

# Kompenziranje jalove snage na niskonaponskom djelu mreže u tvornici lakih metala

---

Mihalić, Marko

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:491530>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

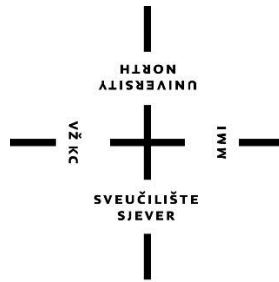
Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-30**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





# **Sveučilište Sjever**

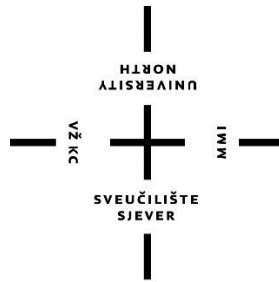
**Završni rad br. 371/EL/2016**

## **Kompenziranje jalove snage na niskonaponskom dijelu mreže u tvornici lakih metala**

**Marko Mihalić, 1161/601**

Varaždin, ožujak 2016. godine





# **Sveučilište Sjever**

**Elektrotehnika**

**Završni rad br. 371/EL/2016**

## **Kompenziranje jalove snage na niskonaponskom dijelu mreže u tvornici lakih metala**

**Student**

Marko Mihalić, 1161/601

**Mentor**

Stanko Vincek, struč.spec.ing.el.

Varaždin, ožujak 2016. godine

## Sažetak

U radu su obrađene osnove izmjenične struje i prilike u mreži kod priključenja različitih tereta, te je objašnjena problematika jalove energije. Rad se bavi uređajima za kompenzaciju jalove energije od samog proračuna i odabira komponenata pa sve do ugradnje gotovog proizvoda. Istaknute su tehničke i ekonomske prednosti ugradnje kompenzacijskog uređaja. Detaljno su objašnjene komponente automatskog prigušenog uređaja za kompenzaciju jalove energije tip ERG QAPL 090-7. Prijenosnim analizatorom mreže Dranetz 4400 je obavljeno mjerenje prilika u mreži prije, tokom, i nakon ugradnje kompenzacijskog uređaja. Rezultati su prikazani dijagramima gdje je jasno vidljiv utjecaj kompenzacije na mrežu. Kompenzacijski uređaj ispitan je u pogonskom stanju termo kamerom Fluke Ti32, mjerenje je prikazano kroz slike i opisana su bitna zapažanja.

### KLJUČNE RIJEČI:

Izmjenična struja, snaga, jalova energija, kompenzacija, kondenzatorska baterija

## **Abstract**

In the paper are processed the basics of alternating current and conditions in the network with connection of different loads, also explain the problem of reactive power. The paper deals with devices for compensation of reactive power from the calculation and selecting components through to the installation of the finished product. Highlighted are the technical and economic benefits of using compensating device. Components of automatic detuned compensation device are explained in detail for device type ERG QAPL 090-7. Condition in network is measured with portable network analyzer Dranetz 4400 before, during, and after installation of compensating devices. The results are shown on diagrams where is clearly visible the impact of compensating device on the network. Compensating device has been tested in operating condition with thermal camera Fluke Ti32, results of measurements is shown through pictures and important observations are described.

### **KEY WORDS:**

Alternating current, power, reactive power, compensation, capacitor

# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za elektrotehniku		
PRISTUPNIK	Marko Mihalić	MATIČNI BROJ	1161/601
DATUM	18.02.2016.	KOLEGIJ	Osnove elektrotehnike II
NASLOV RADA	Kompenziranje jalove snage na niskonaponskom djelu mreže u tvornici lakih metala		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Reactive power compensation on low-voltage part of network in the light metals factory		
MENTOR	Stanko Vincek, struč.spec.ing.el.	ZVANJE	Predavač
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. dr.sc. Ladislav Havaš (predsjednik)		
	2. Stanko Vincek, struč.spec.ing.el (mentor)		
	3. mr.sc. Ivan Šumiga (član)		
	4. _____		
	5. _____		

## Zadatak završnog rada

BROJ	371/EL/2016
OPIS	<p>U radu je potrebno obraditi osnovne značajke izmjenične struje, te kroz spajanje različitih vrsta tereta na mrežu opisati i objasniti prilike u električnoj mreži. Zatim je potrebno obraditi pojam snage i energije izmjenične struje, kompenzaciju jalove energije. Objasniti razlike između pojedinih načina kompenzacije (pojedinačna, grupna, centralna). Kroz primjer iz prakse proračunati i projektirati uređaj za kompenzaciju jalove energije i uređaj za prigušenje viših harmonika. Na lokaciji ugradnje kompenzacijskog uređaja napraviti mjerenja prije ugradnje i nakon ugradnje, dobivene rezultate mjerenja je potrebno usporediti i komentirati.</p>

ZADATAK URUČEN

25.2.2016



*SM*

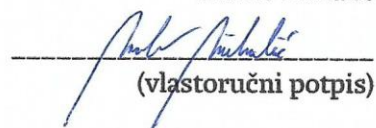
**IZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU**

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Marko Mihalić pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor završnog rada pod naslovom Kompenziranje jalove snage na niskonaponskom dijelu mreže u tvornici lakih metala te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:

Marko Mihalić

  
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Marko Mihalić neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom završnog rada pod naslovom Kompenziranje jalove snage na niskonaponskom dijelu mreže u tvornici lakih metala čiji sam autor.

Student:

