

Naziv
dokumenta:

**Protokol o završnim testiranjima
upravljačkih algoritama**

Autori:

Mag. ing. Ante Kriletić
Prof. dr.sc. Ozren Bego
Prof. dr. sc. Božo Terzić

Rev.

0.0

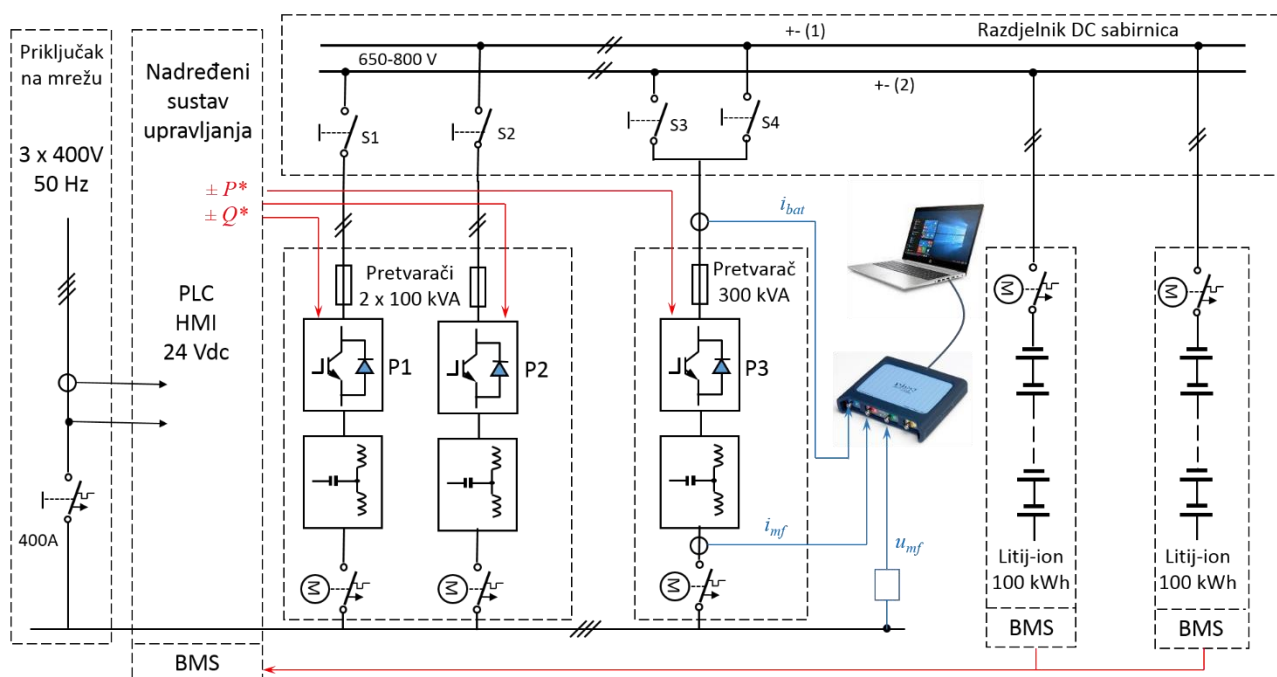
Datum:

10.09.2020.

1. Shema mjerenja

Na slici 1.1 prikazana je blokovska shema mjerenja valnih oblika napona i struja svih testiranih PWM usmjerivača u okviru kontejnerskog postrojenja ASPEMS-a. Tijekom testiranja svakom usmjerivaču se iz nadređenog sustava zadaje pozitivna i negativna referenca radne ($\pm P^*$) i jalove ($\pm Q^*$) snage. Za testiranje usmjerivača P1 i P2 uključene su zasebno sklopke S1 i S2 tako da je svaki pretvarač spojen na jedan string litij-ionskih baterija, dok su za testiranje pretvarača P3 istovremeno uključene sklopke S3 i S4 tako da pretvarač na svojim istosmjernim stezaljkama ima paralelno spojena oba stringa baterija. Na taj način pretvarač se može opteretiti većim strujama. 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_{mf}) i struje baterije (i_{bat}) koriste se strujna klijesta tipa C160, proizvođača Fluke, a za mjerenje faznog napona mreže (u_{mf}) koriste se naponske sonde tipa TA057, proizvođača PicoScope. Na slici je prikazan spoj mjerne opreme samo za slučaj kada se mjere struje i naponi usmjerivača P3, a analogno se vrše mjerenja i na ostala dva pretvarača.

Na slikama 1.2 i 1.3. prikazana su oba niza litij-ionskih baterija približno istog kapaciteta od 100 Ah, s pripadajućim BMS sustavom koji se nalazi na najdonjoj polici ispod baterija. Litij-ionske baterije su od 2 različita proizvođača.



Sl. 1.1 Blokovska shema mjerenja



Sl. 1.2 Prvi niz litij-ionskih baterija kapaciteta 100 Ah s pripadajućim BMS sustavom ispod baterija



Sl. 1.3 Drugi niz litij-ionskih baterija kapaciteta 100 Ah s pripadajućim BMS sustavom ispod baterija

2. PWM usmjerivač P1 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: $L_c = 120 \mu\text{H}/\text{fazi}$



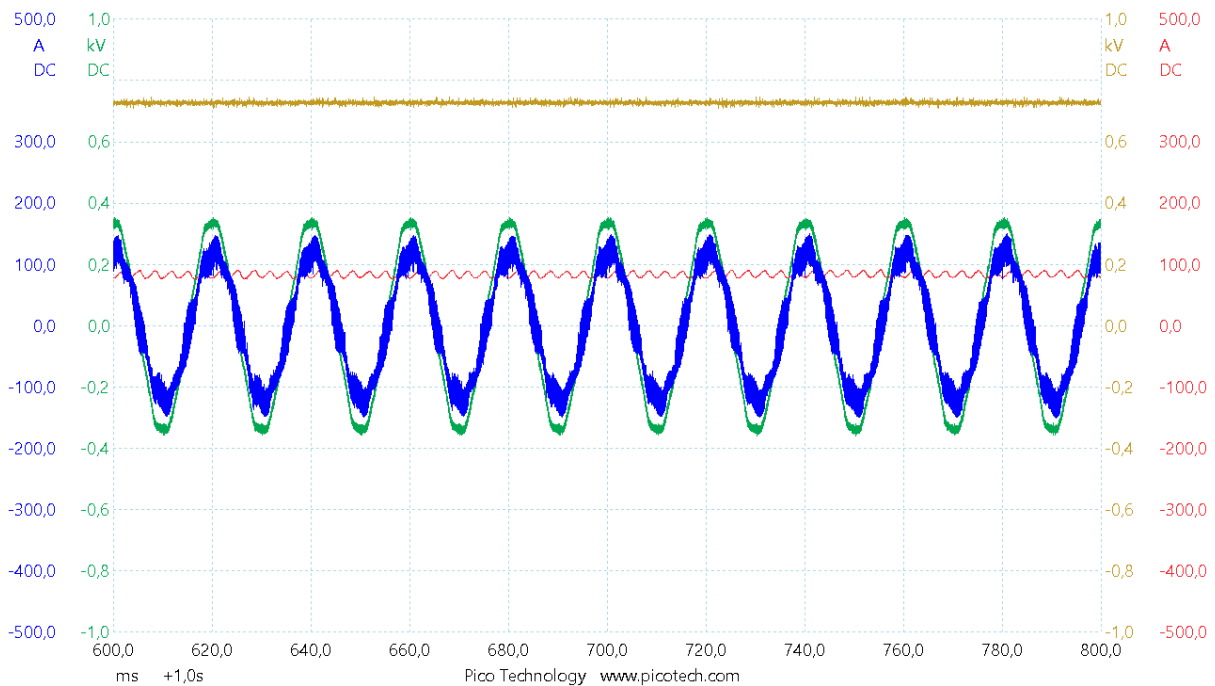
Sl. 2.1. Fotografija unutrašnjosti razvodnog ormara s oba PWM usmjerivača snage 100 kVA i pripadajućim LCL filterima ispod njih

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.

