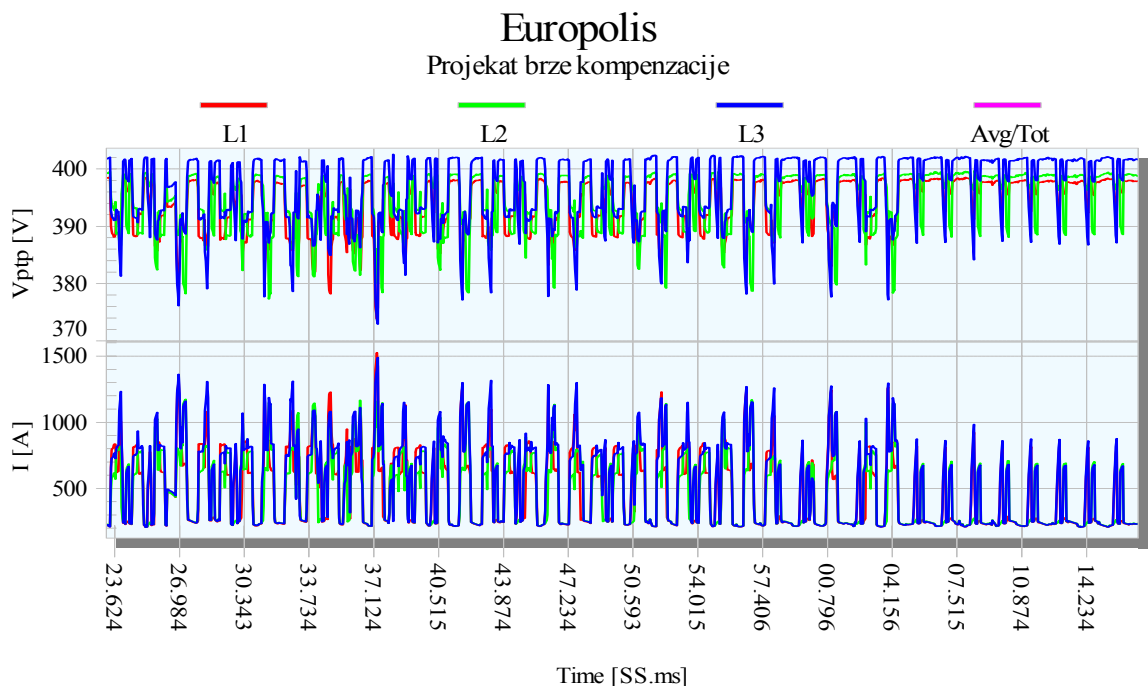
	Case study: Linija za tačkasto zavarivanje	бр. CS190909v1
		datum




Ova studija slučaja obrađuje vrlo specifičnu oblast kompenzacije reaktivne snage, a to su mašine za proizvodnju armaturne mreže. Ove mašine imaju izuzetno brze i velike promene struje sa jako visokim sadržajem viših harmonika. U domaćoj praksi kod ovakvih mašina uglavnom nije izvedena kompenzacija reaktivne snage, a tamo gde je izvedena rezultati su jako loši zbog nastalih rezonanci, te oscilacija struja i napona.

Jedna od najpoznatijih domaćih fabrika za proizvodnju armaturnih mreža, u cilju smanjenja troškova električne energije odlučila je da izvrši kompenzaciju reaktivne snage. U pogonu su dominantne dve mašine za proizvodnju armaturne mreže, proizvođača Schlater, koje automatizovanim postupkom tačkastog zavarivanja sa više zavarivačkih glava istovremeno, prave armaturnu mrežu. S obzirom na visok sadržaj harmonika napona i struja, klasična kompenzacija reaktivne snage nije dolazila u obzir. Avalon Partners je angažovan da izvrši analizu problema i predloži optimalno tehničko rešenje.