Marko Mihalić





## Popis korištenih kratica i oznaka

<b>AC</b>	Od engl. alternating current – hrv. izmjenična struje
<b>c</b>	Faktor preračunavanja
<b>C</b>	Kapacitet kondenzatora
<b>CT</b>	Od engl. current transformer – hrv. strujni transformator
<b>cosφ</b>	Faktor snage
<b>DC</b>	Od engl. direct current – hrv. istosmjerna struja
<b>FG7(O)R</b>	Energetski fleksibilni kabel izoliran tvrdom EPM-gumom i oplošten PVC-om
<b>f</b>	Frekvencija
<b>f<sub>r</sub></b>	Rezonantna frekvencija
<b>I</b>	Efektivna vrijednost struje
<b>I<sub>C</sub></b>	Struja kroz kapacitet
<b>I<sub>L</sub></b>	Struja kroz induktivitet
<b>I<sub>m</sub></b>	Vršna vrijednost struje
<b>JEN J1</b>	Induktivna jalova energija (na računu)
<b>JEN J2</b>	Kapacitivna jalova energija (na računu)
<b>L</b>	Induktivitet prigušnice
<b>m</b>	Masa
<b>M</b>	Motor
<b>MKP</b>	Od engl. metalized polypropylene – hrv. metalizirani polipropilen
<b>MTU</b>	Mrežno tonfrekventno upravljanje
<b>N<sub>c</sub></b>	Snaga kondenzatora na određenom naponu
<b>P</b>	Radna snaga
<b>p</b>	Faktor prigušenja
<b>P<sub>g</sub></b>	Snaga gubitaka
<b>P/F</b>	PVC-om izolirani vodič / finožični
<b>R</b>	Otpor
<b>RVT R1</b>	Radna energija obračunata po višoj tarifi
<b>RNT R2</b>	Radna energija obračunata po nižoj tarifi
<b>S</b>	Prividna snaga
<b>t</b>	Vrijeme
<b>T</b>	Perioda
<b>THD-I</b>	Od engl. total harmonic distortion of current – hrv. ukupno harmoničko izobličenje struje
<b>THD-V</b>	Od engl. total harmonic distortion of voltage – hrv. ukupno harmoničko izobličenje napona
<b>U</b>	Efektivna vrijednost napona
<b>U<sub>C</sub></b>	Napon na kondenzatoru
<b>Q</b>	Jalova snaga
<b>Q<sub>C</sub></b>	Jalova snaga na kapacitetu
<b>Q<sub>N</sub></b>	Nazivna snaga kompenzacijskog uređaja
<b>W</b>	Rad izmjenične struje
<b>W<sub>j</sub></b>	Jalova energija
<b>W<sub>r</sub></b>	Radna energija
<b>X<sub>C</sub></b>	Kapacitivni otpor
<b>X<sub>L</sub></b>	Induktivni otpor
<b>ω</b>	Kružna frekvencija

# Sadržaj

<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>1. IZMJENIČNA STRUJA.....</b>	<b>3</b>
1.1. Osnovni pojmovi o izmjeničnoj struji.....	4
1.2. Strujni krug izmjenične struje.....	5
1.2.1. Omski teret.....	5
1.2.2. Kapacitivni teret.....	6
1.2.3. Induktivni teret.....	6
1.3. Serijski RLC spoj.....	7
1.4. Paralelni RLC spoj.....	8
<b>2. SNAGA I ENERGIJA IZMJENIČNE STRUJE.....</b>	<b>9</b>
2.1. Radna snaga.....	10
2.2. Jalova snaga.....	10
2.3. Prividna snaga.....	11
<b>3. KOMPENZACIJA JALOVE SNAGE.....</b>	<b>12</b>
3.1. Proračun snage uređaja za kompenzaciju.....	12
3.2. Regulacija jalove snage.....	15
3.2.1. Pojedinačna kompenzacija.....	15
3.2.2. Grupna kompenzacija.....	16
3.2.3. Centralna kompenzacija.....	17
<b>4. INSTALACIJA UREĐAJA ZA KOMPENZACIJU JALOVE ENERGIJE.....</b>	<b>18</b>
4.1. Opći podaci o lokaciji ugradnje.....	18
4.2. Snimka postojećeg stanja.....	19
4.3. Proračun potrebne snage uređaja za kompenzaciju.....	19
4.4. Odabir adekvatnog uređaja za kompenzaciju.....	20
4.4.1. Odabir komponenata za automatski prigušeni kompenzacijski uređaj.....	20
4.4.2. Energetski dio kompenzacijskog uređaja.....	21
4.4.3. Upravljački dio kompenzacijskog uređaja.....	27
4.4.4. Spajanje i zaštita kompenzacijskog uređaja.....	34
4.5. Snimka novog stanja.....	37
<b>5. ISPITIVANJE TERMOVIZIJSKOM KAMEROM .....</b>	<b>42</b>
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>44</b>
<b>7. LITERATURA .....</b>	<b>45</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>46</b>
<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>47</b>
<b>PRILOZI .....</b>	<b>47</b>

## Uvod

U današnje vrijeme potražnja za električnom energijom raste svakodnevno i to u značajnoj mjeri, pa se i najveći svjetski distribucijski sustavi bore s ulaganjima kako bi održavali postojeće sustave, ali i izgradili nove, snažnije. Sve više pažnje pridodaje se kvaliteti električne energije. Za siguran i stabilan sustav veoma su važni parametri napona i jalove energije koji su ujedno i usko povezani.

Kako bi se osigurao maksimalan prijenos radne snage uz što manje gubitke, potrebno je što je više moguće smanjiti jalovu energiju koja prilikom prijenosa također opterećuje vodove. Takvo rasterećenje vodova je od značajne koristi za potrošača te ujedno i za mrežu, odnosno distributera budući da se izbjegava nepotreban pad napona i nepotrebnih gubici. Ako se promatra kroz prividnu snagu, potrošaču se otvara prostor za dodatno povećanje radne snage jer se smanjuje udio jalove u prividnoj snazi. Distributer električne energije naplaćuje naknadu u vidu prekomjerno preuzete jalove energije svim potrošačima (osim kućanstvima) koji na mjestu potrošnje ne ostvaruju faktor snage 0,95 ili veći. Time distributer električne energije potiče kompenziranje jalove snage što bliže potrošačima, kako bi se smanjio prijenos iste. Najveći problem su industrijska postrojenja koja sadrže asinkrone elektromotorne pogone, transformatore, indukcijske peći, uređaje za zavarivanje i sl., odnosno induktivne potrošače s lošim faktorom snage.

Postoje razni načini kompenziranja jalove energije, međutim najučestaliji način kompenziranja je pomoću kondenzatorskih baterija. Takvu vrstu kompenzacija odlikuje brza ekonomska isplativost, minimalna potreba za servisiranjem, te brojne mogućnosti nadogradnje zbog modularnosti samog uređaja. Ukoliko se ne odabere pravilan uređaj (snaga, regulacija) može doći do prekompenziranja sustava. U tom slučaju vodovima se prenosi kapacitivna jalova energija koja jednako opterećuje vodove kao i induktivna, pa ju je isto poželjno izbjeći.

