivača i $\cos\phi=1$. Tijekom mjerenja svi mjerni signali su sadržavali visokofrekvencijski šum, pa je stoga svaki signal filtriran s niskopropusnim filterom presječne frekvencije 50 kHz, a filter je implementiran u aplikacijskom programu osciloskopa. Efektivna vrijednost mrežnog napona je 420 V, a srednja vrijednost istosmjernog napona 650 V. Radi vidljivosti valnih oblika, tijekom obrade rezultata mjerenja, struji mreže (plavo) je dodana pozitivna istosmjerna vrijednost od +200 A, a struji usmjerivača (crveno) negativna vrijednost od -200A. Analizom valnih oblika obiju struja vidljive su visokofrekvencijske pulzacije u struji usmjerivača. Frekvencija tih pulzacija određena je PWM frekvencijom sklapanja IGBT mosta koja u ovom slučaju iznosi 12 kHz.



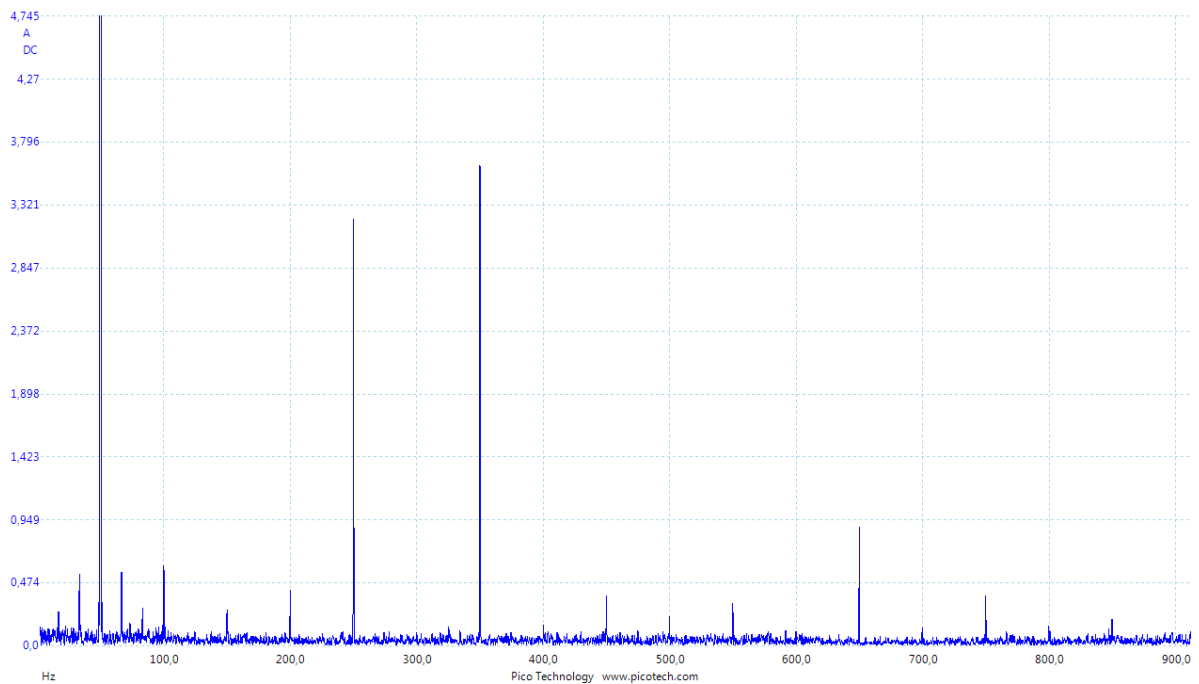
Sl. 2.2 Valni oblici linijskog napona mreže (oker), struje mreže (plavo), struje usmjerivača (crveno) i istosmjernog napona usmjerivača (zeleno) pri nazivnoj struji usmjerivača (160 A) i $\cos\phi=1$

Za procjenu harmoničkog izobličenja mrežne struje koristi se harmonička analiza primjenom FFT algoritama koji su implementirani u aplikacijskom programu osciloskopa. Na slici 2.3 prikazan je frekvencijski spektar harmonika struje mreže i struje pretvarača u frekvencijskom području od 0-25 kHz. Prvi harmonik obje struje iznosi 162 A, a značajniji viši harmonici (oko 5 A u struji pretvarača) pojavljuju se u okolišu PWM frekvencije (12 kHz) i njezinih višekratnika. Na slici 2.4 prikazan je frekvencijski spektar mrežne struje u području 0-900 Hz, a u tablici 1 su za to frekvencijsko područje prikazani svi harmonici u apsolutnom i postotnom iznosu u odnosu na 1. harmonik, te ukupni faktor harmoničkog izobličenja mrežne struje koji iznosi $THD_i=3.34\%$. Razmatrano i prikazano frekvencijsko područje u tablici 1 odabrano je na temelju odgovarajućih preporuka i standarda (IEC-61000-3-4, IEEE-

519). Dobiveni rezultati za pojedine harmonike, kao i za ukupni THDi su znatno unutar dopuštenih granica.



Sl. 2.3. Frekvencijski spektar harmonika mrežne struje (plavo) i struje usmjerivača (crveno) u području 0-25 kHz



Sl. 2.4. Frekvencijski spektar harmonika mrežne struje u frekvencijskom području od 0-900 Hz
Napomena: Osnovni harmonik na frekvenciji 50 Hz je „odrezan“ da bi bili vidljiviji iznosi ostalih harmonika

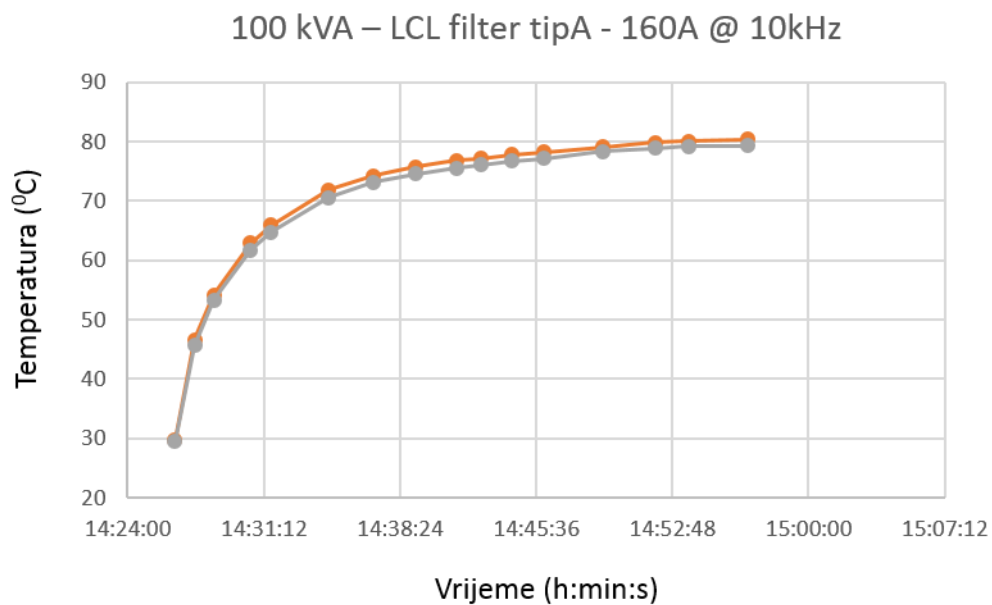
Tablica 1. Apsolutni i postotni iznosi harmonika struje mreže reda 1-50, te faktor ukupnog harmoničkog izobličenja (THD_i)

Red harmonika	Frekvencija (Hz)	Iznos harmonika (A)	Iznos harmonika % (100·I/In)
1	50	162	100%
2	100	0.64	0.4%
3	150	0.26	0.16%
4	200	0.41	0.25%
5	250	3.2	1.97%
6	300	< 0.1	< 0.1%
7	350	3.6	2.22%
8	400	< 0.1	< 0.1%
9	450	0.38	0.23%
10	500	0.22	0.13%
11	550	0.3	0.18%
12	600	< 0.1	< 0.1%
13	650	0.92	0.57%
14	700	< 0.1	< 0.1%
15	750	0.38	0.23%
16	800	< 0.1	< 0.1%
17	850	0.22	0.13%
18	900	< 0.1	< 0.1%
19	950	0.25	0.15%
20-50	1000-2500	< 0.1	< 0.1%
THD_i = 3.34%			

2.2. Zagrijavanje IGBT mostova i LCL filtra

Mjerenje temperature IGBT mosta izvedeno je pomoću 2 temperaturna senzora koja su ugrađena u hladnjak na 2 mjesta između IGBT modula. Na slici 2.5 prikazana je promjena temperature nakon trenutnog opterećenja usmjerivača s nazivnom strujom. Mjerenja su napravljena pri sklopnoj frekvenciji IGBT mosta od $f_{PWM}=10$ kHz. Pokus sa sklopnom frekvencijom od 12 kHz nije prikazan jer je temperatura prešla 80°C nakon 10 minuta terećenja, pa je proradila nadtemperaturna zaštita koja je bila postavljena na temperaturu od 80°C. To je očekivano jer je porast temperature proporcionalan gubicima u kojima su značajni sklopni gubici koji su proporcionalni sa sklopnom frekvencijom.