Analizom mreže utvđene su velike i brze oscilacije reaktivne snage koje stvara mašina za armaturnu mrežu. Jedan ciklus zavarivanja traje oko 200-400 ms u zavisnosti od debljine žice. Ciklusi se ponavljaju na svakih 1.2 sekunde. Udarne vrednost struje tokom jednog ciklusa zavarivanja iznosi i do 1500 A (v. sliku 1)



Slika 1. Naponi i struje tokom postupka proizvodnje armaturne mreže

	Case study: Linija za tačkasto zavarivanje	бр. CS190909v1
		datum

Utvrđeno je i da struje po fazama nisu simetrične, već da postoje značajna odstupanja - i do dva puta (v. sliku 1 i sliku 3.). Ovo otežava izbor opreme za kompenzaciju reaktivne snage, jer većina opreme je trofaznog simetričnog tipa koja uključuje kondenzatorske baterije praktično istovremeno u sve tri faze (bilo kontaktorski bilo tiristorski). Time bi došlo do značajne prekompenzacije u jednoj fazi i značajne podkompenzacije u drugoj. Pored neefikasne kompenzacije reaktivne snage ovo bi dovelo do različitih padova napona po fazama i lošeg kvaliteta zavara.

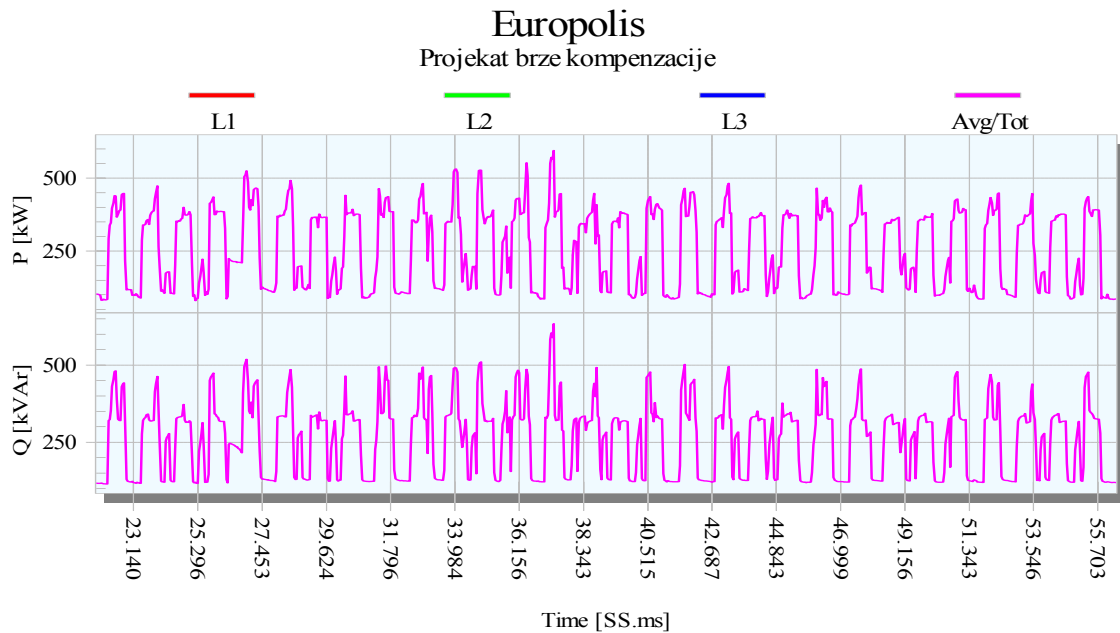
Važno je napomenuti da klasični tiristorski regulatori reaktivne snage, i pored velike brzine reagovanja, ne mogu ispratiti ovako brze promene reaktivne snage – kao što su u pogonu armaturnih mreža.