Potrebno je obratiti pažnju na još jedan parametar, a to su viši harmonici. Problem proizlazi od nelinearnih električnih potrošača koji remete sinusoidalni oblik napona. Viši harmonici mogu imati veoma štetne posljedice za neke potrošače pa također i za kompenzacijski uređaj. Naime, ukoliko se uspostavi rezonancija između reaktancije transformatora (mreže) i kapaciteta kondenzatora, tada dolazi do visokih harmoničkih napona koji su veoma štetni te mogu imati drastične posljedice.

Taj problem može se izbjeći ugradnjom filtarskih prigušnica u kompenzacijskim uređajima, tako da serijski spoj prigušnice i kondenzatora na frekvencijama viših harmonika ima induktivan karakter čime je spriječena mogućnost rezonancije i svih njezinih štetnih posljedica.

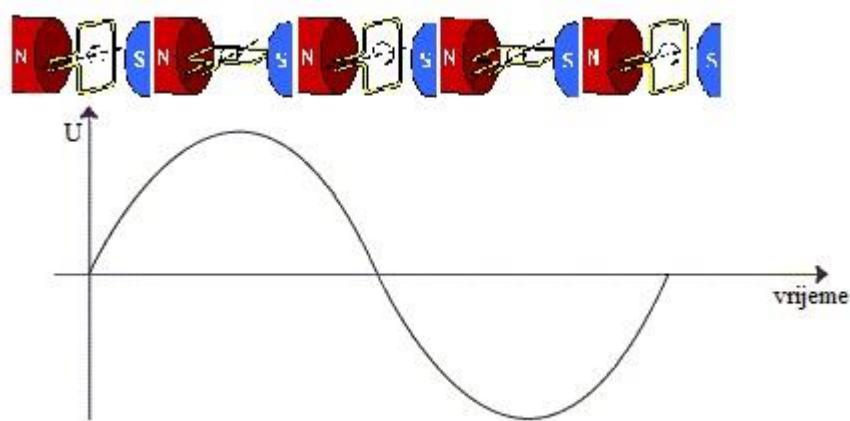
Kroz rad su objašnjene osnove izmjenične struje i utjecaj različitih tereta na strujni krug. Time se ulazi u problematiku jalove energije i kompenziranja iste. Najviše pažnje u radu je usmjereno

na kompenziranje jalove energije pomoću kondenzatorskih baterija. Budući da je veoma važno pravilno dimenzionirati sve komponente uređaja za kompenzaciju, kroz rad je na primjeru iz prakse prikazan postupak od proračuna i odabira uređaja pa sve do ugradnje i postignutih rezultata. Kako bi se najbolje pokazalo što se postiže ugradnjom kompenzacijskog uređaja, izvršeno je mjerenje prijenosnim analizatorom mreže Dranetz 4400. Mjerenje je započeto tokom normalnog rada pogona bez kompenzacije, a završeno je nakon ugradnje, puštanja u rad i testiranja kompenzacijskog uređaja. Rezultati mjerenja obrađeni su u programu Dran-View 6, te su u ovom radu prikazani kroz dijagrame koji su detaljno objašnjeni. Tokom normalnog pogonskog rada obavljeno je snimanje termovizijskom kamerom Fluke Ti32 na uređaju za kompenzaciju. Snimanje je obavljeno da bi se pokazala ispravnost spojnih mjesta i uočile problematične točke. Rezultati snimanja su prikazani kroz detaljno objašnjene slike.

# 1. IZMJENIČNA STRUJA

Električnom strujom naziva se usmjereni protjecanje elektrona. Istosmjerna struja (međunarodna oznaka DC od engl. direct current) teče stalno istim smjerom, kod izmjenične struje (međunarodna oznaka AC od engl. alternating current) to nije slučaj, već se smjer struje mijenja periodički s vremenom.

Okretanjem vodiča oblika petlje u homogenom magnetskom polju u vodiču se inducira izmjenični napon, ako se krajevi tog vodiča zatvore u strujni krug tada poteče izmjenična struja. Inducirani napon je proporcionalan brzini promjene magnetskog toka koji petlja obuhvaća u određenom vremenu (slika 1.1).



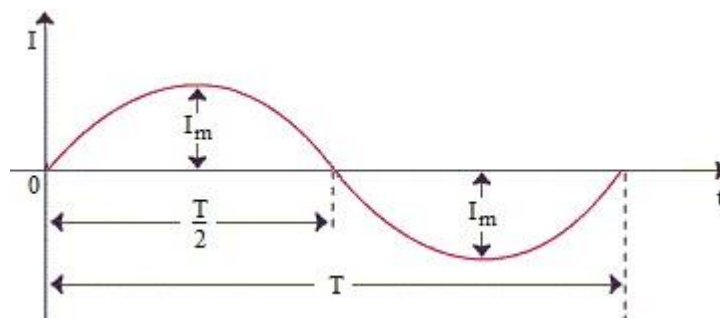
*Slika 1.1 Inducirani napon kod vrtnje svitka u homogenom magnetskom polju[1]*

Kod izmjenične struje uz promjenu smjera mijenja se i napon, a time i jakost. Doduše nije nužno da te veličine izmjenične struje budu pravilne u vremenu kao ni simetrične u oba smjera.

Ako u homogenom magnetskom polju postoje tri vodiča koji su simetrično postavljeni na obodu kruga rotacije, tada će se u njima inducirati jednak izmjenični napon koji se od vodiča do vodiča razlikuje jedino po fazi. Kako bi se u generatorima trofaznih sustava postigao jednaki inducirani trofazni napon vodiči su postavljeni tako da miruju dok se homogeno magnetsko polje okreće. [2]

## 1.1. Osnovni pojmovi o izmjeničnoj struji

Izmjenična struja prikazuje se grafički kroz vremenski dijagram:



Slika 1.2 Vremenski dijagram izmjenične struje [3]

Trenutne vrijednosti struje u vremenu slijede oblik sinusne funkcije, takva struja naziva se harmonička struja.