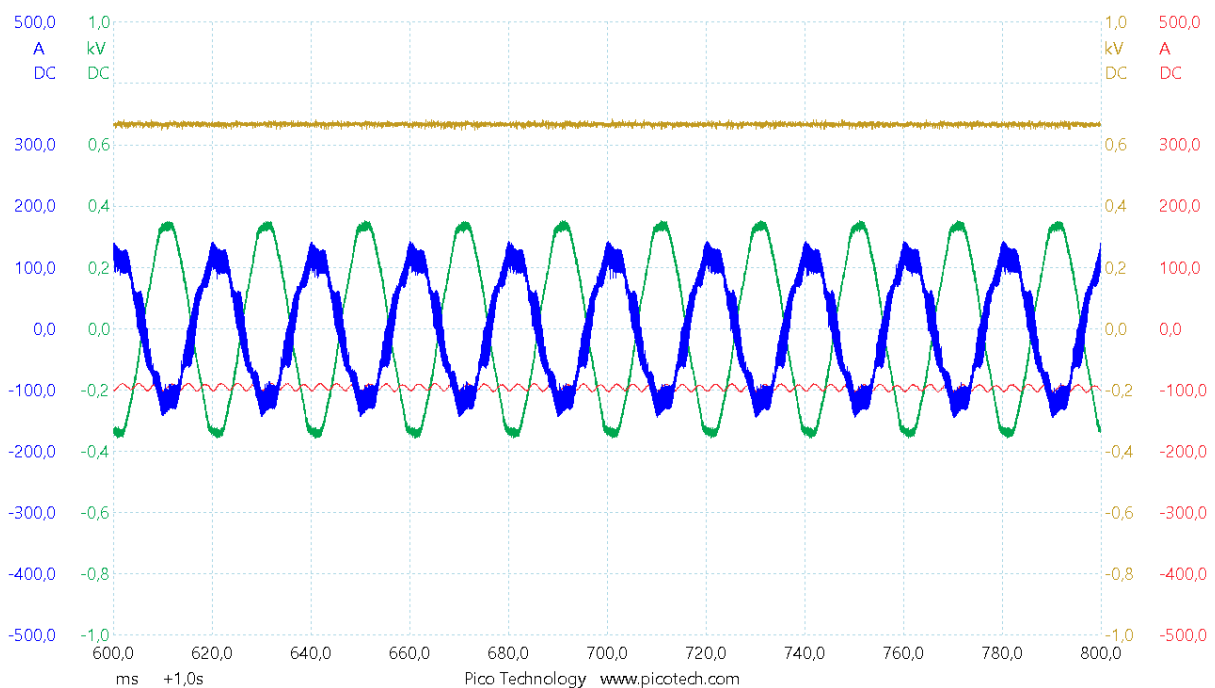


Sl. 2.2. Fotografija mjerne opreme i PWM usmjerivača tijekom snimanja valnih oblika napona i struja usmjerivača snage 100 kVA s LCL filtrom tipa A

Na slikama 2.3 i 2.4 prikazani su valni oblici napona i struja tijekom punjenja i pražnjenja baterija snagom od približno 65 kW. Napon baterija je veći prilikom punjenja nego pražnjenja zbog unutarnjeg otpora baterija. U struji baterija se pojavljuju pulzacije frekvencije 300 Hz koje su posljedica nesavršenog rada trofaznog IGBT izmjenjivača. Visokofrekvencijske pulzacije u struji mreže nisu stvarne već predstavljaju mjerni šum strujnih kliješta, a može se primjetiti i odgovarajuće minimalno izobličenje osnovnog valnog oblika. Harmonička analiza struje detaljno je provedena u tehničkom izvještaju „Protokol o mjerenju zagrijavanja i harmoničkog izobličenja mrežne struje PWM usmjerivača“, pa se ovdje neće dodatno analizirati.

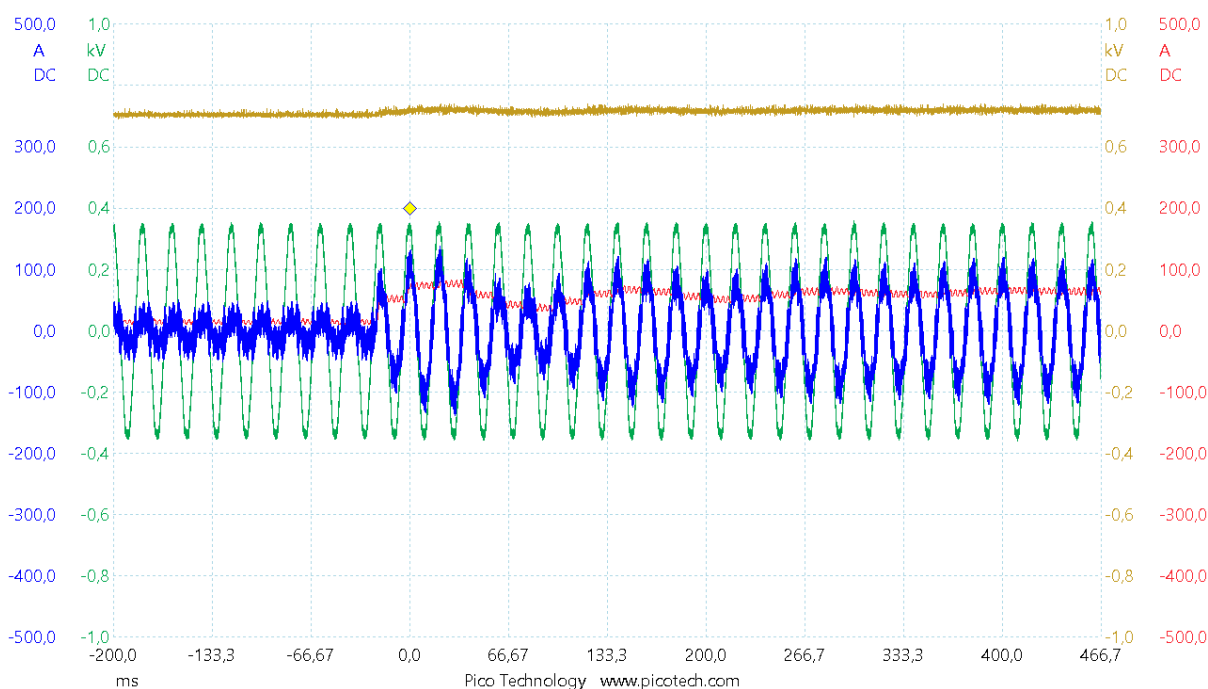


Sl. 2.3. Valni oblici faznog napona mreže (zeleno), fazne struje mreže (plavo), struje baterijskog niza (crveno) i istosmjernog napona na bateijama (oker) tijekom **punjenja** Li-ion baterija

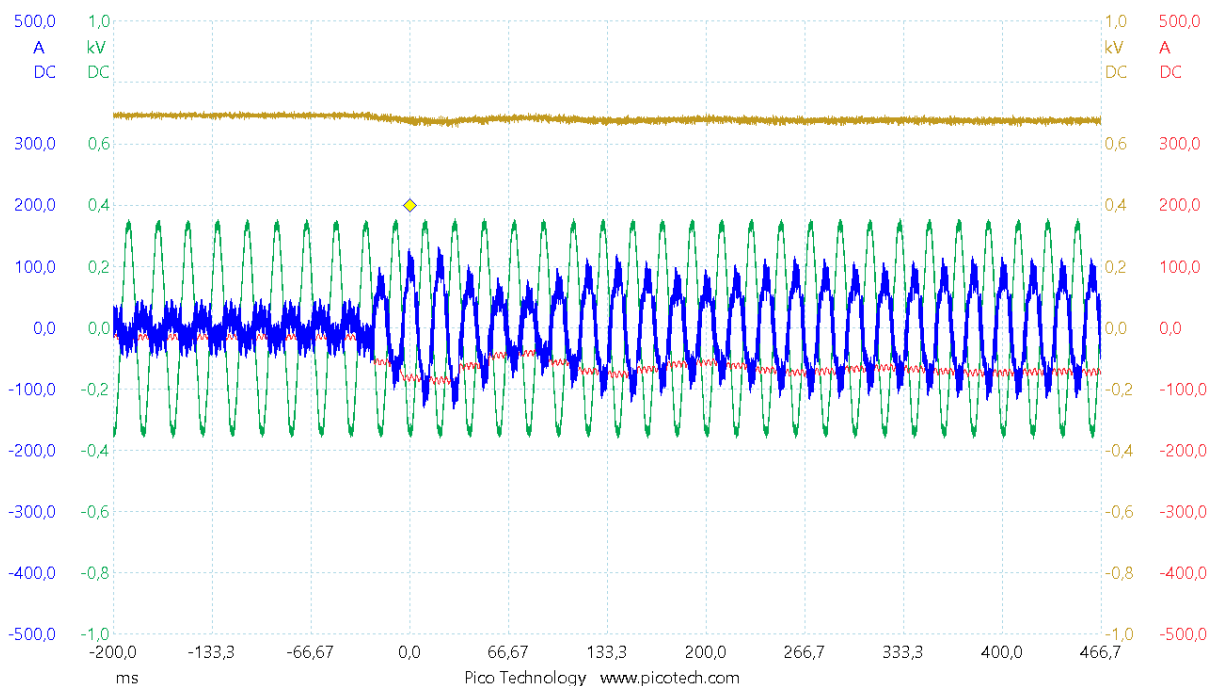


Sl. 2.4. Valni oblici faznog napona mreže (zeleno), fazne struje mreže (plavo), struje baterijskog niza (crveno) i istosmjernog napona na bateijama (oker) tijekom **pražnjenja** Li-ion baterija

Na slikama 2.5 i 2.6 prikazani su valni oblici napona i struja tijekom punjenja i pražnjenja baterija uz skokovitu promjenu radne snage s 10 na 70 kW. Sa slika se može primijetiti da je prijelazna pojava prigušeno oscilirajuća i da traje oko 250 ms.