Klasični komercijalni regulatori za tiristorsku kompenzaciju, u praktičnim uslovima, imaju sledeća ograničenja:

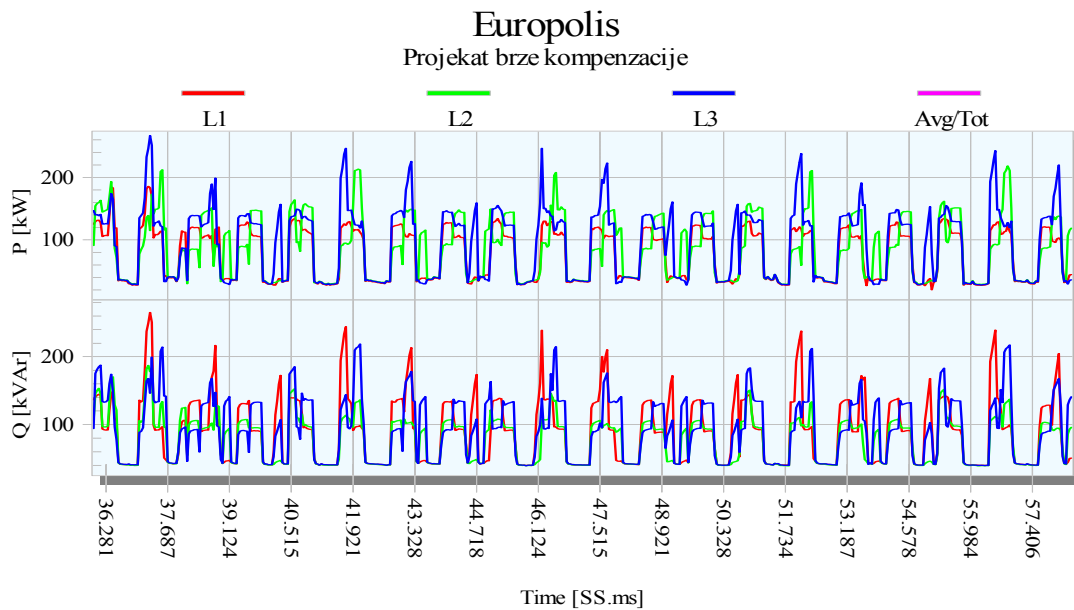
1. vremena reagovanja u praksi su značajno duža od deklariranih vremena: uobičajeno je da se vreme uključenja definiše kao minimalno vreme za koje regulator uključuje prvi korak, ali ta definicija nije odgovarajuća za zavarivački pogon. Kod intermitentnih pogona (ciklus koji se ponavlja u kratkim vremenskim intervalima), vreme uključenja zavisi ne samo od brzine procesora već i od toga koliko često se ponavlja ciklus. Ovo je vezano za vreme pražnjenja baterije, tj. korak se ne može uključiti dok se ne osigura da je razlika napona mreže i zaostalog napona baterije u trenutku uključenja dovoljno mala. Većina proizvođača deklarirše samo vreme uključenja prema brzini procesora, tj. u idealnim uslovima, dok je u praksi to vreme značajno duže. Kod najboljih upravljačkih jedinica na tržištu efektivno vreme uključenja ide i do 1 sekunde. Odavde je jasno da nije svaki regulator pogodan za kompenzaciju reaktivne snage zavarivačkog pogona i pored naizgled zadovoljavajućih brzina reagovanja.
2. Koraci se uključuju sekvencijalno, tj. jedan po jedan, što je neprimenljivo u slučaju zavarivanja armaturnih mreža. To znači da dok se zavarivački impuls završi, regulator postepeno uključuje 1, 2 ili 3 koraka i po završetku zavarivačkog impulsa ovim regulatorima treba još toliko da isključe ove korake, a za to vreme postoji značajna prekompenzacija. Znači, upotreba klasičnih tiristorskih regulatora reaktivne snage dovela bi do neefikasne ukupne kompenzacije, povremene prekompenzacije i do dodatnih oscilacija i izobličenja napona i struja pogona. Ovakva sporost u reagovanju je naročito opasna jer se ne može detektovati bez mrežnog analizatora. Analiza računa za reaktivnu energiju pokazuje da su troškovi delimično smanjeni, ali tek mrežni analizator može pokazati da se radi o jako opasnom režimu rada koji dovodi do ubrzanog starenja opreme.