Na slici 2.6 prikazana je termografska slika dijela LCL filtra koji obuhvaća pretvaračku prigušnicu. Sa slike se može zaključiti da nijedna temperatura ne prelazi 63°C. Premda prigušnice imaju veću toplinsku konstantu od usmjerivača, što znači da nakon 30 minuta nisu postigle stacionarnu temperaturu, ovaj rezultat sugerira da se u stacionarnom stanju prigušnice neće pregrijati.



Sl. 2.5 Promjena temperature hladnjaka IGBT mosta usmjerivača tijekom opterećenja nazivnom strujom, uz sklopnu frekvenciju od 10 kHz



Sl. 2.6 Termografska slika dijela LCL filtera koji obuhvaća pretvaračku prigušnicu

3. PWM usmjerivač snage 100 kVA s LCL filtrom tipa B

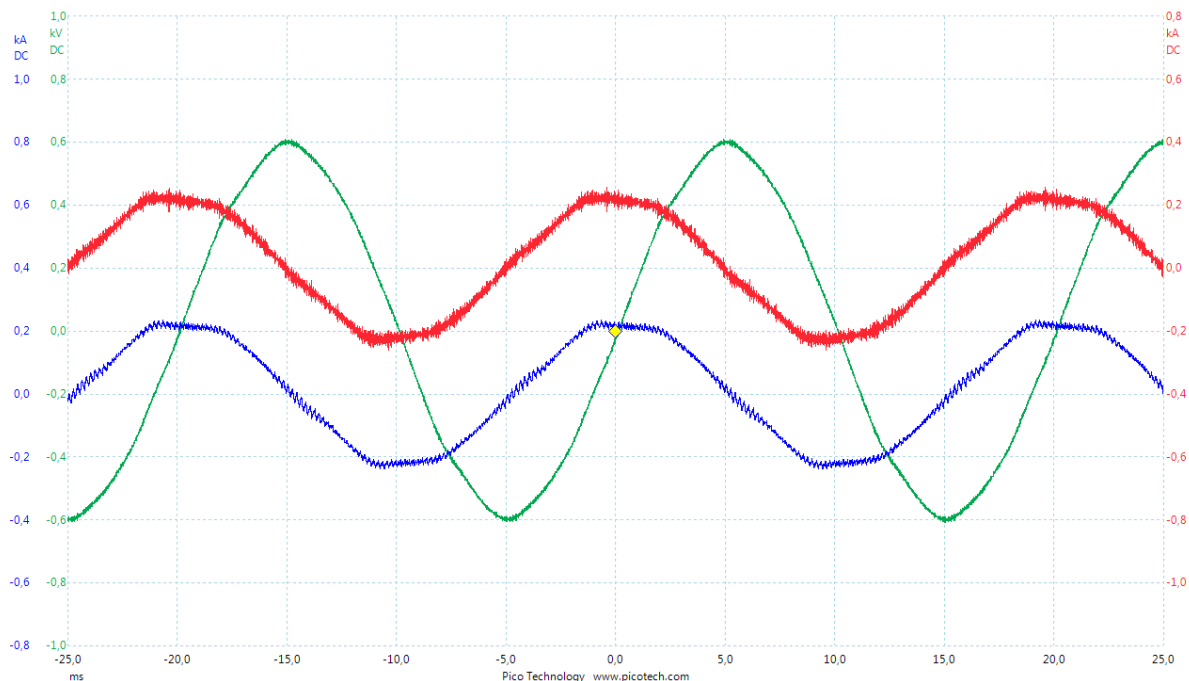
3.1. Valni oblici i harmoničko izobličenje struje mreže

LCL filtar B je prikazan u okviru slike 2.1, na desnoj strani razvodnog ormara ispod PWM usmjerivača snage 100 kVA. Usmjerivač je hardverski i softverski istovjetan prethodno testiranom usmjerivaču. Jedina je razlika u sklopnoj PWM frekvenciji, koja za ovaj usmjerivač iznosi $f_{\text{PWM}}=5$ kHz. Parametri LCL filtra tipa B su:

- Trofazna prigušnica na strani mreže $L_g = 170 \mu\text{H}/\text{fazi}$
- Kondenzatori u spoju zvijezda: $C_f = 200 \mu\text{F}/\text{fazi}$
- Trofazna prigušnica na strani pretvarača: $L_c = 550 \mu\text{H}/\text{fazi}$

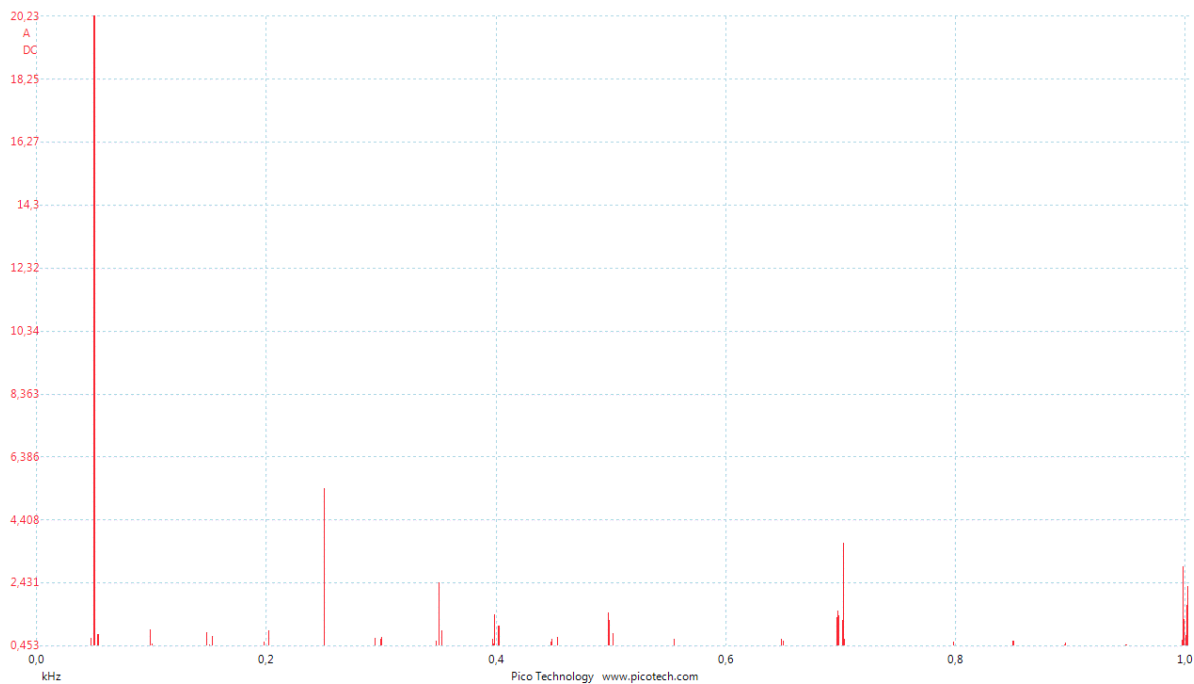
Usporedbom ovih parametara s LCL filtrom tipa A, vidljivo je da su u filtru tipa B induktiviteti prigušnica veći za više od 4 puta, a kapacitet kondenzatora za više od 3 puta. Također jezgre prigušnica su napravljene od klasičnog materijala za magnetske jezgre, te stoga prigušnice nisu dimenzionirane za rad na višim sklopnim frekvencijama.

Na slici 3.1 prikazani su valni oblici struje mreže, struje usmjerivača i linijski napon za nazivnu struju usmjerivača i $\cos\phi=1$. Premda su snimljeni valni oblici filtrirani s niskopropusnim filterom presječne frekvencije 50 kHz, u struji mreže se pojavljuju visokofrekvencijske pulzacije značajno većeg iznosa nego što su izmjerene kod usmjerivača s LCL filtrom tipa A (plava krivulja na slici 2.2). Te oscilacije nisu očekivane, a njihov uzrok za sada nije utvrđen te će biti analiziran u budućim istraživanjima. Budući se te oscilacije pojavljuju u frekvenzijskom području većem od 10 kHz, sa stanovišta njihova utjecaja na mrežu i zadovoljavanja odgovarajućih standarda koji su definirani za harmonike do 50-tog reda (2500 Hz), može se reći da ove oscilacije nisu utjecajne.