Osnovne oznake u izmjeničnoj struji:

- Perioda  $T$  (s) – trajanje jednog titraja sinusoide. U tom vremenu struja poraste od nule do pozitivne vršne vrijednosti (tjemene), pa zatim pada do nule te prelazi u negativno područje do svog negativnog maksimuma nakon čega se opet vraća na nulu
- Frekvencija  $f$  (Hz) – broj titraja u sekundi.

$$f = \frac{1}{T} \quad 1-1$$

- Kružna frekvencija  $\omega$  (rad/s) – brzina promjene kuta sinusne funkcije s vremenom

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2\pi}{T} \quad 1-2$$

- Vršna vrijednost  $I_m$  (A) – najveća vrijednost sinusoide struje
- Efektivna vrijednost struje  $I$  (A) – je vrijednost koju bi trebala imati istosmjerna struja da proizvede jednaki toplinski učinak kao i ta izmjenična struja

$$I = 0,707 \cdot I_m \quad 1-3$$

## 1.2. Strujni krug izmjenične struje

Strujnim krugovima izmjenične struje nazivaju se oni električni krugovi u kojima djeluju izvori sinusoidno promjenjivog napona ili struje. Ukoliko je u električnom krugu više izvora tada se isti naziva električna mreža. Treba istaknuti trofazne mreže, gdje se na poseban način povezuju sustavi izvora, prijenosnih vodova i trošila. Takva mreža naziva se trofazni sustav. [4]

Osnovni elementi krugova izmjenične struje su:

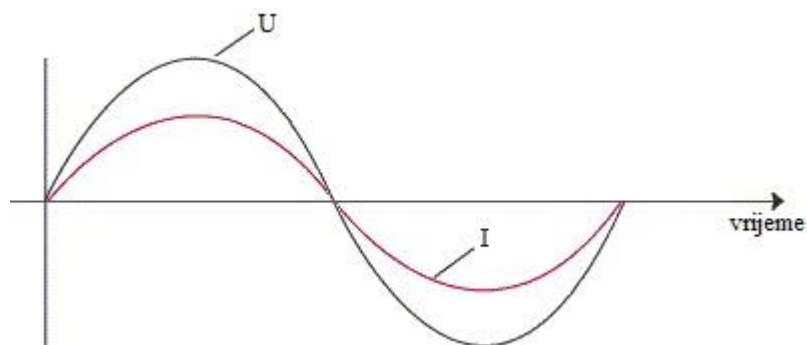
- izvor sinusoidnih napona i struja
- otpor R
- kapacitet C
- induktivitet L

### 1.2.1. Omski teret

Na otporu su napon i struja u svakom trenutku povezani Ohmovim zakonom:

$$R = \frac{U}{I} \quad 1-4$$

Sinusoida napona na otporu ima maksimume i nule istovremeno kad i sinusoida struje. U tom slučaju nema faznog pomaka između struje i napona pa se kaže da su struja i napon u fazi.



Slika 1.3 Vremenski dijagram struje i napona kod omskog tereta [3]

Snaga na otporu naziva se radna snaga, ona je jednaka srednjoj vrijednosti trenutne snage i računa se prema izrazu:

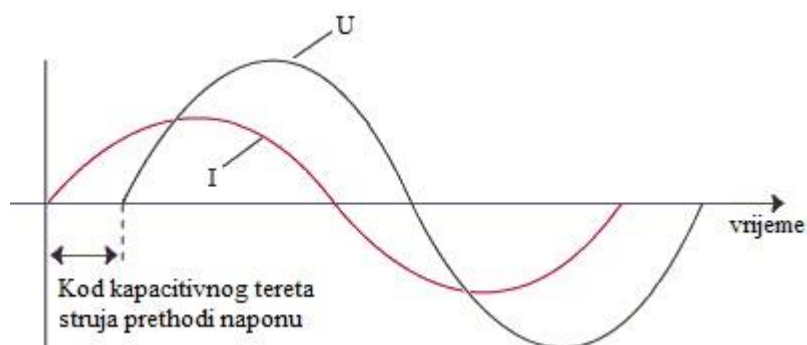
$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R \text{ [W]} \quad 1-5$$

Snaga na otporu sinusno oscilira između najveće vrijednosti i nule s dva puta većom frekvencijom od frekvencije napona i struje. Kod izmjenične struje na otporu se troši električna energija.

### 1.2.2. Kapacitivni teret

Kad se na izmjenični napon spoji kapacitivni element odnosno kondenzator, on se zbog stalne promjene napona naizmjenično nabija i izbija. U tom slučaju naboj naizmjenično prelazi na ploče kondenzatora i silazi s njih, pa kroz kondenzator teče izmjenična struja. Kapacitivnim otporom ( $X_C$ ) naziva se otpor koji kapacitet predstavlja izmjeničnoj struji, a određen je omjerom vršnih i efektivnih vrijednosti napona i struje. Taj otpor je obrnuto razmjeran frekvenciji.

Prilikom nabijanja idealnog kondenzatora struja je najveća u trenutku kad je napon na kondenzatoru jednak nuli, a najmanja odnosno nula kad je napon najveći, tada je ujedno i kondenzator nabijen. Iz toga se zaključuje da postoji fazni pomak, odnosno da struja i napon nisu u fazi, već da struja prethodi naponu (kod idealnog kapacitivnog tereta prethodi za  $90^\circ$ ).



Slika 1.4 Vremenski dijagram struje i napona kod kapacitivnog tereta [3]

Prati li se energija na kapacitetu, primjetno je da kapacitet u jednoj poluperiodi prima određenu količinu energije, dok u drugoj poluperiodi istu količinu energije vraća. Prema tome srednja vrijednost snage, odnosno radna snaga na kapacitetu je nula. Iz toga se zaključuje da se na kapacitetu ne troši energija, već se ona naizmjenično pohranjuje i vraća u krug.