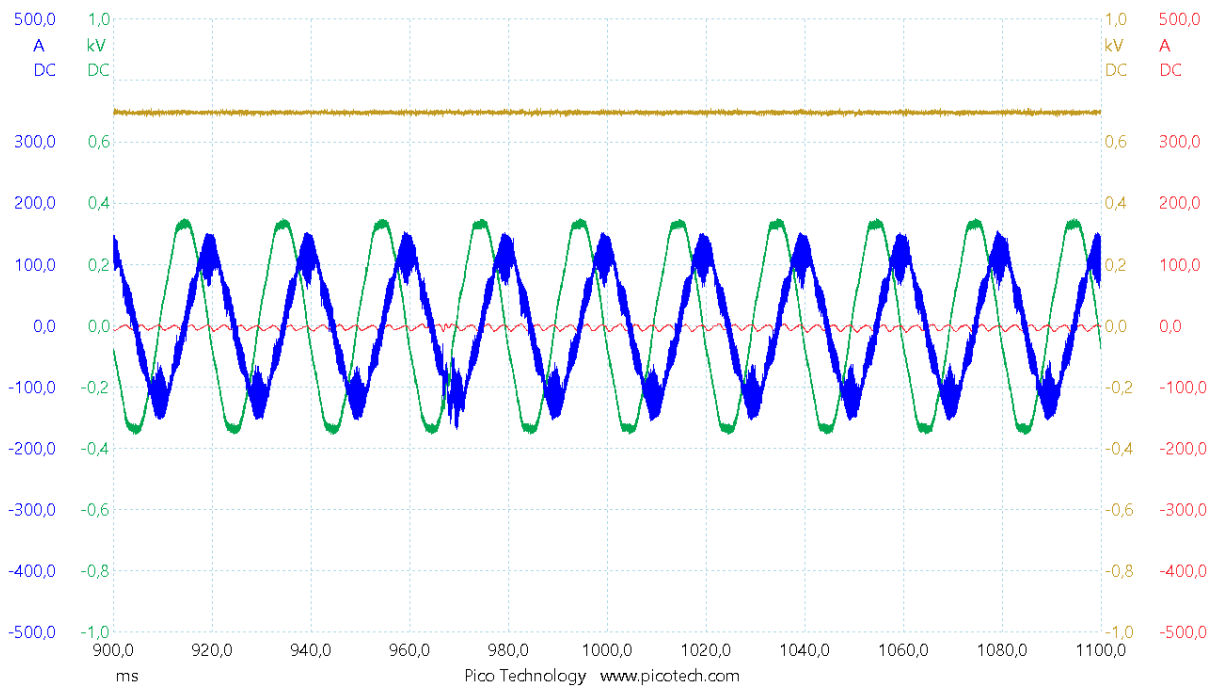


Sl. 2.5. Valni oblici faznog napona mreže (zeleno), fazne struje mreže (plavo), struje baterijskog niza (crveno) i istosmjernog napona na baterijama (oker) tijekom **skokovite promjene snage punjenja** s 10 na 70 kW

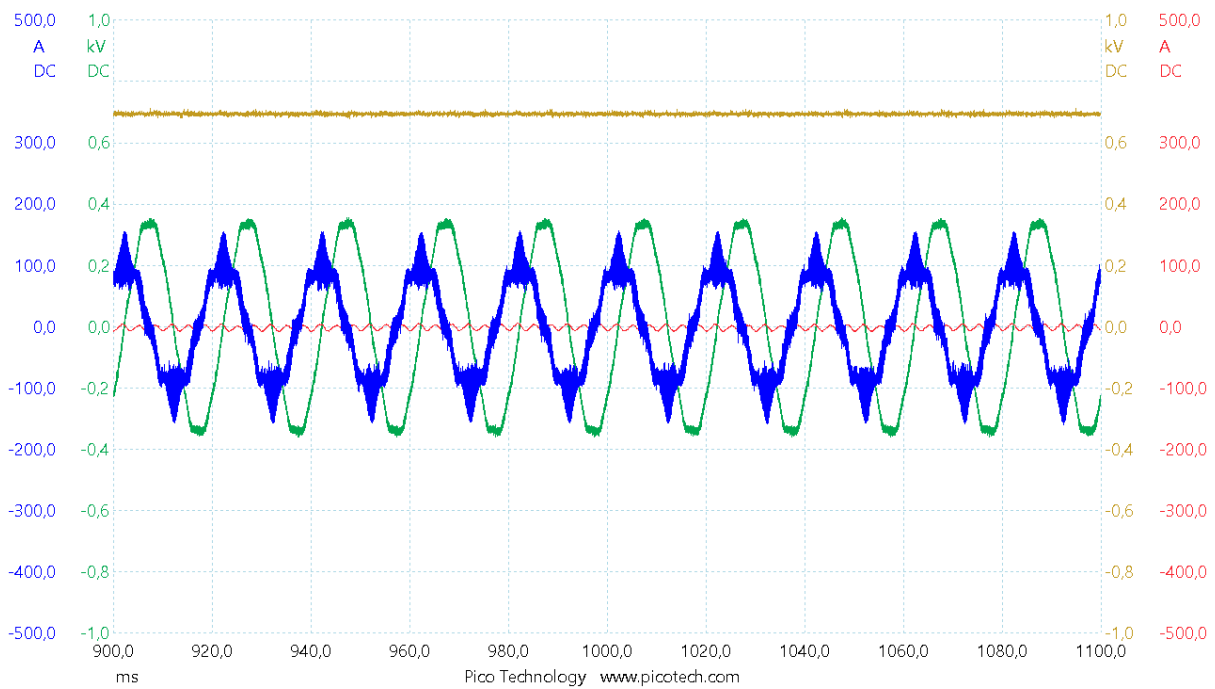


Sl. 2.6. Valni oblici faznog napona mreže (zeleno), fazne struje mreže (plavo), struje baterijskog niza (crveno) i istosmjernog napona na baterijama (oker) tijekom **skokovite promjene snage pražnjenja** s 10 na 70 kW

Na slikama 2.7 i 2.8 prikazani su valni oblici napona i struja u slučaju zadavanja induktivne i kapacitivne jalove snage, bez punjenja i pražnjenja baterija. Sa slika se može primijetiti pozitivni i negativni fazni pomak od 90° između faznih napona i struja, a srednja vrijednost struje baterije je jednaka nuli.



Sl. 2.7. Valni oblici faznog napona mreže (zeleno), fazne struje mreže (plavo), struje baterijskog niza (crveno) i istosmjernog napona na baterijama (oker) pri referenci **induktivne jalove struje** mreže od 80 A.



Sl. 2.8. Valni oblici faznog napona mreže (zeleno), fazne struje mreže (plavo), struje baterijskog niza (crveno) i istosmjernog napona na baterijama (oker) pri referenci **kapacitivne jalove struje** mreže od 80 A.