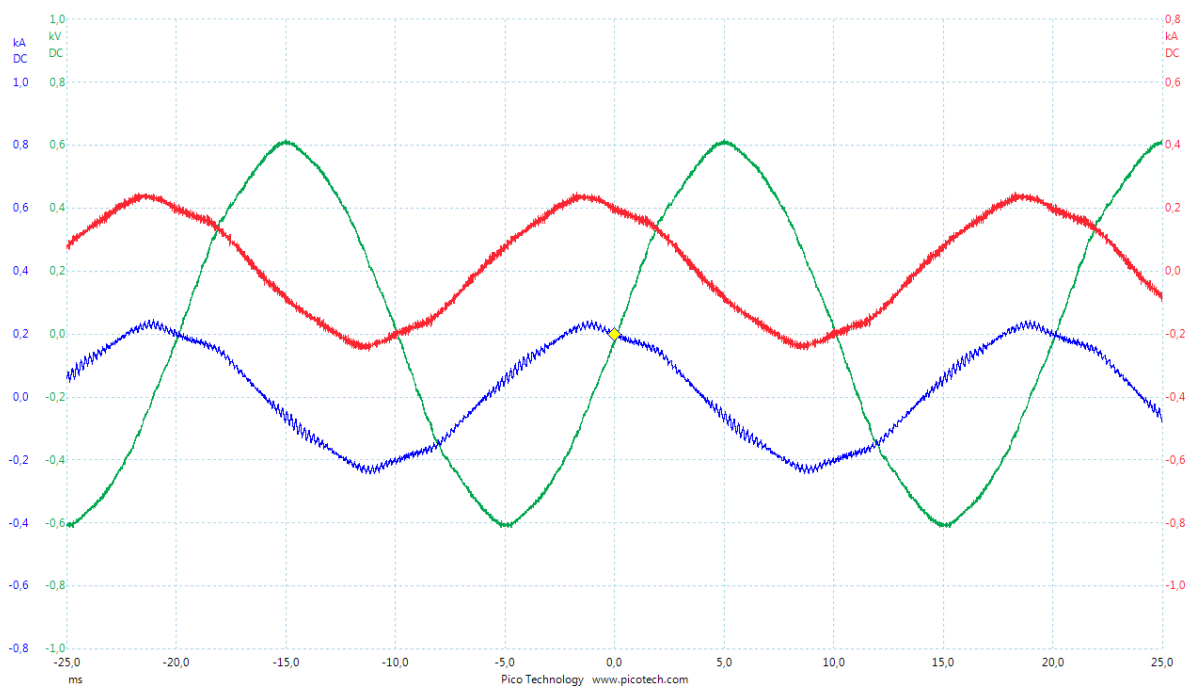
Sl. 3.1 Valni oblici linijskog napona mreže (zeleno), struje mreže (crveno) i struje usmjerivača (plavo) s LCL filtrom tipa B pri nazivnoj struji usmjerivača (160 A) i $\cos\phi=1$

Sa stanovišta kvalitete mrežne struje prema standardima analizirat će se harmonijski sastav struje mreže u frekvencijskom području od 0-1000 Hz, koji je prikazan na sliciIznos prvog harmonika je 145 A, a od nižih harmonika dominantan je 5. harmonik koji ima vrijednost od 5.3 A, tj. 3.7%, što je značajno više nego kod usmjerivača s LCL filtrom tipa A (1.97% - tablica 1). THDi u struji mreže iznosi THDi=6.1%, što je očekivano značajno lošije u odnosu na prethodni usmjerivač (3.34% - tablica1). Uzroci većeg harmoničkog izobličenja struje mreže u odnosu na usmjerivač s LCL filterom tipa A i većom PWM frekvencijom bit će naknadno analizirani.

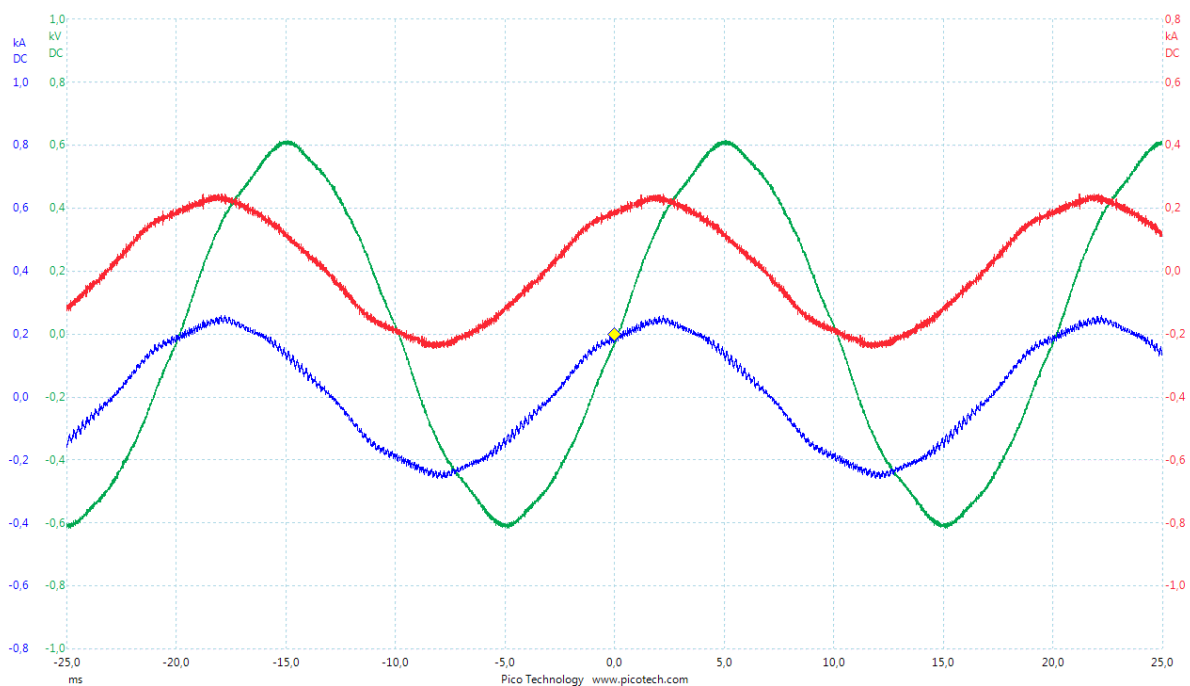


Sl.3.2. Frekvencijski spektar harmonika mrežne struje u frekvencijskom području od 0-1000 Hz
Napomena: Osnovni harmonik na frekvenciji 50 Hz je „odrezan“ da bi bili vidljiviji iznosi ostalih harmonika

Na slijedećim slikama prikazani su valni oblici struje mreže, struje usmjerivača i linijski napon za nazivnu struju usmjerivača i $\cos\varphi = 0.9$ cap. (slika 3.3), te $\cos\varphi = 0.9$ ind. (slika 3.4). Induktivni i kapacitivni fazni pomak primjetan je usporedbom faznog pomaka između struje i referentnog linijskog napona. Usporedbom sa slikom 3.1, može se zaključiti da su visokofrekvencijske pulzacije u mrežnoj struji u oba slučaja manje u odnosu na slučaj s $\cos\varphi = 1$ (slika 3.1). Također, i harmonička izobličenja zbog pojave nižih harmonika su nešto manja, što se onda ogleda i u manjem faktoru THD, koji za kapacitivno opterećenje iznosi THDi=5.3%, a za induktivno THDi=4.6%.



Sl. 3.3 Valni oblici linijskog napona mreže (zeleno), struje mreže (crveno) i struje usmjerivača (plavo) s LCL filterom tipa B pri nazivnoj struji usmjerivača (160 A) i $\cos\phi=0.9$ cap.