Da bi se napravila razlika između različitih tipova regulatora za tiristorsku kompenzaciju, oni regulatori koji imaju zadovoljavajuću efektivnu brzinu reagovanja i efikasne mehanizme upravljanja zaostalim naponom u kondenzatorskoj bateriji, nazivaju se i real-time regulatori.

Na slikama 2. i 3. prikazane su ukupne i pofazne snage zavarivačkog pogona. Reaktivna snaga koju treba kompenzovati iznosi oko 600 kVAr/fazi. Sa slike 2 se vidi da su oscilacije reaktivne snage izuzetno brze – oko 300 ms.




Slika 2. Ukupna aktivna i reaktivna snaga zavarivačkog pogona - pre

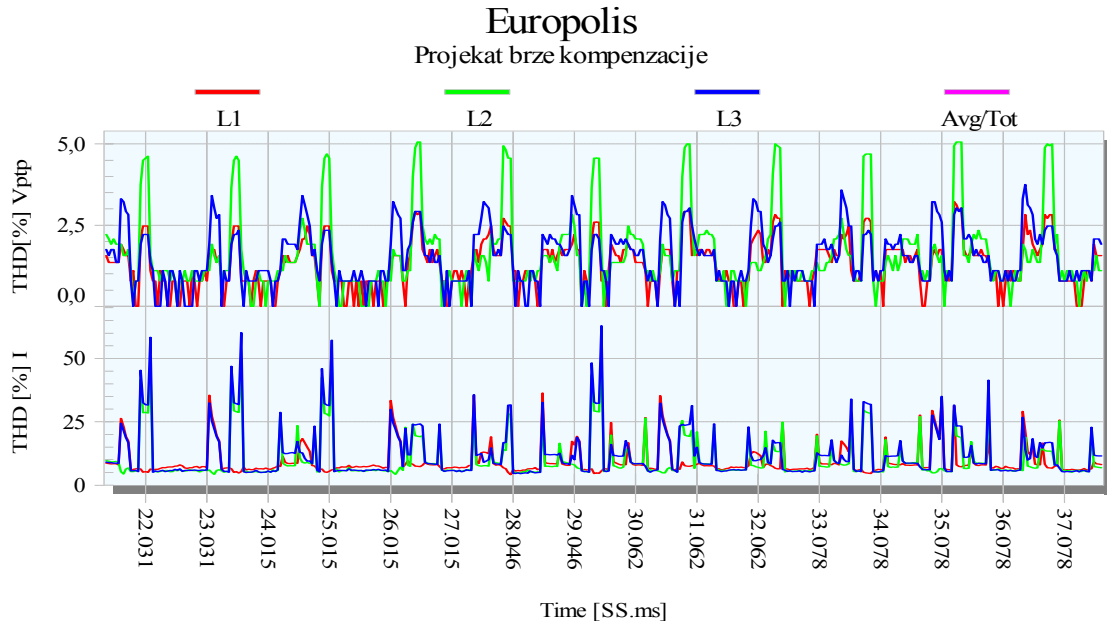


Slika 3. Pofazna aktivna i reaktivna snaga zavarivačkog pogona -pre

Na slici 4. prikazan je sadržaj viših harmonika, THD faktor napona i struja, tokom zavarivačkog ciklusa. Veoma važna napomena je da je prikazana karakteristika izmerena periodu po periodu napona tj. struje. Klasični mrežni analizatori THD faktor računaju po IEC50160 standardu tj. daju srednju vrednost na 10 perioda. U ovom slučaju ta metoda dovodi do pogrešnih rezultata, jer zavarivački ciklus upravo toliko i traje, a mernja bi morala biti sa nekoliko puta većom rezolucijom. Merenjem THD-a na nivou jedne periode dobija se

	Case study: Linija za tačkasto zavarivanje	бр. CS190909v1
		datum

precizna informacija o sadržaju viših harmonika i omogućava pouzdano projektovanje struje filterskog koraka i optimalne rezonantne učestanosti filtra.