Kada se pomnože efektivne vrijednosti napona i struje dobije se snaga na kapacitetu koja se naziva jalova snaga a računa se po izrazu:

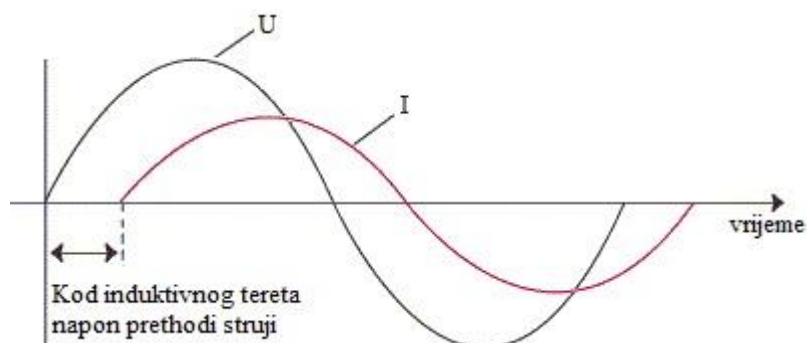
$$Q_C = U \cdot I = \frac{U^2}{X_C} = I^2 \cdot X_C [\text{VAr}] \quad 1-6$$

### 1.2.3. Induktivni teret

Kada kroz induktivni teret, odnosno svitak, teče izmjenična struja, zbog njenog vremenskog mijenjanja javlja se napon samoindukcije na induktivitetu. Otpor koji induktivitet predstavlja izmjeničnoj struji naziva se induktivni otpor ( $X_L$ ), a određen je omjerom napona i struje. S porastom frekvencije raste i induktivni otpor, pa se zaključuje da je on razmjeran frekvenciji. Kod



idealnog induktivnog tereta struja je jednaka nuli u trenutku kada je napon najveći, nakon čega slijedi pad napona i porast struje sve do trenutka kad struja dosegne najveći iznos a napon se izjednači s nulom. Između struje i napona postoji fazni pomak, gdje napon prethodi struji. Kod idealnog induktiviteta taj fazni pomak iznosi  $90^\circ$ .



Slika 1.5 Vremenski dijagram struje i napona kod induktivnog tereta [3]

Srednja vrijednost snage na induktivnom teretu jednaka je nuli, jer zbog faznog pomaka struje i napona sinusoida trenutne snage ima pozitivan i negativan dio koji su međusobno jednaki. Evidentno je da se energija ne troši na induktivitetu, već se pohranjuje u svitku u vidu stvaranja magnetskog polja koje se zatim razgrađuje odnosno energija se vraća natrag u krug.

Pomnože li se efektivne vrijednosti napona i struje dobije se snaga na induktivitetu, ta snaga se naziva jalova snaga isto kao i kod kapacitivnog tereta. Može se izračunati sljedećim izrazom:

$$Q_c = U \cdot I = \frac{U^2}{X_L} = I^2 \cdot X_L [\text{VAr}] \quad 1-7$$

### 1.3. Serijski RLC spoj

U realnim strujnim krugovima susreće se kombinacija različitih tereta povezanih u jedan strujni krug. Jedna od kombinacija je serijski spoj omskog, induktivnog i kapacitivnog tereta. Zna se da napon na induktivnom teretu prethodi struji za  $90^\circ$ , dok na kapacitivnom teretu napon zaostaje za strujom za  $90^\circ$ , pa između njih postoji fazni pomak za  $180^\circ$ , a rezultatni napon je tada jednak algebarskoj razlici tih napona. Očito je da između ta dva tereta može doći do neposredne razmjene energije kapacitivnog i induktivnog karaktera, ali budući da su vremenski suprotno orijentirane njihova razlika može biti izražena samo izvan strujnog kruga. Ako u određenim uvjetima dođe do potpune kompenzacije, odnosno da se utjecaj induktivnog i kapacitivnog tereta u potpunosti izjednači, tada u strujnom krugu preostaje samo omski otpor. Ta pojava naziva se rezonancija. Najveću vrijednost u serijskom RLC spoju tokom rezonancije imaju struja i radna snaga.

Zanimljivo je da tada na svakom reaktivnom elementu postoji napon, iako je ukupni napon na reaktivnim elementima jednak nuli.

U području jake struje serijska rezonancija je štetna jer povišeni naponi na pojedinim elementima mogu izazvati njihovo oštećenje. Doduše u elektronici se serijska rezonancija korisno upotrebljava na raznim područjima.

U serijskom RLC spoju energija titra između induktivnih i kapacitivnih elemenata kruga, pa se takvi krugovi nazivaju titrajni krugovi. Oni se najčešće koriste u telekomunikacijama, gdje se stvaraju i primaju elektromagnetski titraji.

U takvim titrajnim krugovima gleda se koliko energije troši krug u rezonanciji, i traži se da to bude čim manje. Mjera kojom se to izražava naziva se faktor dobrote kruga, a definirana je omjerom napona na induktivitetu (ili kapacitetu) i napona izvora u rezonanciji.

Frekvencija kod koje nastupa rezonancija naziva se rezonantna frekvencija, a računa se po sljedećoj formuli:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}} \text{ [Hz]} \quad 1-8$$

Fazni pomak odnosno faktor snage serijskog RLC spoja ovisi o odnosu otpora elemenata u krugu i kreće se u granicama od 0 do 1 te ima induktivni ili kapacitivni karakter.

#### **1.4. Paralelni RLC spoj**

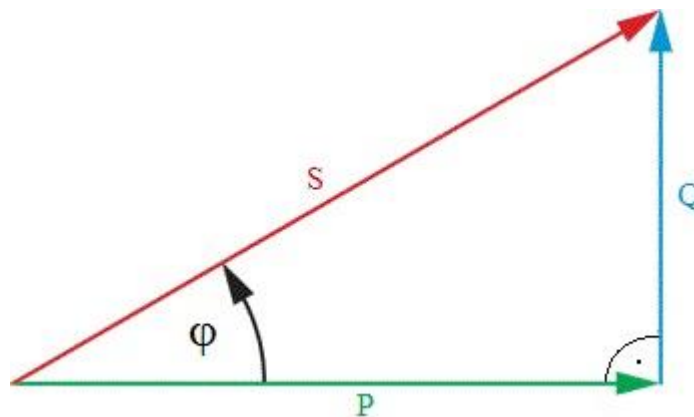
Struja paralelnog RLC spoja jednaka je razlici struje  $I_C$  (struja kroz kapacitet) i  $I_L$  (struja kroz induktivitet), a u smjeru je veće od tih struja zbog toga jer su te dvije struje suprotnih smjerova. U slučaju da su te dvije struje istog iznosa, tada je ukupna struja LC spoja jednaka nuli a gledajuću cijeli RLC spoj sva struja izvora tada teče kroz otpor. Tu pojavu u paralelnom RLC spoju nazivamo paralelna rezonancija ili strujna rezonancija. U slučaju rezonancije, struja je u fazi s naponom.