3. PWM usmjerivač P2 s LCL filtrom tipa B

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 $f_{PWM}=5$ kHz. Parametri LCL filtra tipa B su:

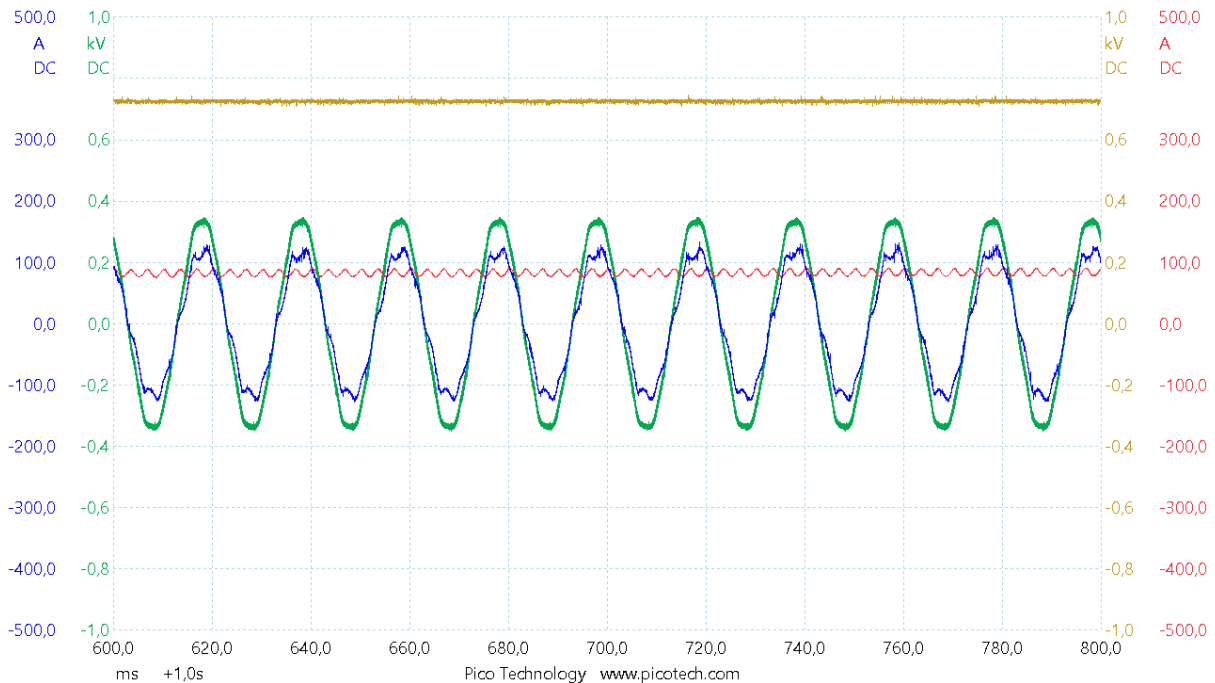
- Trofazna prigušnica na strani mreže $L_g = 170 \mu\text{H}/\text{fazi}$
- Kondenzatori u spoju zvijezda: $C_f = 200 \mu\text{F}/\text{fazi}$
- Trofazna prigušnica na strani pretvarača: $L_c = 550 \mu\text{H}/\text{fazi}$

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.

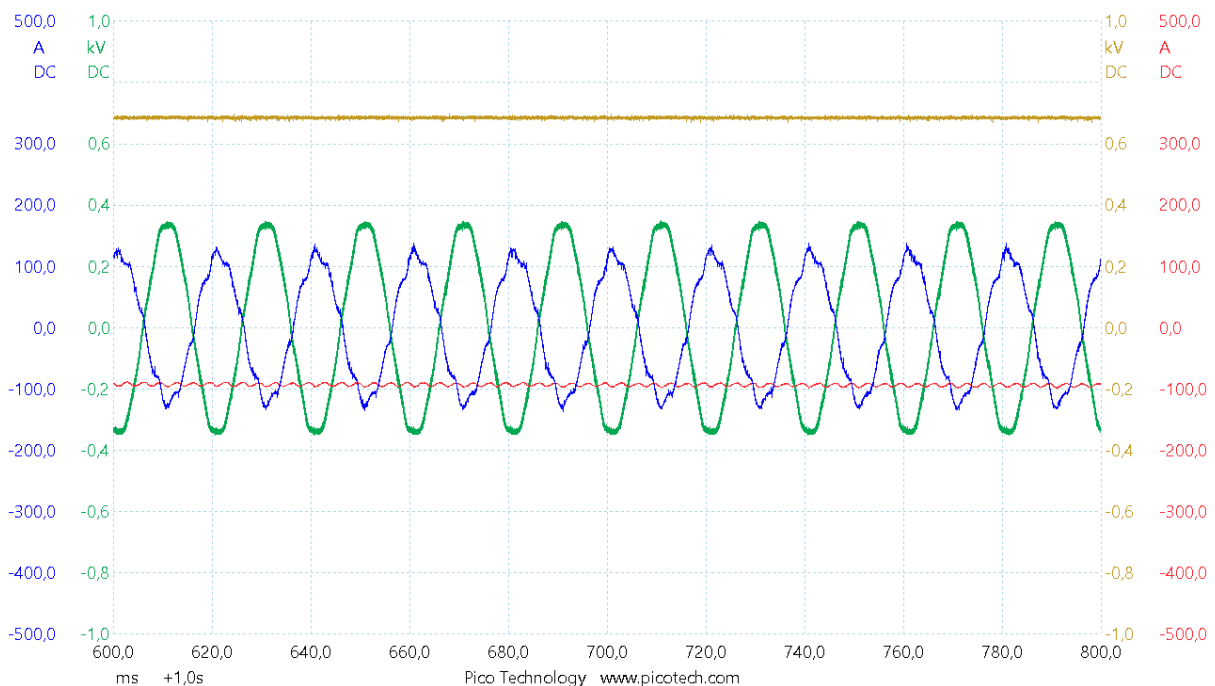


Sl. 3.1. Fotografija mjerne opreme i LCL filtra tijekom snimanja valnih oblika napona i struja usmjerivača snage 100 kVA s LCL filtrom tipa B

Na slikama 3.2 i 3.3 prikazani su valni oblici napona i struja tijekom punjenja i pražnjenja baterija snagom od približno 65 kW. U struji baterija se pojavljuju pulzacije frekvencije 300 Hz koje su posljedica nesavršenog rada trofaznog IGBT izmjenjivača. Može se primjetiti i odgovarajuće izobličenje osnovnog valnog oblika struje. Harmonička analiza struje detaljno je provedena u tehničkom izvještaju „Protokol o mjerenju zagrijavanja i harmoničkog izobličenja mrežne struje PWM usmjerivača“, pa se ovdje neće dodatno analizirati.

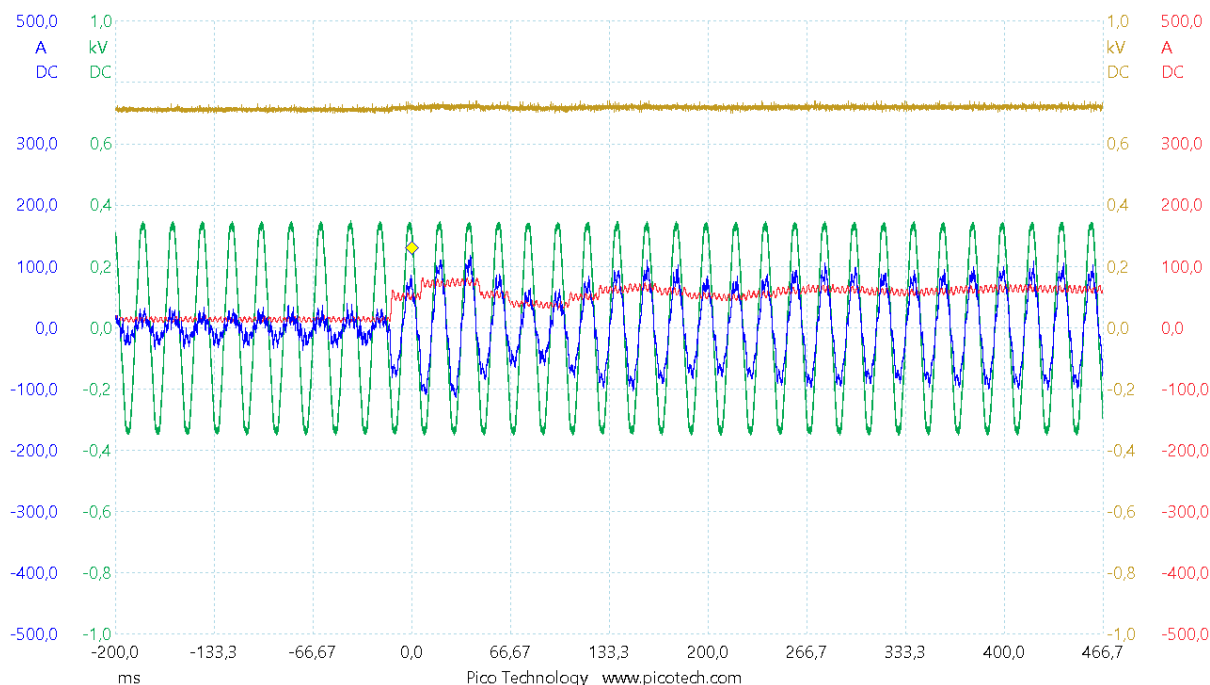


Sl. 3.2. Valni oblici faznog napona mreže (zeleno), fazne struje mreže (plavo), struje baterijskog niza (crveno) i istosmjernog napona na bateijama (oker) tijekom **punjenja** Li-ion baterija