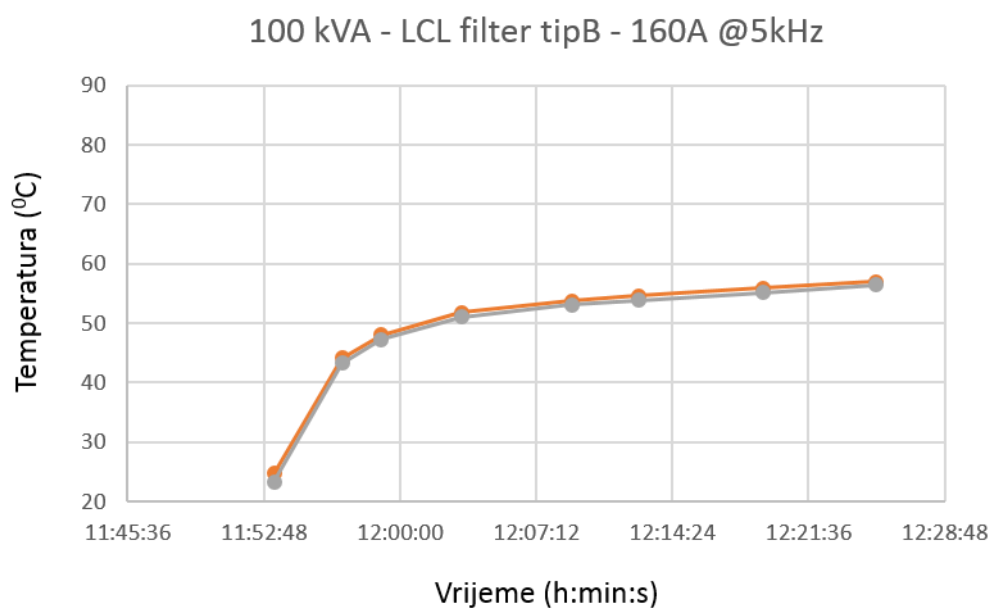


Sl. 3.4 Valni oblici linijskog napona mreže (zeleno), struje mreže (crveno) i struje usmjerivača (plavo) s LCL filterom tipa B pri nazivnoj struji usmjerivača (160 A) i $\cos\phi=0.9$ ind

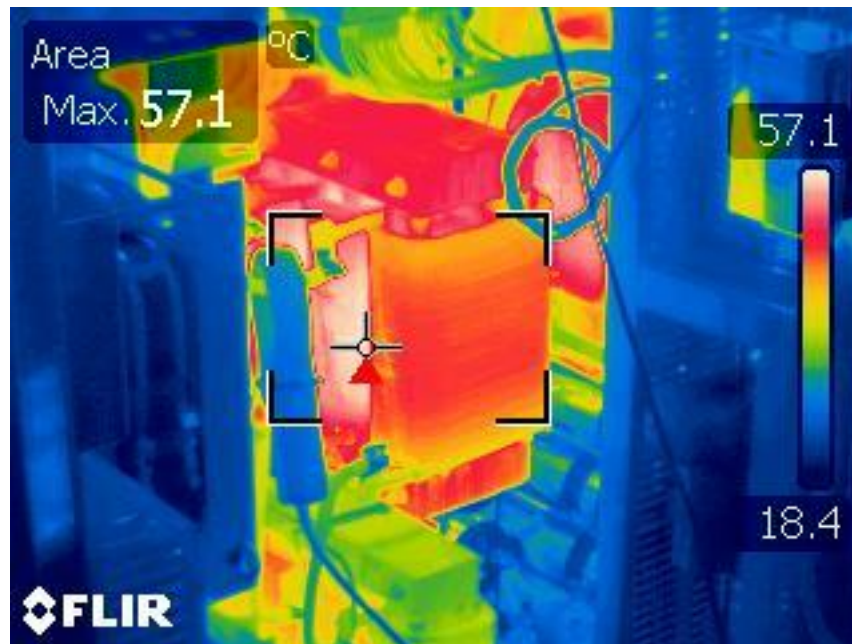
3.2. Zagrijavanje IGBT mostova i LCL filtra

Mjerenje temperature IGBT mosta izvedeno je pomoću 2 temperaturna senzora koja su ugrađena u hladnjak na 2 mjesta između IGBT modula. Na slici 3.5 prikazana je promjena temperature nakon trenutnog opterećenja usmjerivača s nazivnom strujom. Mjerenja su napravljena pri sklopnoj frekvenciji IGBT mosta od $f_{PWM} = 5$ kHz. U odnosu na zagrijavanje usmjerivača koji je radio sa sklopnom frekvencijom 10 kHz (slika 2.5), stacionarna temperatura je značajno manja (oko 58°C), što je i očekivano.

Na slici 3.6 prikazana je termografska slika dijela LCL filtra. Sa slike se može zaključiti da nijedna temperatura ne prelazi 57°C . Premda prigušnice imaju veću toplinsku konstantu od usmjerivača, što znači da nakon 30 minuta nisu postigle stacionarnu temperaturu, ovaj rezultat sugerira da se u stacionarnom stanju prigušnice neće pregrijati.



Sl. 3.5 Promjena temperature hladnjaka IGBT mosta usmjerivača tijekom opterećenja nazivnom strujom, uz sklopnu frekvenciju od 5 kHz



Sl. 3.6 Termografska slika dijela LCL filtera koji obuhvaća pretvaračku prigušnicu

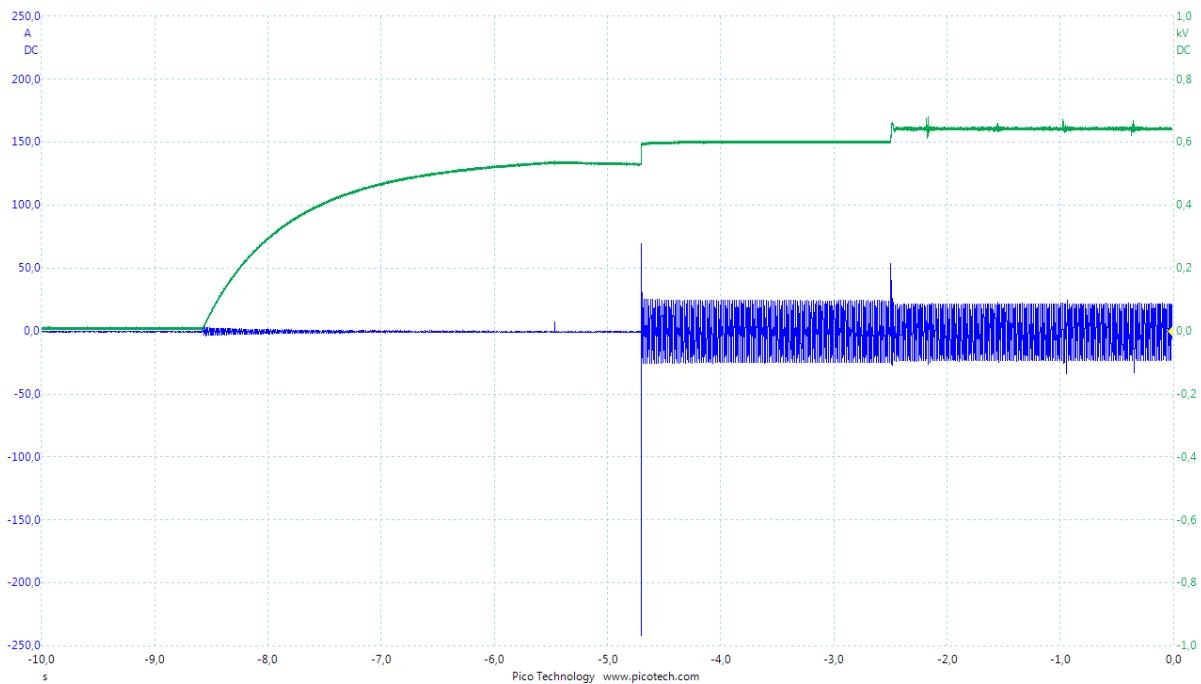
3.3. Punjenje kondenzatora u istosmjernom krugu usmjerivača

Na istosmjernoj strani usmjerivača snage 100 kVA, tj. istosmjernoj strani trofaznog IGBT mosta, ugrađena su 4 elektrolitska kondenzatora kapaciteta 4.7 mF i maksimalnog napona 400 V. Budući se napon istosmjernog kruga treba moći mijenjati u granicama od 600-750 Vdc, četiri kondenzatora su spojena u serijsko paralelnu kombinaciju na način da su po dva paralelna kondenzatora spojena u serijski spoj. Na taj se način postiže ukupni kapacitet u istosmjernom krugu od 4.7 mF i maksimalna naponska razina od 800 Vdc. Paralelno kondenzatorima spojena su dva otpornika od 20 k Ω čime je osigurana ravnomjerna raspodjela ukupnog napona na 2 serijski spojena kondenzatora.