Kao i u serijskom RLC spoju tako i u paralelnom RLC spoju energija oscilira odnosno titra između induktivnih i kapacitivnih elemenata. Takav krug naziva još i paralelan titrajni krug u kojem se vanjskim izvorom samo nadoknađuje energija gubitaka, te se traži da ta energija bude čim manja. To se mjeri faktorom dobrote kruga koji je definiran omjerom struje kroz induktivitet ili kapacitet i ukupne struje u rezonanciji.

Rezonantnu frekvenciju paralelnog RLC spoja računamo po istoj formuli (1-8) kao i kod serijskog RLC spoja. [4]

## 2. SNAGA I ENERGIJA IZMJENIČNE STRUJE

Snaga izmjenične struje prikazuje se trokutom snage:



Slika 2.1 Trokut snage [5]

Na trokutu snaga najbolje se vidi odnos radne (P), jalove (Q) i prividne snage (S), te se svaku od njih može izračunati izrazom:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad 2-1$$

Kut  $\varphi$  je kod savršenog omskog tereta jednak nuli, a dok kod induktivnog tereta iznosi  $0 < \varphi < 90^\circ$ , kod kapacitivnog tereta je  $-90 < \varphi < 0$ .

Faktor snage je definiran kao kosinus kuta  $\varphi$  koji se može odrediti pomoću trigonometrijskih funkcija pravokutnog trokuta. Tako je kosinus kuta  $\varphi$  definiran kao omjer priležeće katete i hipotenuze, što prema trokutu snaga iznosi da je to omjer radne i prividne snage.

Rad izmjenične struje  $W$  predstavlja potrošenu energiju, odnosno električnu energiju koja se u trošilu pretvara u neki drugi oblik energije. Rad izmjenične struje definiran je radnom snagom, a kako kod opterećenja u potpunosti kapacitivnim ili induktivnim teretom nema radne snage pa je i rad jednak nuli. Ali kad postoji kombinirani teret, induktivno-omski ili kapacitivno-omski tada na izvršeni rad utječe i faktor snage  $\cos\varphi$ , pa je tako u nekom vremenu  $t$  izvršen sljedeći rad:

$$W = P \cdot t \cdot \cos\varphi [Wh] \quad 2-2$$

## 2.1. Radna snaga

Pošto se kod izmjenične struje napon i struja stalno mijenjaju, trenutnu snagu dobije se množenjem trenutnih vrijednosti napona i struje. Promatraju li se samo omski tereti u strujnom krugu izmjenične struje, između struje i napona ne postoji fazni pomak, pa su tako struja i napon u svakom trenu oboje pozitivni ili oboje negativni. Ako se pomnože tako samo pozitivne vrijednosti, odnosno u drugom slučaju samo negativne vrijednosti uvijek se dobije pozitivna vrijednost. Iz toga se zaključuje da se električna energija kreće prema trošilu u kojem se u cijelosti pretvara u drugi oblik energije, primjerice u toplinu ili svjetlo. Snaga te energije naziva se radna snaga ( $P$ ), ona također kao i napon i struja ima sinusoidalni oblik, ali je frekvencija dva puta veća od frekvencije napona i struje. U praksi na mreži nisu samo trošila omskog karaktera već i induktivnog i kapacitivnog, pa kako bi u takvom okruženju izračunali radnu snagu koristi se sljedeći izraz

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi [W] \quad 2-3$$

## 2.2. Jalova snaga

Promatra li se strujni krug izmjenične struje koji sadrži samo idealne kapacitivne ili induktivne terete, tada je vidljiv fazni pomak između struje i napona za kut od  $90^\circ$ . Pomnože li se za takav slučaj trenutne vrijednosti struje i napona dobiju se pozitivne i negativne vrijednosti snage, gdje negativna snaga predstavlja snagu energije koja se vraća iz trošila natrag u izvor. Ta snaga naziva se jalova snaga  $Q$ . Kod potpuno induktivnog ili kapacitivnog opterećenja sva energija se vraća natrag u izvor, u takvom slučaju bi tekla struja ali se ne bi trošila električna energija. Kako su u praksi na mrežu spojeni različiti tereti, udio jalove snage računa se prema sljedećoj formuli:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi [VAr] \quad 2-4$$

Jalova energija se ne troši već se izmjenjuje između izvora i reaktivnih elemenata, doduše ona opterećuje vodove kojima se prenosi pa se na tim vodovima stvaraju neželjeni gubitci.

### 2.3. Prividna snaga

U praksi sva induktivna i kapacitivna trošila imaju i omski otpor tako da fazni pomak nikad nije  $90^\circ$ . Preračuna li se to u snagu, dolazi se do zaključka da je električna energija koja dolazi u trošilo uvijek veća od električne energije koja se vraća u izvor. Prema tome evidentno je da se jedan dio električne energije troši, odnosno pretvara u drugi oblik energije u trošilu. Iskorišteni dio energije bit će veći što je fazni pomak manji, odnosno faktor snage  $\cos\varphi$  veći. Ovisno o faznom pomaku, snaga koju trošilo prima može biti:

- $\varphi = 90^\circ$  – potpuno neiskorištena
- $0 < \varphi < 90^\circ$  – djelomično iskorištena
- $\varphi = 0^\circ$  – potpuno iskorištena

Prema tome računajući bez faznog pomaka, odnosno samo množenjem napona i struje koju trošilo prima ne dobivamo pravi podatak o njegovoj djelotvornosti već samo njegovu prividnu snagu  $S$ . [6]

$$S = U \cdot I \text{ [VA]}$$

2-5

### 3. KOMPENZACIJA JALOVE SNAGE

Poznato je da se jalova snaga ne troši već se samo prenosi od izvora do reaktivnog elementa u strujnom krugu, te se opet vraća u izvor. Prijenosom jalove energije spojem vodovima stvaraju se gubici koje valja spriječiti, odnosno smanjiti što je više moguće. Kako u elektroenergetskoj mreži postoji više induktivnih potrošača, najčešće dolazi do problema s induktivnom jalovom snagom. Najrasprostranjeniji induktivni tereti na mreži su zavojnice, motori, transformatori itd. [7]

Budući da kod induktivnog tereta napon prethodi struji, kako bi smanjili taj fazni pomak valja u strujni krug uključiti teret suprotnog karaktera, kapacitet. Time se iskoristi svojstvo kapaciteta da prima energiju kad ju induktivitet daje i obrnuto. U praksi se to izvodi dodavanjem kondenzatora. Poželjno je kondenzator dodati čim bliže induktivnom trošilu. Time se zapravo izjednačuju jalove komponente suprotnog karaktera u strujnom krugu, pa se zato taj postupak zove kompenzacija ili izjednačenje (od lat. *compensatio* – hrv. izjednačenje). [4]

Kompenziranjem jalove snage poboljšava se faktor snage. To poboljšanje može se postići i dodavanjem radne snage, ali uz uvjet da se ne povećava jalova snaga. Time se popravljaju omjer prividne i radne snage, a ujedno smanjuje kut  $\varphi$ . Budući da takav princip poboljšanja faktora snage nije praktičan nije niti u praksi znatno zastupljen.