Slika 4. THD faktori napona i struja tokom zavarivačkog ciklusa - pre

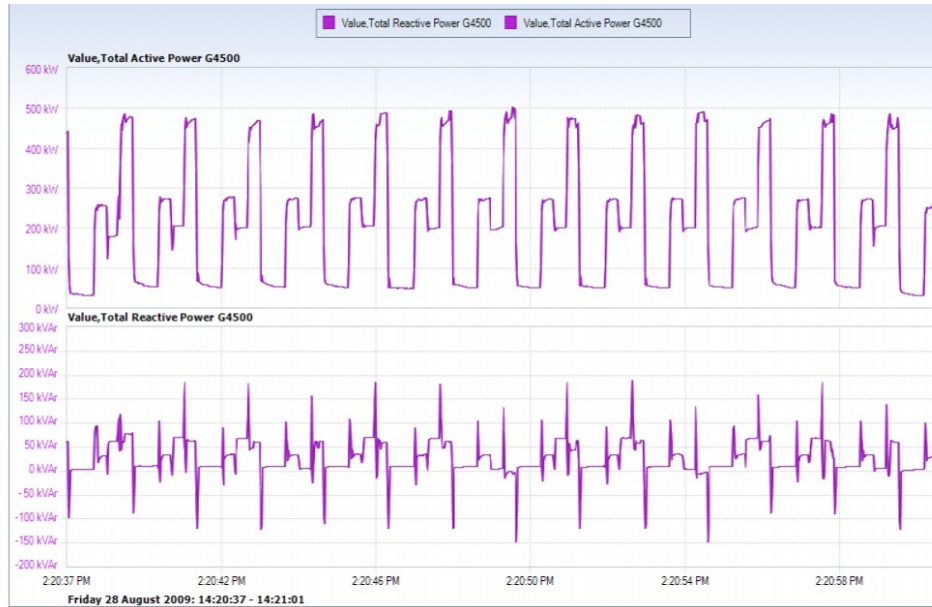
Na slici 4. vidi se da je THD faktor struje izuzetno visok i kreće se do 65%, što je očekivano s obzirom da se radi o elektrolučnom zavarivanju. Električni luk generiše više harmonike praktično ravnomerno po svim učestanostima, te se prilikom projektovanja opreme za kompenzaciju reaktivne snage mora voditi računa o izboru rezonantne učestanosti filterskog koraka. Standardna rešenja za industriju, detuned filtri ili apsorpcioni filtri ovde ne igraju nikakvu ulogu.

Primena klasične kompenzacije reaktivne snage (bez filtara) ili standardnih industrijskih detuned ili apsorpcionih filtara u ovom slučaju dovodi do rezonanse i velikog pogoršanja naponskih i strujnih izobličenja. Svaku rezonansu treba izbegavati jer se radi o nekontrolisanom procesu, sa nepredvidljivim posledicama.

Na osnovu svih merenja Avalon Partners je isprojektovao i ugradio opremu za kompenzaciju reaktivne snage sledećih karakteristika:

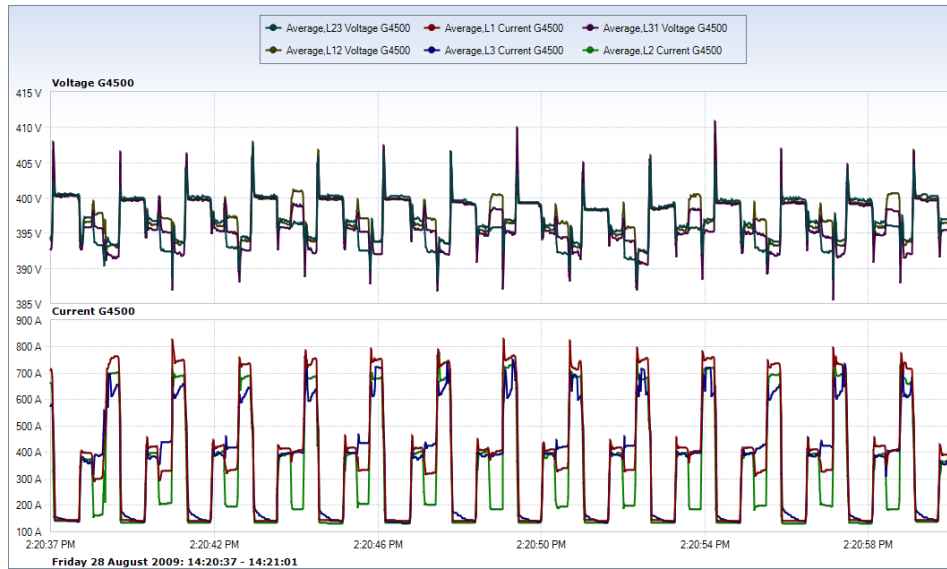
- regulacija u realnom vremenu (praktično trenutno)
- brzi tiristorski prekidači
- kratka efektivna vremena reagovanja - do 16 ms
- uključenje i isključenje kompletne snage ormana u jednom koraku
- specifična rezonantna učestanost filterskog koraka u cilju optimalnog filtriranja struje zavarivanja.