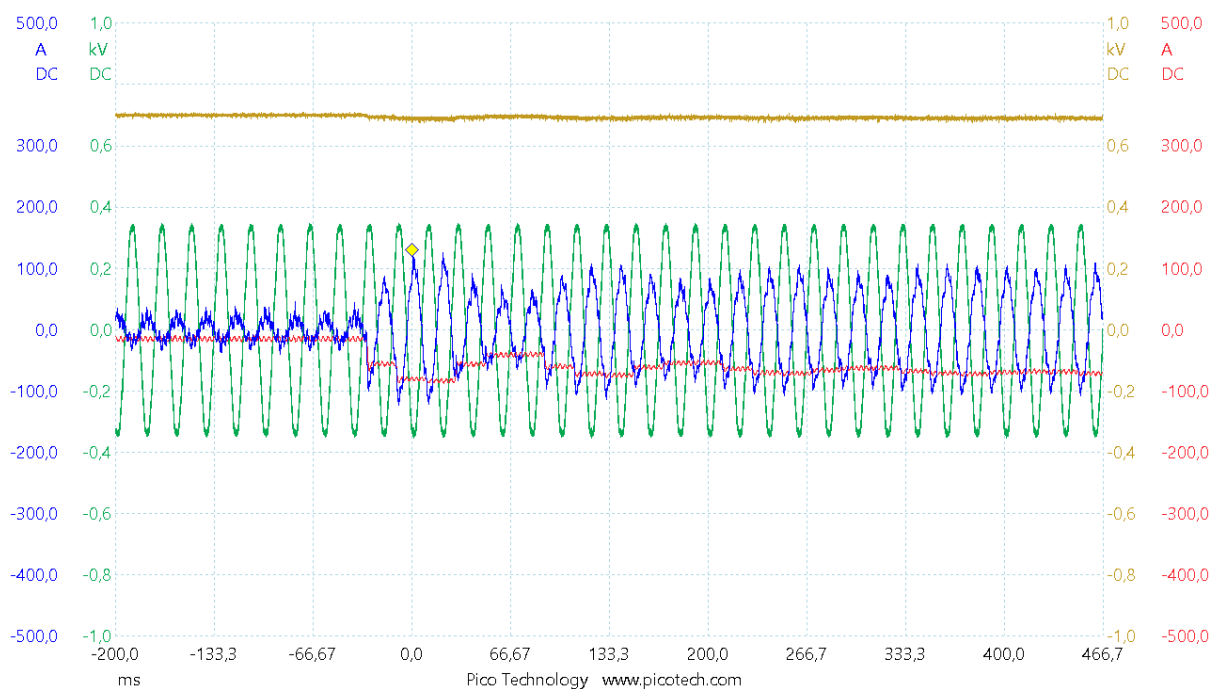


Sl. 3.3. Valni oblici faznog napona mreže (zeleno), fazne struje mreže (plavo), struje baterijskog niza (crveno) i istosmjernog napona na bateijama (oker) tijekom **pražnjenja** Li-ion baterija

Na slikama 3.4 i 3.5 prikazani su valni oblici napona i struja tijekom punjenja i pražnjenja baterija uz skokovitu promjenu radne snage s 10 na 70 kW. Sa slika se može primijetiti da je prijelazna pojava prigušeno oscilirajuća i da traje oko 250 ms.

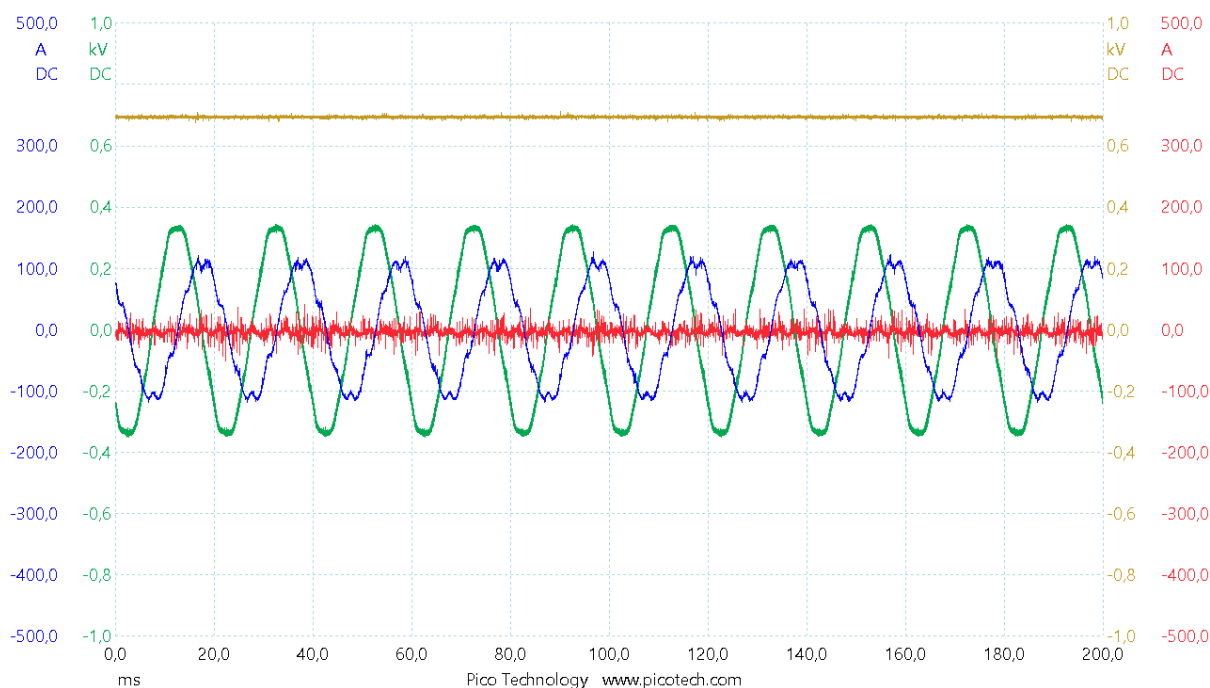


Sl. 3.4. Valni oblici faznog napona mreže (zeleno), fazne struje mreže (plavo), struje baterijskog niza (crveno) i istosmjernog napona na baterijama (oker) tijekom **skokovite promjene snage punjenja** s 10 na 70 kW

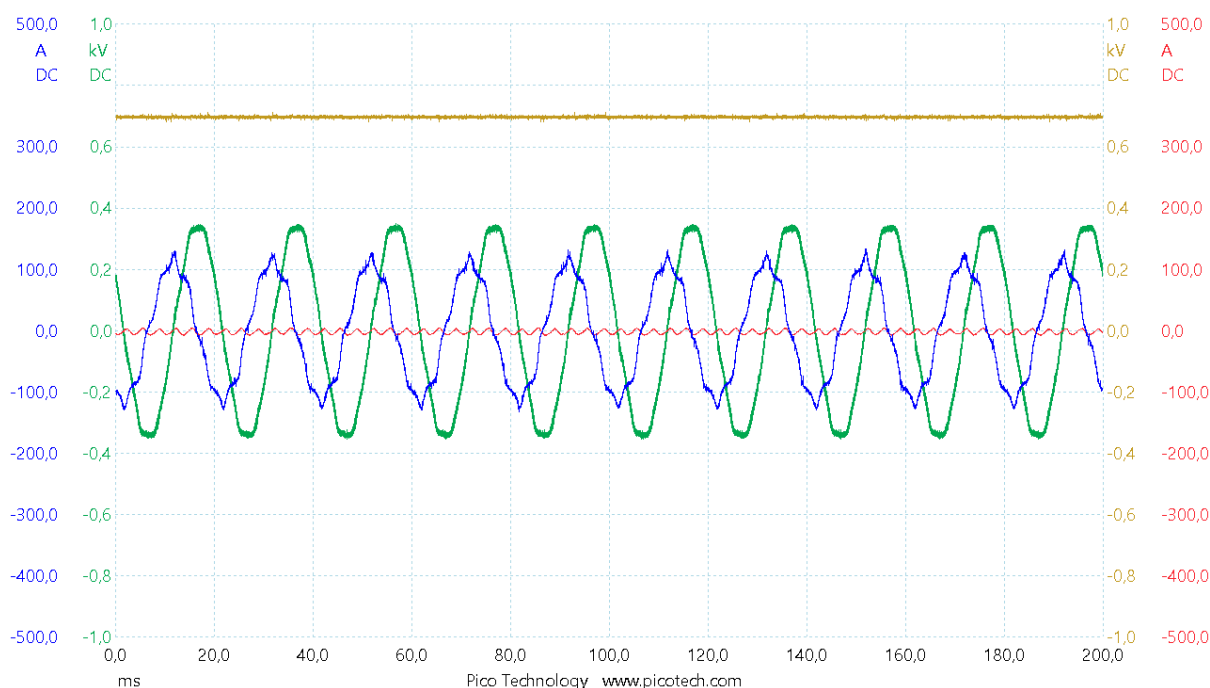


Sl. 3.5. Valni oblici faznog napona mreže (zeleno), fazne struje mreže (plavo), struje baterijskog niza (crveno) i istosmjernog napona na baterijama (oker) tijekom **skokovite promjene snage pražnjenja** s 10 na 70 kW