Sinkronim elektromotorima također se može postići efekt kompenzacije. Kako je kod njih napon konstantan, promjenom struje uzbude može se regulirati jalova snaga. Ta metoda kompenzacije nije u praksi toliko rasprostranjena zbog ekonomske neisplativosti, stoga se koristi najčešće samo u većim elektromotornim pogonima i kod velikih potrošača snage.

#### 3.1. Proračun snage uređaja za kompenzaciju

Potrebna snaga uređaja za kompenzaciju računa se prema formuli:

$$Q = P \cdot (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) [VAr] \quad 3-1$$

gdje je  $P$  radna snaga trošila,  $\tan\varphi_1$  se proračuna iz postojećeg faktora snage  $\cos\varphi_1$ , dok  $\tan\varphi_2$  predstavlja traženi faktor snage proračunat u tangens kuta  $\varphi_2$ .

Kod računanja potrebne snage kompenzacije za motore često se koristi tablica s faktorima proračunavanja kako bi se brzo i jednostavno došlo do tražene snage kompenzacije [8]. Potrebno je znati snagu  $P$ (kW) i faktor snage  $\cos\varphi$  motora, a faktor proračunavanja  $c$  dobije se iz tablice 3.1. Snaga kompenzacije računa se prema izrazu:

$$Q = P \cdot c [VAr] \quad 3-2$$

PRIJE KOMPENZIRANJA	NAKON KOMPENZIRANJA									
cos φ	0.80	0.82	0.85	0.88	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	1.00
0.30	2.43	2.48	2.56	2.64	2.70	2.75	2.82	2.89	2.98	3.18
0.32	2.21	2.26	2.34	2.42	2.48	2.53	2.60	2.67	2.76	2.96
0.34	2.02	2.07	2.15	2.23	2.28	2.34	2.41	2.48	2.56	2.77
0.36	1.84	1.89	1.97	2.05	2.10	2.17	2.23	2.30	2.39	2.59
0.38	1.68	1.73	1.81	1.89	1.95	2.01	2.07	2.14	2.23	2.43
0.40	1.54	1.59	1.67	1.75	1.81	1.87	1.93	2.00	2.09	2.29
0.42	1.41	1.46	1.54	1.62	1.68	1.73	1.80	1.87	1.96	2.16
0.44	1.29	1.34	1.42	1.50	1.56	1.61	1.68	1.75	1.84	2.04
0.46	1.18	1.23	1.31	1.39	1.45	1.50	1.57	1.64	1.73	1.93
0.48	1.08	1.13	1.21	1.29	1.34	1.40	1.47	1.54	1.62	1.83
0.50	0.98	1.03	1.11	1.19	1.25	1.31	1.37	1.45	1.53	1.73
0.52	0.89	0.94	1.02	1.10	1.16	1.22	1.28	1.35	1.44	1.64
0.54	0.81	0.86	0.94	1.02	1.07	1.13	1.20	1.28	1.36	1.56
0.56	0.73	0.78	0.86	0.94	1.00	1.05	1.12	1.19	1.28	1.48
0.58	0.65	0.70	0.78	0.86	0.92	0.98	1.04	1.11	1.20	1.40
0.60	0.58	0.63	0.71	0.79	0.85	0.91	0.97	1.04	1.13	1.33
0.61	0.55	0.60	0.68	0.76	0.81	0.87	0.94	1.01	1.10	1.30
0.62	0.52	0.57	0.65	0.73	0.78	0.84	0.91	0.99	1.06	1.27
0.63	0.48	0.53	0.61	0.69	0.75	0.81	0.87	0.94	1.03	1.23
0.64	0.45	0.50	0.58	0.66	0.72	0.77	0.84	0.91	1.00	1.20
0.65	0.42	0.47	0.55	0.63	0.68	0.74	0.81	0.88	0.97	1.17
0.66	0.39	0.44	0.52	0.60	0.65	0.71	0.78	0.85	0.94	1.14
0.67	0.36	0.41	0.49	0.57	0.63	0.68	0.75	0.82	0.90	1.11
0.68	0.33	0.38	0.46	0.54	0.59	0.65	0.72	0.79	0.88	1.08
0.69	0.30	0.35	0.43	0.51	0.56	0.62	0.69	0.76	0.85	1.05
0.70	0.27	0.32	0.40	0.48	0.54	0.59	0.66	0.73	0.82	1.02
0.71	0.24	0.29	0.37	0.45	0.51	0.57	0.63	0.70	0.79	0.99
0.72	0.21	0.26	0.34	0.42	0.48	0.54	0.60	0.67	0.76	0.96
0.73	0.19	0.24	0.32	0.40	0.45	0.51	0.58	0.65	0.73	0.94
0.74	0.16	0.21	0.29	0.37	0.42	0.48	0.55	0.62	0.71	0.91
0.75	0.13	0.18	0.26	0.34	0.40	0.46	0.52	0.59	0.68	0.88
0.76	0.11	0.16	0.24	0.32	0.37	0.43	0.50	0.57	0.65	0.86
0.77	0.08	0.13	0.21	0.29	0.34	0.40	0.47	0.54	0.63	0.83
0.78	0.05	0.10	0.18	0.26	0.32	0.38	0.44	0.51	0.60	0.80
0.79	0.03	0.08	0.16	0.24	0.29	0.35	0.42	0.49	0.57	0.78
0.80		0.05	0.13	0.21	0.27	0.32	0.39	0.46	0.55	0.75
0.81			0.10	0.18	0.24	0.30	0.36	0.43	0.52	0.72
0.82			0.08	0.16	0.21	0.27	0.34	0.41	0.49	0.70
0.83			0.05	0.13	0.19	0.25	0.31	0.38	0.47	0.67
0.84			0.03	0.11	0.16	0.22	0.29	0.36	0.44	0.65
0.85				0.08	0.14	0.19	0.26	0.33	0.42	0.62
0.86				0.05	0.11	0.17	0.23	0.30	0.39	0.59
0.87					0.08	0.14	0.21	0.28	0.36	0.57
0.88					0.06	0.11	0.18	0.25	0.34	0.54
0.89					0.03	0.09	0.15	0.22	0.31	0.51
0.90						0.06	0.12	0.19	0.28	0.48
0.91						0.03	0.10	0.17	0.25	0.46
0.92							0.07	0.14	0.22	0.43
0.93							0.04	0.11	0.19	0.40
0.94								0.07	0.16	0.36
0.95									0.13	0.33