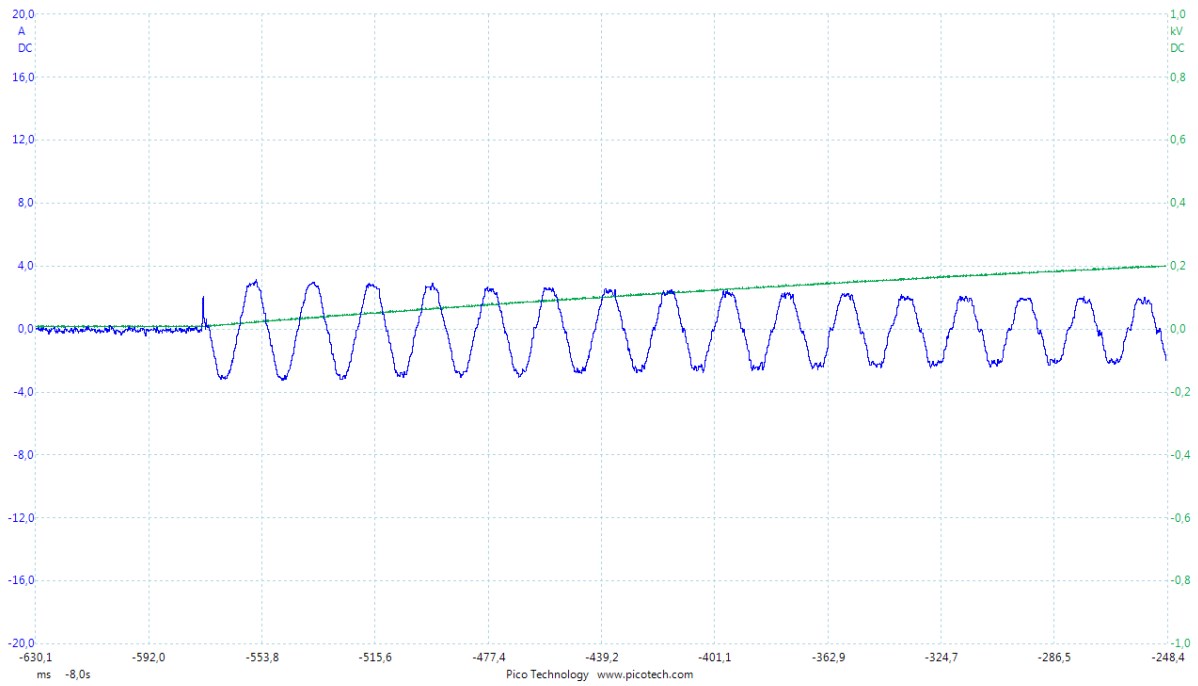
Punjenje kondenzatora odvija se preko pomoćnog trofaznog kruga sa sklopnikom koji premošćuju prekidač i LCL filter (slika 1). Nakon sklopnika u krugu za punjenje se nalaze 3 otpornika (po jedan u svakoj fazi s otporom od 100 Ω) i trofazni diodni most. Istosmjerne stezaljke diodnog mosta se spajaju na istosmjerni krug usmjerivača preko kojega se pune kondenzatori. Na taj se način omogućuje uključanje prekidača prije LCL filtra bez velikih udaraca struje. Proces uključanja usmjerivača odvija se u tri koraka:

1. Uključenje sklopnika i punjenje kondenzatora do vrijednosti maksimalnog linijskog napona mreže
2. Isključenje sklopnika i nakon toga uključanje glavnog prekidača, čime se preko dioda glavnog IGBT mosta ponovno dopunjuju kondenzatori na vrijednost maksimalnog linijskog napona mreže
3. Uključenje modulacije i regulacijskih krugova usmjerivača čime se istosmjerni krug dovodi na veći unaprijed definirani istosmjerni napon.

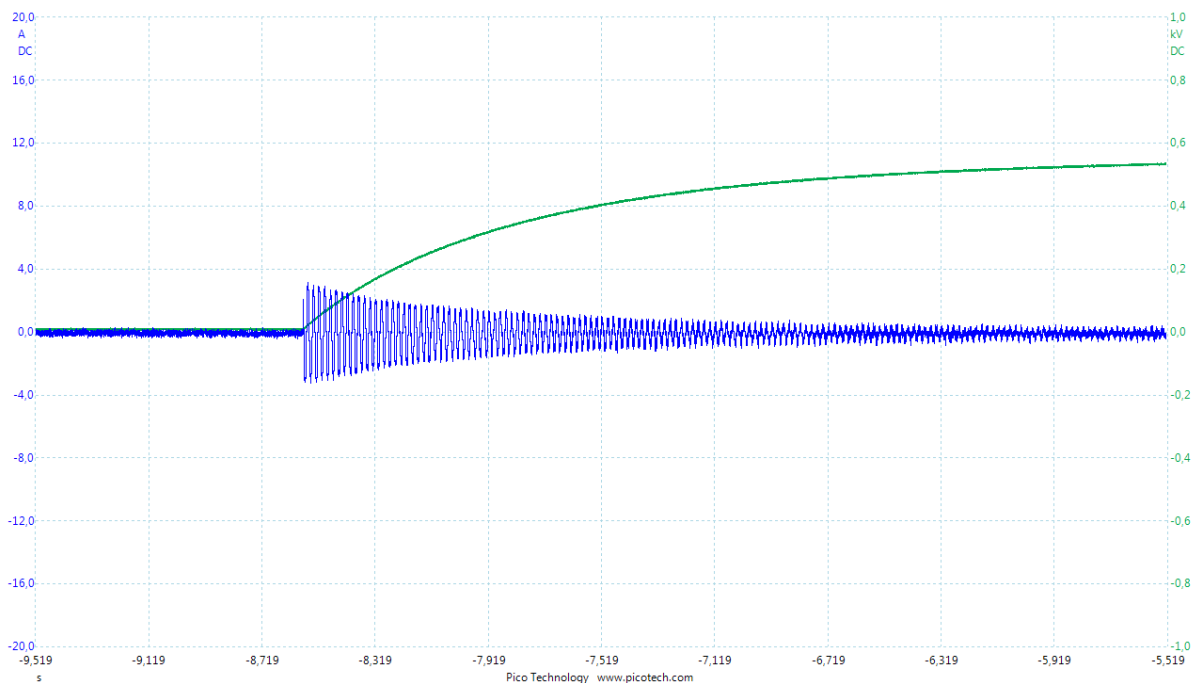
Na slikama 3.7. do 3.11. prikazani su napon istosmjernog kruga i mrežna struja jedne faze pri nekoliko sekvenci punjenja kondenzatora i početka rada usmjerivača. Na slici 3.7 prikazana je cijela sekvenca uključivanja PWM usmjerivača. Sa slike 3.10 vidi se da se u trenutku uključivanja prekidača u struji mreže pojavljuje strujni impuls iznosa oko 245 A, dok je u trenutku uključivanja modulacije i povećanja napona na vrijednost od približno 630 V porast struje minimalan (slika 3.11). Proces punjenja kondenzatora traje oko 3.5 sekunda, dok cijela sekvenca uključivanja traje oko 6 sekundi.



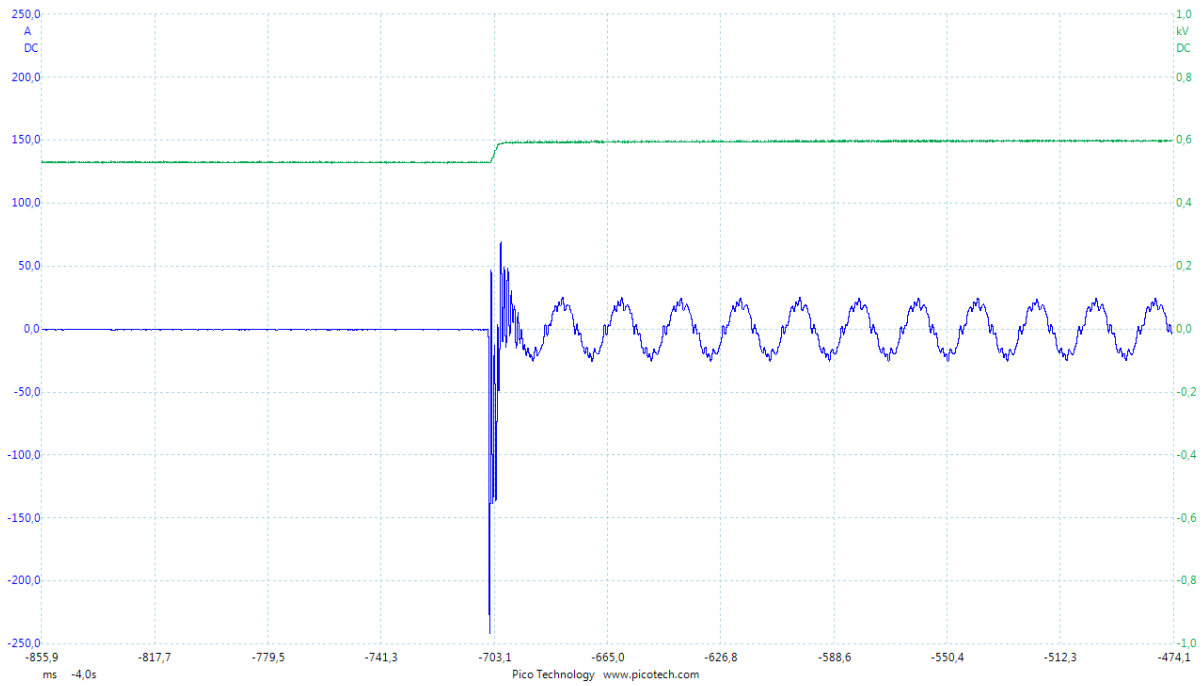
Sl. 3.7 Napon istosmjernog kruga usmjerivača (zeleno) i struja mreže jedne faze (plavo) tijekom cijele sekvence uključivanja PWM usmjerivača