Na slikama 3.6 i 3.7 prikazani su valni oblici napona i struja u slučaju zadavanja induktivne i kapacitivne jalove snage, bez punjenja i pražnjenja baterija. Sa slika se može primijetiti pozitivni i negativni fazni pomak od 90° između faznih napona i struja, a srednja vrijednost struje baterije je jednaka nuli.



Sl. 3.6. Valni oblici faznog napona mreže (zeleno), fazne struje mreže (plavo), struje baterijskog niza (crveno) i istosmjernog napona na baterijama (oker) pri referenci **induktivne jalove struje** mreže od 80 A.

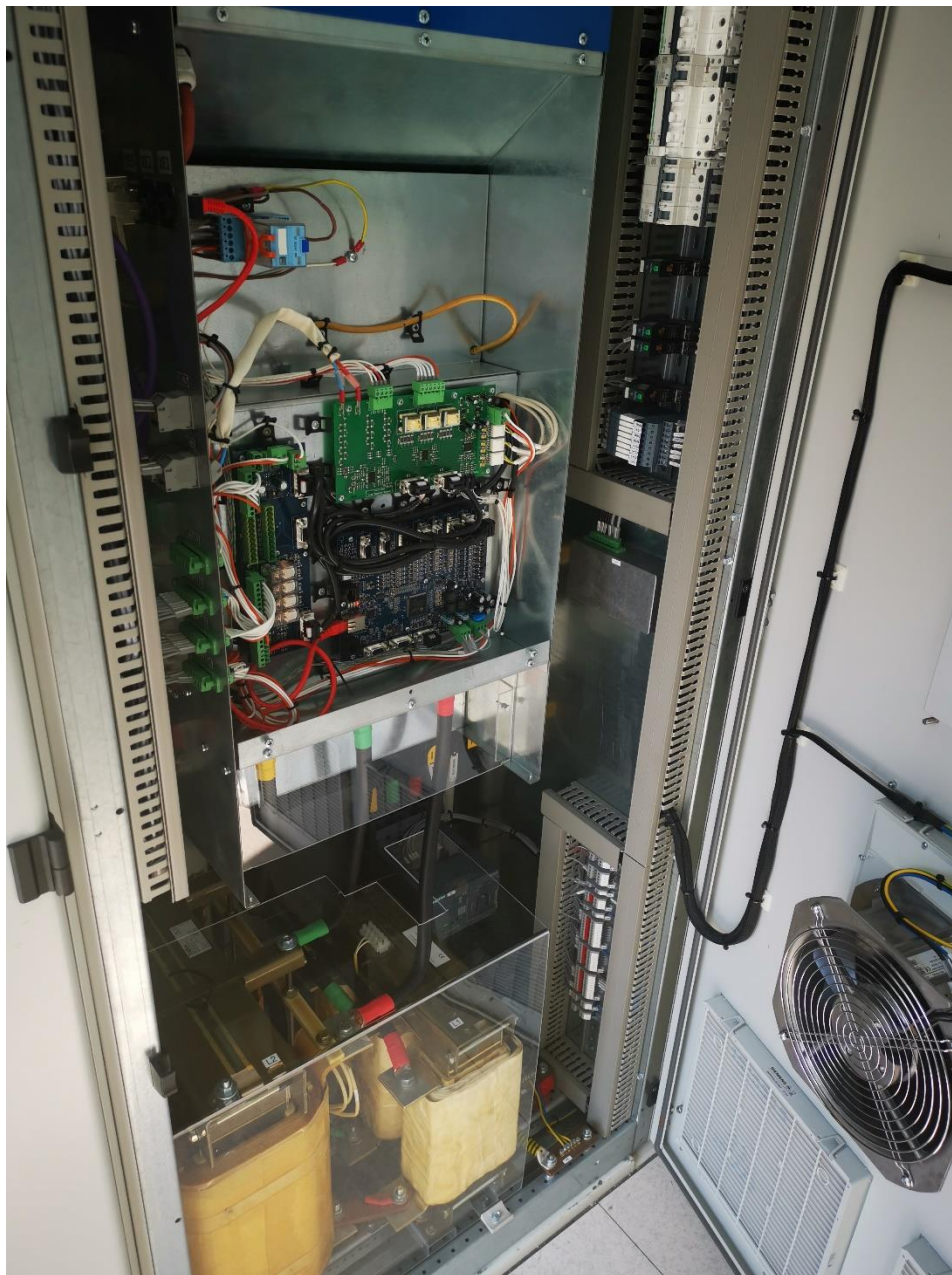


Sl. 3.7. Valni oblici faznog napona mreže (zeleno), fazne struje mreže (plavo), struje baterijskog niza (crveno) i istosmjernog napona na baterijama (oker) pri referenci **kapacitivne jalove struje** mreže od 80 A.