Na slikama 5.-8. prikazani su ostvareni rezultati.




Slika 5. Ukupna aktivna i reaktivna snaga - posle izvršene kompenzacije

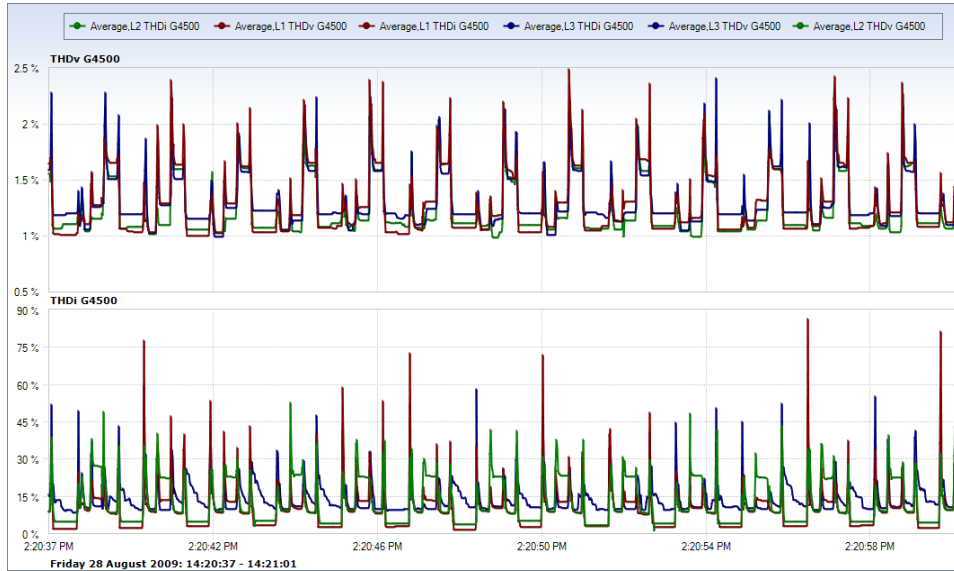
Na grafikonu aktivne snage (slika 5. gornji grafikon) vidi se da je aktivna snaga ostala nepromenjena u odnosu na režim pre kompenzacije. Na grafikonu reaktivne snage (slika 5. donji grafikon), vidi se da je srednja reaktivna snaga svedena na nivo oko 30 kVAr, u poređenju sa prosečnih 250-300 kVAr pre kompenzacije. Primetni su kratkotrajni pikovi reaktivne snage kao posledica ograničene brzine uključivanja koraka u trenutku kada strujni impuls počinje. S obzirom da se uključuje kompletna snaga ormana kompenzacije u jednom koraku reaktivna snaga praktično trenutno pada na nisku vrednost i sve što ostaje je jedan mali pik u snazi. Sličan proces događa se pri prestanku strujnog impulsa, tj. isključenja kompenzacionih koraka.