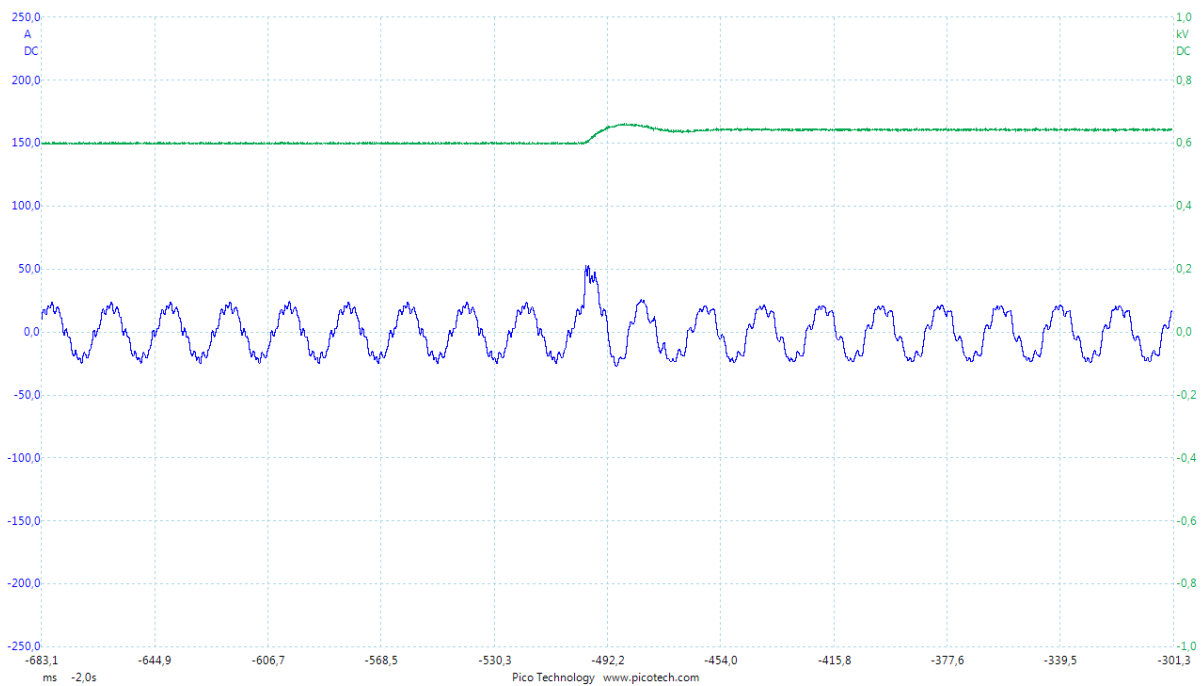
Sl. 3.8 Napon istosmjernog kruga usmjerivača (zeleno) i struja mreže jedne faze (plavo) tijekom početka punjenja kondenzatora u istosmjernom krugu



Sl.3.9 Napon istosmjernog kruga usmjerivača (zeleno) i struja mreže jedne faze (plavo) tijekom cijelog intervala punjenja kondenzatora u istosmjernom krugu



Sl. 3.10 Napon istosmjernog kruga usmjerivača (zeleno) i struja mreže jedne faze (plavo) prije i poslije uključivanja glavnog prekidača usmjerivača

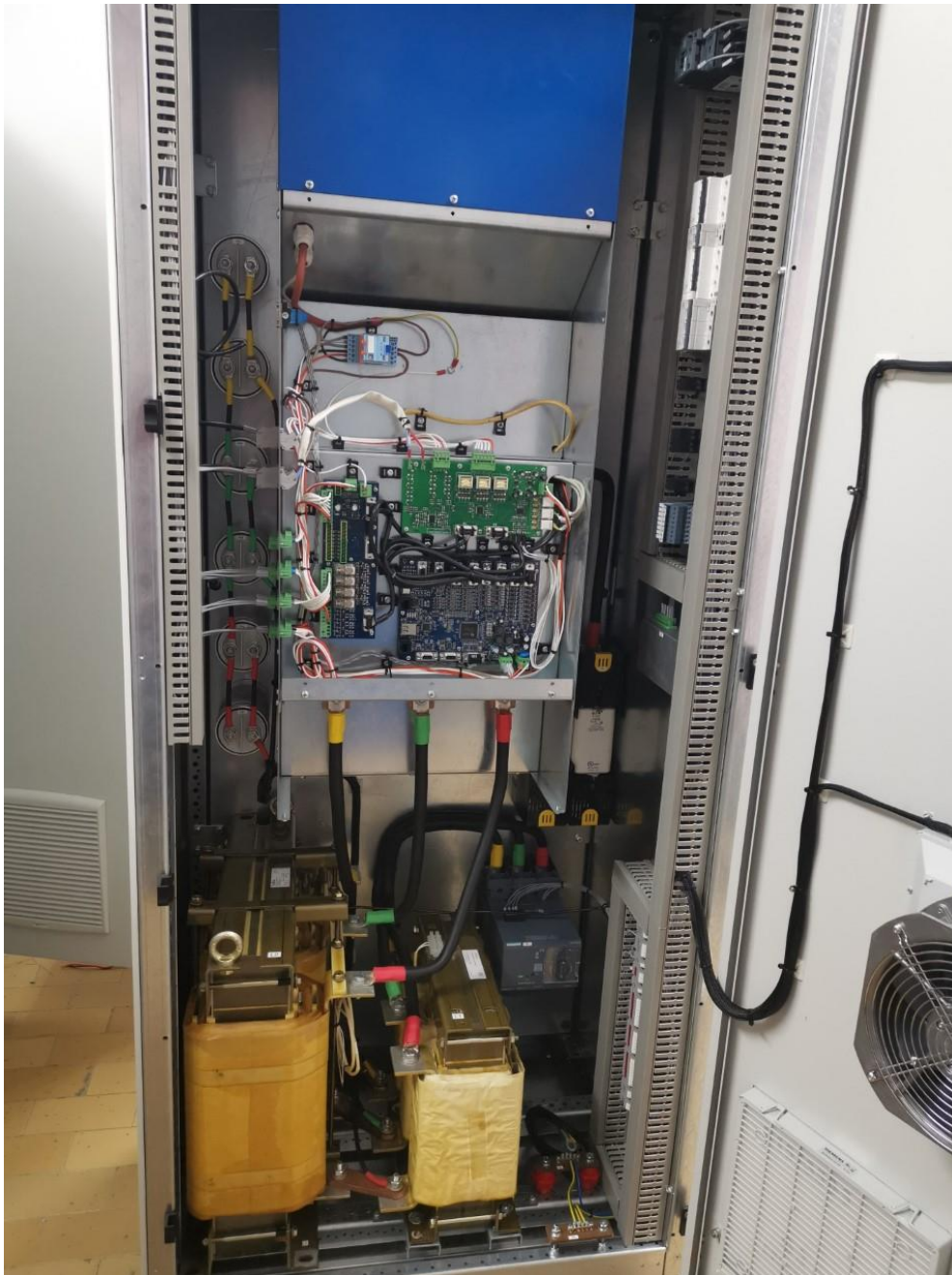


Sl.3.11 .Napon istosmjernog kruga usmjerivača (zeleno) i struja mreže jedne faze (plavo) prije i nakon početka modulacije usmjerivača

4. PWM usmjerivač snage 300 kVA

Na slici 4.1 prikazana je fotografija unutrašnjosti razvodnog ormara u kojem je smješten PWM usmjerivač. Ispod usmjerivača nalaze se prigušnice LCL filtera, a na lijevoj strani i kondenzatori LCL filtra. Osnovni parametri LCL filtra su:

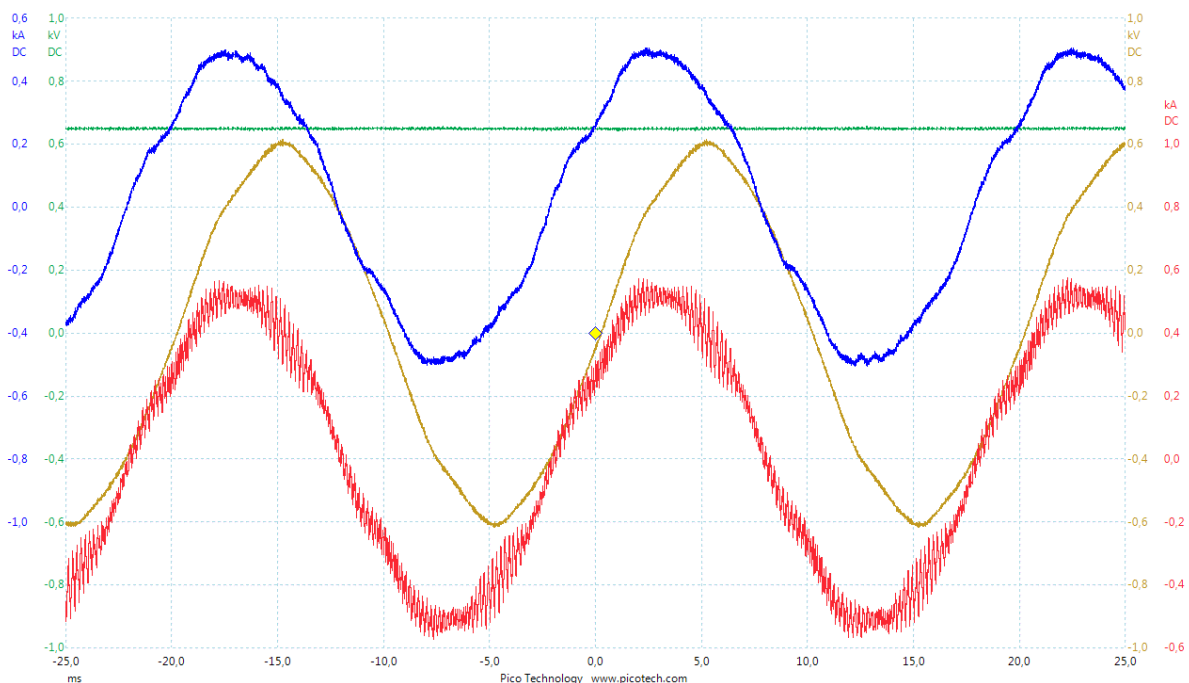
- Trofazna prigušnica na strani mreže $L_g = 100 \mu\text{H/fazi}$
- Kondenzatori u spoju zvijezda: $C_f = 400 \mu\text{F/fazi}$
- Trofazna prigušnica na strani pretvarača: $L_c = 40 \mu\text{H/fazi}$



Sl. 4.1 Unutrašnjost razvodnog ormara s usmjerivačem snage 300 kVA

4.1. Valni oblici i harmoničko izobličenje struje mreže

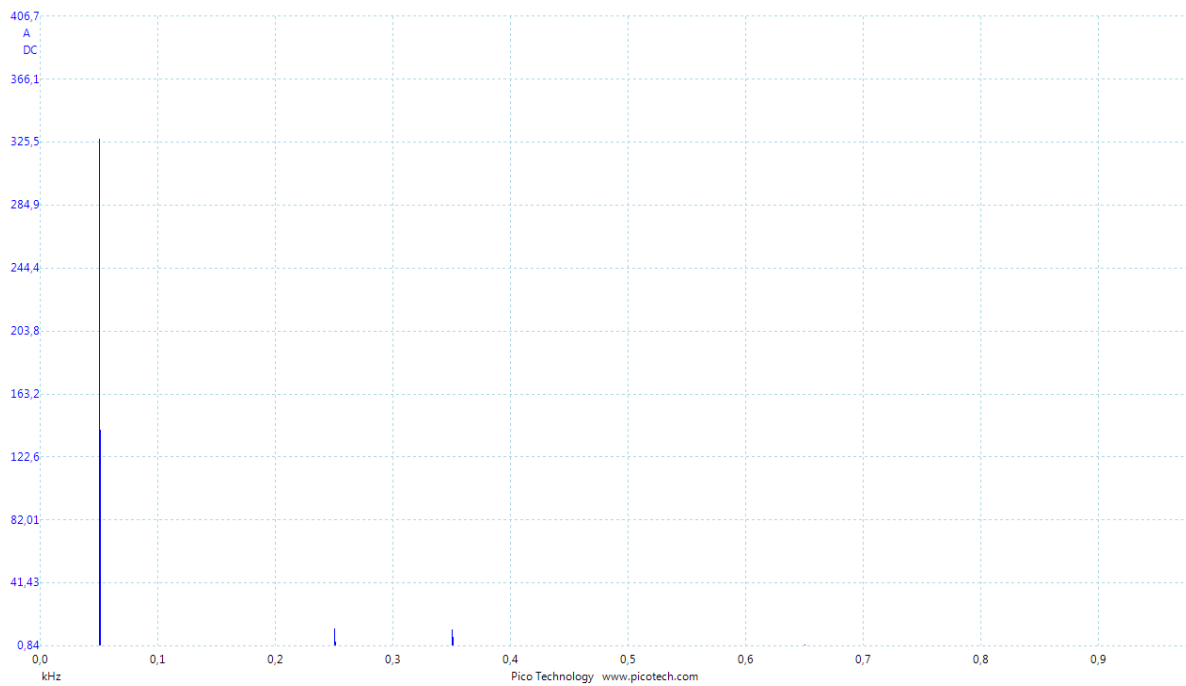
Na slici 4.2 prikazani su valni oblici struje mreže, struje usmjerivača, linijski napon mreže i istosmjerni napon usmjerivača za struju usmjerivača od 360 A i $\cos\varphi=0.9$. Treba naglasiti da ova testiranja nisu provedena s nazivnom strujom usmjerivača (450 A) iz razloga što se u trenutku testiranja nije mogla osigurati nazivna struja usmjerivača, zbog nekih ograničenja u laboratorijskoj maketi. Tijekom mjerenja svi mjerni signali su sadržavali visokofrekvencijski šum, pa je stoga svaki signal filtriran s niskopropusnim filterom presječne frekvencije 50 kHz, a filter je implementiran u aplikacijskom programu osciloskopa. Efektivna vrijednost mrežnog napona je 420 V, a srednja vrijednost istosmjernog napona 650 V. U struji usmjerivača vidljive su visokofrekvencijske pulzacije, a frekvencija tih pulzacija određena je PWM frekvencijom sklapanja IGBT mosta koja u ovom slučaju iznosi 5 kHz.



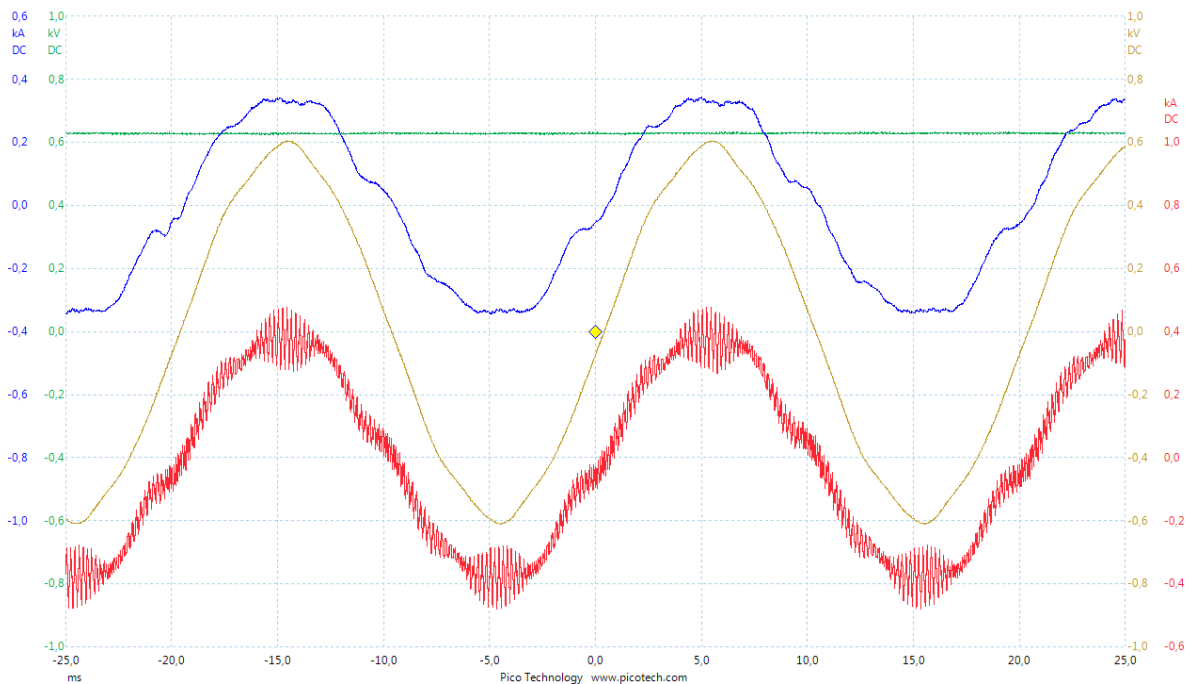
Sli. 4.2. Valni oblici linijskog napona mreže (oker), struje mreže (plavo), struje usmjerivača (crveno) i istosmjernog napona usmjerivača (zeleno) pri mrežnoj struji usmjerivača od 360 A i $\cos\varphi=0.9$.