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

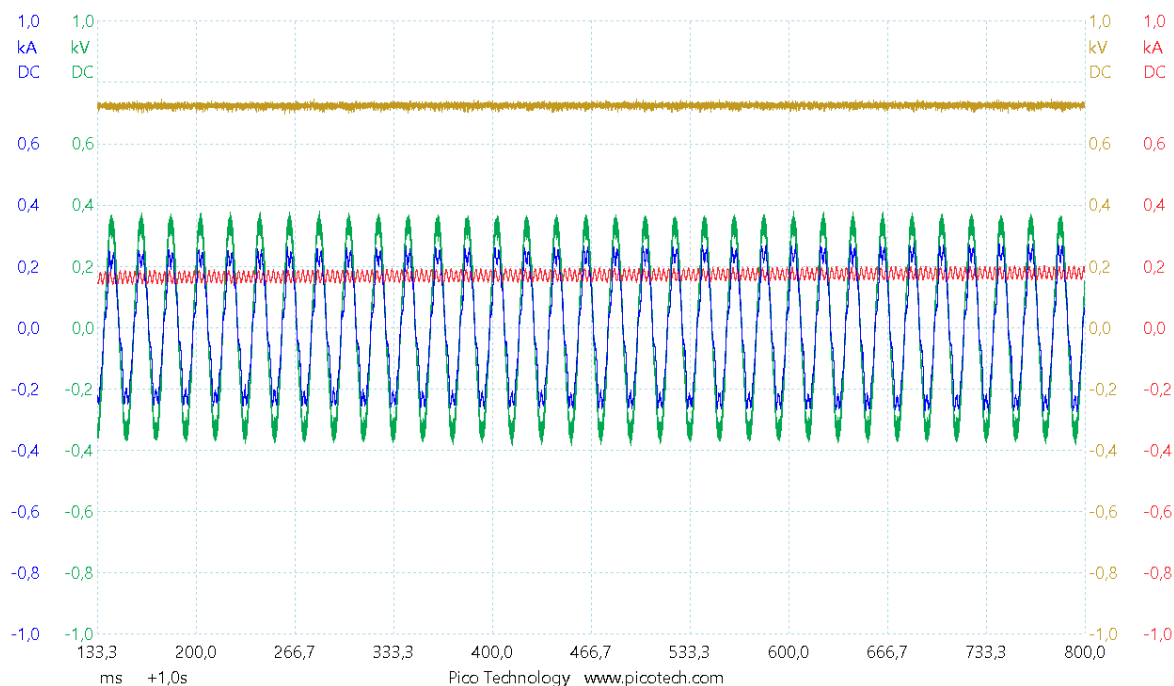


Sl. 4.1. Unutrašnjost razvodnog ormara s PWM usmjerivačem snage 300 kVA

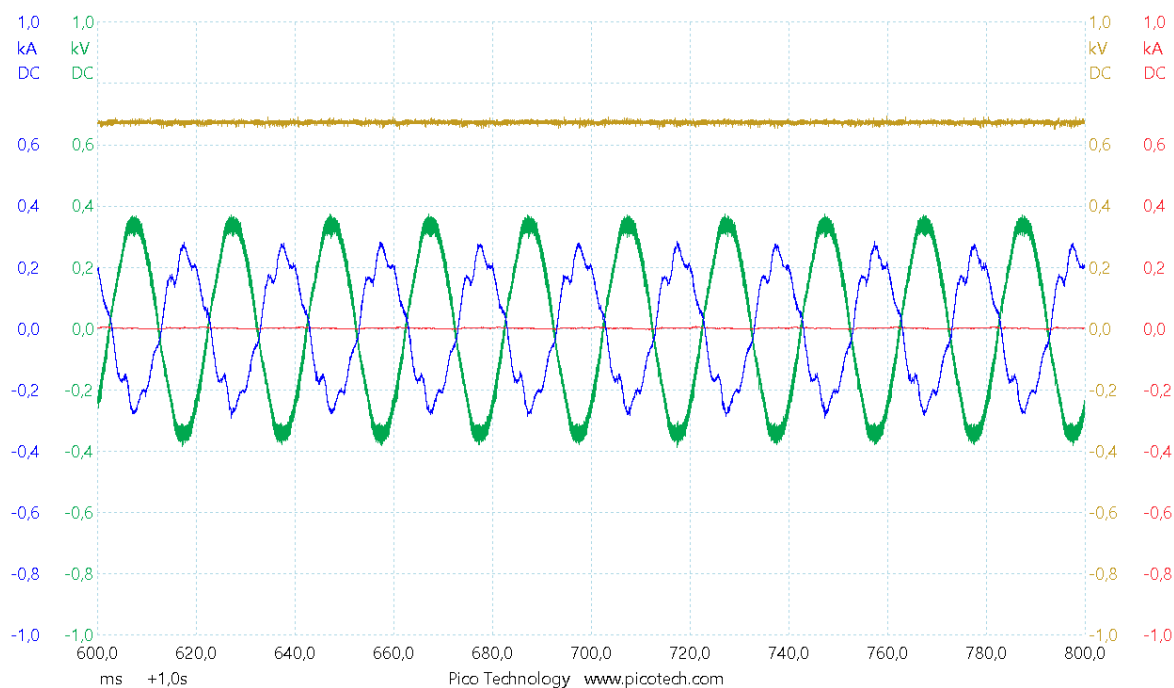


Sl. 4.2. Snimanje valnih oblika napona i struja PWM usmjerivača snage 300 kVA

Na slikama 4.3 i 4.4 prikazani su valni oblici napona i struja tijekom punjenja i pražnjenja baterija snagom od približno 140 kW. U struji baterija se pojavljuju pulzacije frekvencije 300 Hz koje su posljedica nesavršenog rada trofaznog IGBT izmjenjivača. Može se primjetiti i odgovarajuće izobličenje osnovnog valnog oblika struje. Na slici 4.4. nije ispravno izmjerena struja baterija zbog kvara strujnih kliješta.

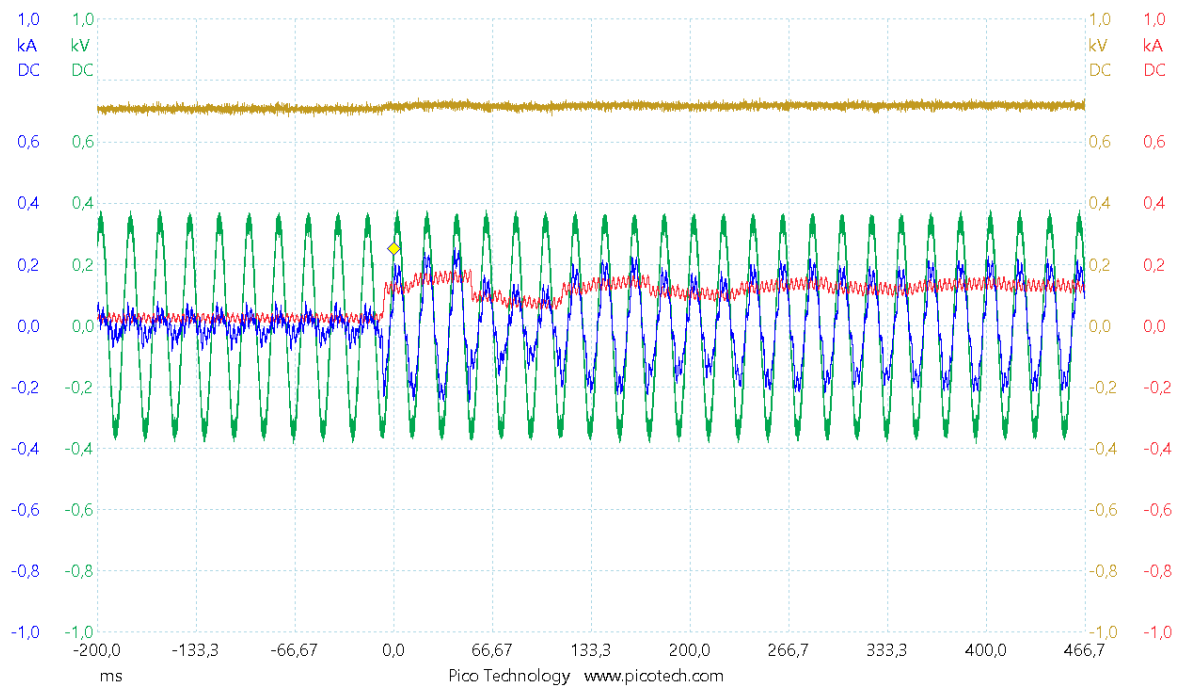


Sl. 4.3. Valni oblici faznog napona mreže (zeleno), fazne struje mreže (plavo), struje baterijskog niza (crveno) i istosmjernog napona na bateijama (oker) tijekom **punjenja** Li-ion baterija

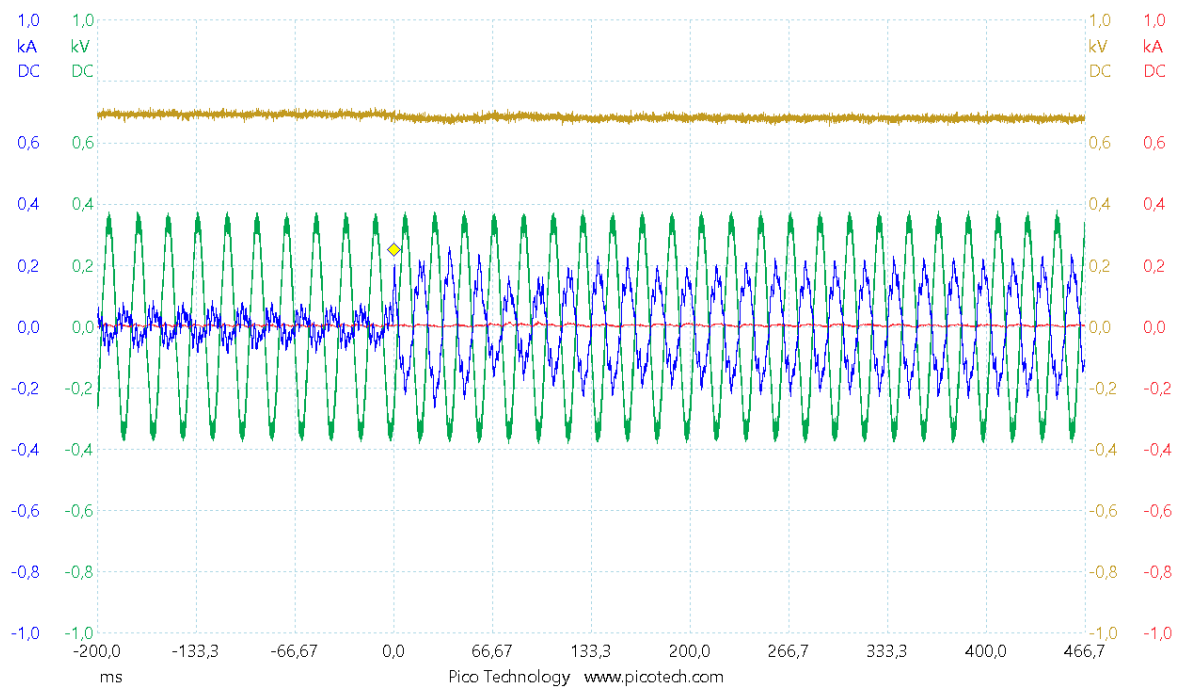


Sl. 4.4. Valni oblici faznog napona mreže (zeleno), fazne struje mreže (plavo), struje baterijskog niza (crveno) i istosmjernog napona na bateijama (oker) tijekom **pražnjenja** Li-ion baterija

Na slikama 4.5 i 4.6 prikazani su valni oblici napona i struja tijekom punjenja i pražnjenja baterija uz skokovitu promjenu radne snage s 20 na 120 kW. . Na slici 4.6. nije ispravno izmjerena struja baterija zbog kvara strujnih kliješta. Sa slika se može primijetiti da je prijelazna pojava prigušeno oscilirajuća i da traje oko 250 ms.