Slika 6. Efektivne vrednosti napona i struja tokom tačkastog zavarivanja - posle

	<p>Case study: Linija za tačkasto zavarivanje</p>	бр. CS190909v1
		датум

Na slici 6. prikazane su efektivne vrednosti napona i struja linije za zavarivanje po uključenju opreme za brzu kompenzaciju. Sa slike se vidi da je struja linije znatno niža, oko 750-800 A u odnosu na režim bez kompenzacije 1500 A. Pad napona je takođe znatno niži iznosi svega 3.25% i to samo u pikovima pri uspostavljanju luka, tokom zavarivačkog ciklusa pad napona je svega oko 2%. Ovako nizak pad napona tokom zavarivačkog ciklusa povoljno utiče na kvalitet zavara, čime oprema za kompenzaciju reaktivne snage direktno doprinosi poboljšanju kvaliteta završnog proizvoda.



Slika 7. Harmonijsko izobličenje napona i struja tokom tačkastog zavarivanja - posle


Na slici 7. prikazani su THD faktori napona i struje posle uključenja filterske kompenzacije. THD faktor napona se kreće ispod 2%, sa kratkotrajnim povremenim skokovima do 2.5%, što je odličan rezultat u poređenju sa 5% pre kompenzacije. THD struje je oko 70%, što za efektivnu vrednost struje od 800A daje oko 560 A struje viših harmonika – u poređenju sa 975 A pre kompenzacije (65% pri 1500 A). Ovako snižen sadržaj viših harmonika struje povoljno utiče na prenosne vodove i transformator, sa stanovišta sniženja gubitaka i smanjenog zagrevanja.

Tabela: Uporedni rezultati pre i posle ugradnje opreme za ultra brzu kompenzaciju reaktivne snage

	$\Delta U$ [%]	THD U [%]	THD I [A]	Imax [A]	Qmax [kVAr]
Pre	7	5	975	1500	650
posle	3.25	2.5	560	800	100

**Zaključak:** Elektrolučno zavarivanje je proces u kome električni luk generiše više harmonike struje ravnomerno po čitavom spektru. Ovime je primena klasičnih industrijskih filterskih rešenja za kompenzaciju reaktivne snage nemoguća. Dodatno, struje zavarivanja su nesimetrične i razlikuju se po fazama i do dva puta, što onemogućava upotrebu opreme sa trofaznim prekidačima. Dodatno zavarivački strujni impulsi su velike amplitude i do 1500 A i traju jako kratko – 200 ms. Odavde je jasno da je nemoguće primeniti klasične tiristorske regulatore reaktivne snage koji rade sa dugačkim vremenima uključenja i uključuju



	Case study: Linija za tačkasto zavarivanje	бр. CS190909v1
		datum

sekvencijalno korak po korak. U ovom slučaju isprojektovana je i ugrađena specifična oprema za kompenzaciju reaktivne snage u realnom vremenu (16 ms efektivna brzina reagovanja), regulacija sa uključenjem kompletne snage u jednom koraku, raspregnuta regulacija po fazama, ultra brzi tiristorski prekidači velike snage, rezonantna učestanost filterskih koraka prilagođena spektru zavarivačke struje. Posao je uspešno završen, pogon radi mirno, oscilacije napona su minimizovane (poboljšan kvalitet zavara), smanjeni su flikeri i harmonici u naponu i struji pogona, reaktivna snaga je kompenzovana i računi za struju smanjeni.

**Napomena:** Svi prezentirani podaci i snimci su izmereni na konkretnim objektima. Svi rezultati su realni i ni na koji način nisu izmenjeni ili prilagođavani. Svi navedeni radovi su izvedeni od strane Avalon Partners d.o.o.. Sve proračune izvršile su ovlašćene osobe zaposlene u Avalon Partners d.o.o.. Avalon Partners ne snosi nikakvu odgovornost za pogrešno interpretiranje ili nestručnu primenu podataka navedenih u ovom izveštaju. Svi grafikoni su izmereni od strane Avalon Partners d.o.o. i kao takvi su vlasništvo Avalon Partners d.o.o., te se ne smeju umnožavati ili distribuirati bez izričitog odobrenja Avalon Partners d.o.o.