Na slici 4.3 prikazan je harmonijski spektar struje mreže za niskofrekvencijske harmonike (0-900 Hz) pri struji osnovnog harmonika od 320 A. Sa slike se od viših harmonika može primjetiti da se praktički jedino pojavljuju 5. i 7. harmonik, koji u odnosu na osnovni imaju vrijednost 3.75% (5. harmonik), odnosno 3.56% (7. harmonik). Ukupni faktor harmoničkog izobličenja je $THDi = 5.2\%$. Pri ocjeni ovih pokazatelja harmoničkog izobličenja treba imati u vidu da mjerenja nisu provedena s nazivnom strujom već približno s 70% nazivne vrijednosti. Budući se iznos viših harmonika praktički ne mijenja s porastom osnovnog harmonika, može se procijeniti da bi postotni iznos viših harmonika i THD-a bio značajno manji od izmjenjenog.

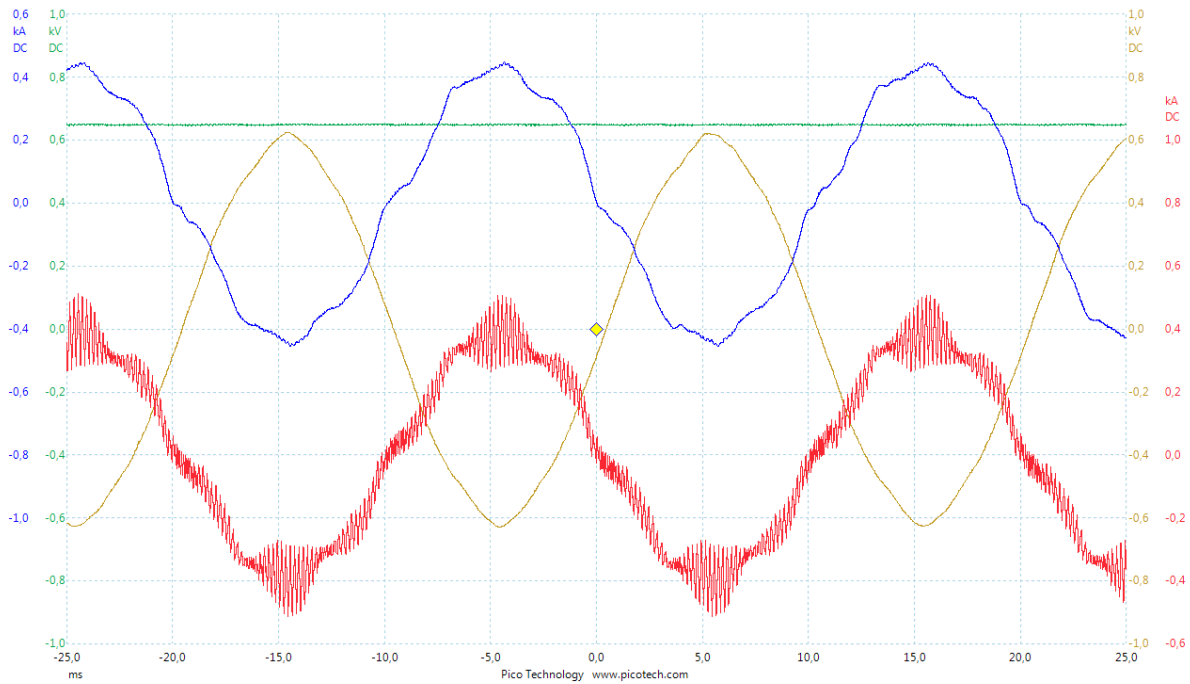
Na slici 4.4 prikazane su mjerene veličine pri čisto induktivnoj struji od 250 A, a na slici 4.5 pri čisto kapacitivnoj struji od 250 A.



Sl. 4.3. Frekvencijski spektar harmonika mrežne struje u frekvencijskom području od 0-900 Hz



Sl. 4.4. Valni oblici linijskog napona mreže (oker), struje mreže (plavo), struje usmjerivača (crveno) i istosmjernog napona usmjerivača (zeleno) pri čisto **induktivnoj** struji usmjerivača od 250 A

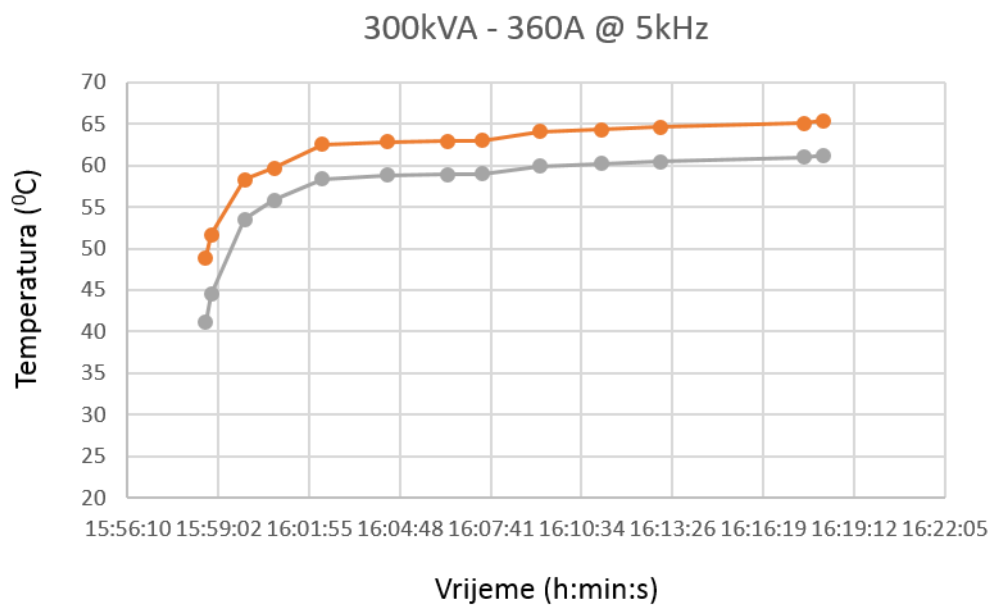


Sl. 4.5. Valni oblici linijskog napona mreže (oker), struje mreže (plavo), struje usmjerivača (crveno) i istosmjernog napona usmjerivača (zeleno) pri čisto **kapacitivnoj** struji usmjerivača od 250 A

4.2. Mjerenje zagrijavanja

Mjerenje temperature IGBT mosta izvedeno je pomoću temperaturnih senzora koji su ugrađeni u IGBT module. Pritom su prikazane temperature 2 modula. Na slici 4.6 prikazana je promjena temperature nakon trenutnog opterećenja usmjerivača sa strujom od 360 A, koja predstavlja 80% nazivne struje. Mjerenja su napravljena pri sklopnoj frekvenciji IGBT mosta od $f_{PWM} = 5$ kHz. Sa slike se može primijetiti da je stacionarna temperatura više zagrijanog modula oko 65°C , tj. uz uvjet da je temperatura okoline bila oko 20°C , nadtemperatura je oko 45°C . Premda usmjerivač nije nazivno opterećen zasigurno se može procijeniti da će pri nazivnom opterećenju nadtemperatura modula biti manja od 80°C , što je maksimalno dozvoljena nadtemperatura.

Na slici 4.7 prikazana je termografska slika dijela LCL filtera. Sa slike se može zaključiti da nijedna temperatura ne prelazi 45°C . Premda prigušnice imaju veću toplinsku konstantu od usmjerivača, što znači da nakon 30 minuta nisu postigle stacionarnu temperaturu, ovaj rezultat sugerira da se u stacionarnom stanju prigušnice neće pregrijati.



Sl. 4.6 Promjena temperature dva IGBT modula usmjerivača tijekom opterećenja strujom od 360 A, uz sklopnu frekvenciju od 5 kHz



Sl. 4.7 Termografska slika dijela LCL filtera koji obuhvaća pretvaračku prigušnicu