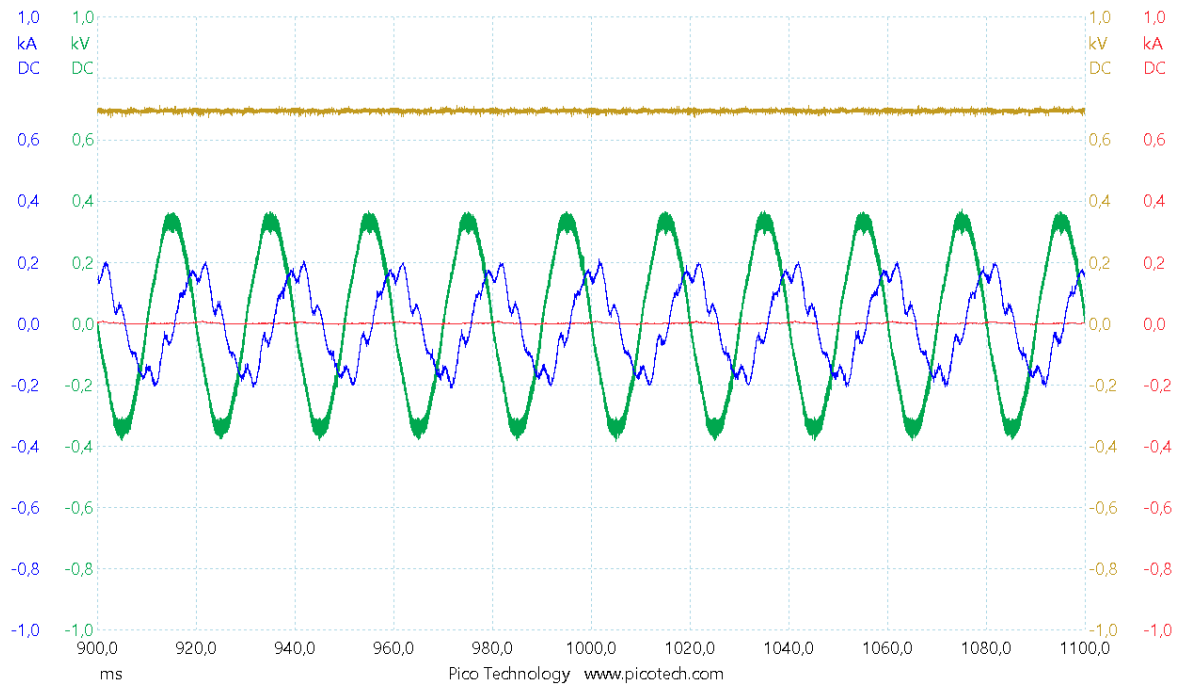


Sl. 4.5. Valni oblici faznog napona mreže (zeleno), fazne struje mreže (plavo), struje baterijskog niza (crveno) i istosmjernog napona na baterijama (oker) tijekom **skokovite promjene snage punjenja s 20 na 120 kW**

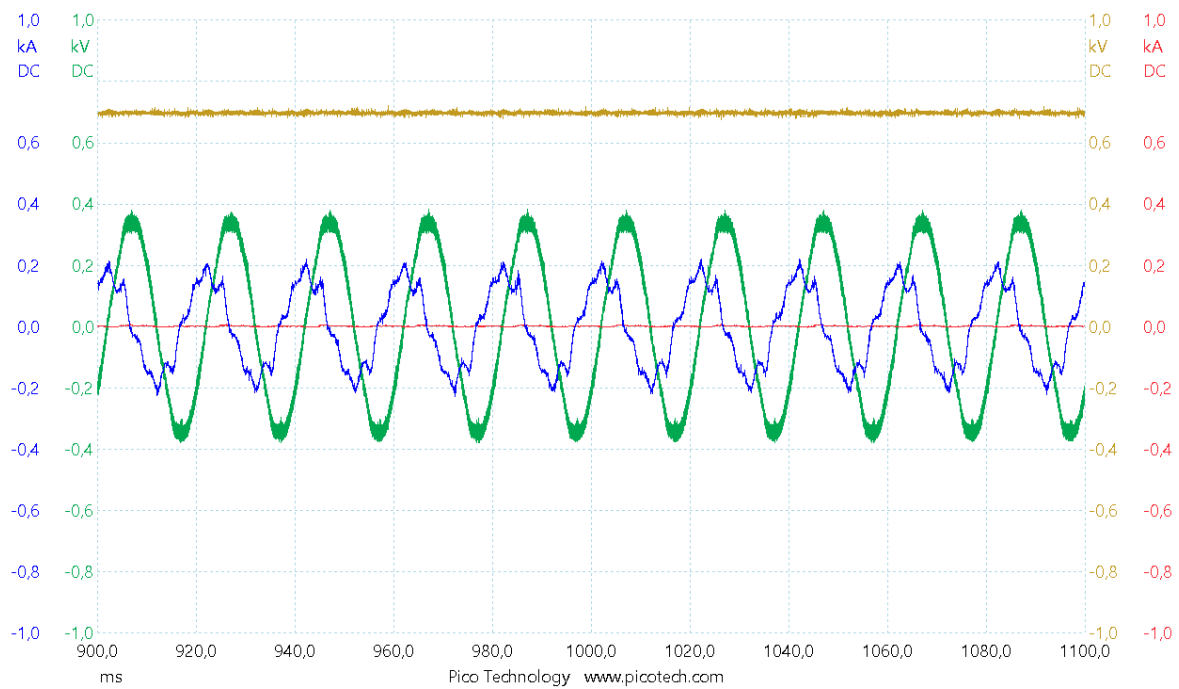


Sl. 4.6. Valni oblici faznog napona mreže (zeleno), fazne struje mreže (plavo), struje baterijskog niza (crveno) i istosmjernog napona na baterijama (oker) tijekom **skokovite promjene snage pražnjenja s 20 na 120 kW**

Na slikama 4.7 i 4.8 prikazani su valni oblici napona i struja u slučaju zadavanja induktivne i kapacitivne jalove snage, bez punjenja i pražnjenja baterija. Sa slika se može primijetiti pozitivni i negativni fazni pomak od 90° između faznih napona i struja, a srednja vrijednost struje baterije je jednaka nuli.



Sl. 4.7. Valni oblici faznog napona mreže (zeleno), fazne struje mreže (plavo), struje baterijskog niza (crveno) i istosmjernog napona na baterijama (oker) pri referenci **induktivne jalove struje** mreže od 125 A.



Sl. 4.8. Valni oblici faznog napona mreže (zeleno), fazne struje mreže (plavo), struje baterijskog niza (crveno) i istosmjernog napona na baterijama (oker) pri referenci **kapacitivne jalove struje** mreže od 125 A.

5. Zaključak

Provedena mjerenja na kontejnerskom postrojenju ASPEMS sustava ukazuju da PWM usmjerivači ispunjavaju svoju osnovnu zadaću upravljanja punjenjem i pražnjenjem baterijskih stringova s Litij-ionskim baterijama. Također, pomoću PWM usmjerivača moguće je u mrežu generirati jalovu energiju induktivnog i kapacitivnog karaktera. Prijelazna pojava tijekom promjene reference radne snage punjenja ili pražnjenja iznosi oko 250 ms.

Daljnja istraživanja usmjerit će se na smanjenje harmoničkog izobličenja valnih oblika struje usmjerivača prema mreži, na smanjenje harmoničkih komponenti od 300 Hz u strujama baterija, te smanjenju trajanja prijelazne pojave tijekom promjene reference radne i jalove snage.