Tablica 3.1 Faktori proračunavanja [9]

Kompenzacijskim uređajem se želi postići faktor snage  $\cos \varphi$  između 0,95 i 1, jer distributer električne energije zahtjeva da bude u tim granicama. Odnosno ukoliko faktor snage nije u tim granicama naplaćuje se naknada za prekomjerno preuzetu jalovu energiju. Kod projektiranja kompenzacijskog uređaja treba uzeti u obzir opadanje kapaciteta kondenzatora uslijed starenja, te rezervu u snazi kompenzacijskog uređaja da bi se zadovoljila eventualna proširenja potrošačkog pogona odnosno priključenje dodatnih potrošača. Stoga se uređaji za kompenzaciju ne projektiraju na  $\cos \varphi = 0,95$  (što bi za početak zadovoljilo uvjet kako se ne bi plaćala naknada) već se kompenzacija projektira za  $\cos \varphi = 0,99$ .

Obračunsko mjesto: [REDACTED]  
 Broj obračunskog mjesta: [REDACTED] Kategorije potrošnje: Poduzetništvo Tarifni model: Crveni Obr.: 1

Broj brojila	Datum od	Datum do	Tar.stavka	Stanje od	Stanje do	Konstanta	Potrošak	Jed.cijena	Iznos kn
[REDACTED]	01.12.2010	01.01.2011	RVT R1	0023992,0	0028534,1	1	4542	0,56	2.543,52
			RNT R2	0017268,7	0020266,5	1	2998	0,45	1.349,10
			JEN J1	0029710,9	0035236,3	1	5525		
			JEN J2	0000000,0	0000000,0	1	0		
<b>Prekomjerno preuzeta jalova energija</b>							<b>3037</b>	<b>0,15</b>	<b>455,55</b>
Stanje max.	Konstanta	Ostvarena snaga kW	Koef	Ugovorena snaga kW	Obračunata snaga kW				
18,730	1	18,73	1.00		19,00		82,53		1.568,07
Naknada za mjernu i opskrbnu uslugu							1,00	70,70	70,70
Naknada za poticanje proizvodnje iz obnovljivih izvora							7540,00	0,0050	37,70
<b>UKUPAN IZNOS OBRAČUNA</b>									<b>6.024,64</b>

Slika 3.1 Mjesečni račun za struju [10]

Na slici 3.1 prikazan je primjer mjesečnog računa za struju na kojem su vidljivi podaci potrebni za izračun snage kompenzacijskog uređaja, a to su:

- **$W_r$  = Radna energija (kWh):**
  - radna energija obračunata po višoj tarifi (označena na računu kao RVT R1)
  - radna energija obračunata po nižoj tarifi (označena na računu kao RNT R2)
- **$W_j$  = Jalova energija (kVArh)**
  - induktivna jalova energija (označena na računu kao JEN J1)
  - kapacitivna jalova energija (označena na računu kao JEN J2)
- **Prekomjerno preuzeta jalova energija (kVArh)**
  - to je pozitivna razlika između stvarno izmjerene jalove energije i jalove energije koja odgovara prosječnom faktoru snage manjem od 0,95, što odgovara približno 33% radne energije.
- **$P$  = Snaga (kW)**



Kad se uzmu ti podaci slijedi proračun:

$$P = 18,73 \text{ kw}$$

$$W_r = (RVT R1) + (RNT R2) = 4542 + 2998 = 7540 \text{ kWh} \quad 3-3$$

$$W_j = JEN J1 = 5525 \text{ kVArh}$$

Ako se zahtjeva kompenzacija na  $\cos \varphi_2 = 0,99$  iz čega slijedi  $\tan \varphi_2 = 0,142$

$$\tan \varphi_1 = \frac{W_j}{W_r} \quad 3-4$$

$$\tan \varphi_1 = \frac{7540}{5525} = 1,365$$

Iz toga slijedi  $\cos \varphi_1 = 0,591$ , pa se pomoću formule 3-1 dolazi do snage kompenzacije:

$$Q = P \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) = 18,73 \cdot (1,365 - 0,142) = 22,90 \text{ QVAr}$$

Treba odabrati prvi veći tipski uređaj, tj. 25 kVAr.

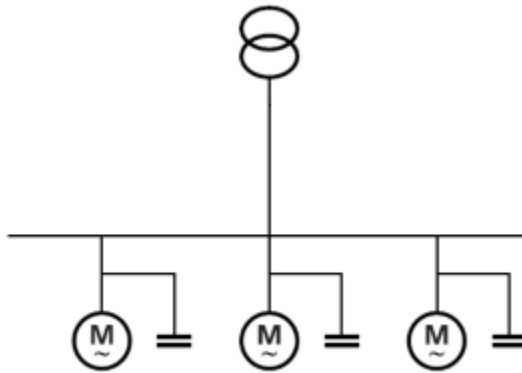
## 3.2. Regulacija jalove snage

Sukladno rasporedu i vrsti trošila odabire se najpogodniji položaj i upravljanje za kompenzacijski uređaj. Prema tome kompenzacija jalove snage s obzirom na mjesto ugradnje može biti izvedena kao:

- pojedinačna kompenzacija
- grupna kompenzacija
- centralna kompenzacija

### 3.2.1. Pojedinačna kompenzacija

Pojedinačnom kompenzacijom nazivaju se kompenzatori koji se dodjeljuju svakom induktivnom trošilu zasebno. Kako bi se svakom induktivnom trošilu stavila na raspolaganje potrebna jalova energija ugrađuje se odgovarajuća kondenzatorska baterija ili više njih.



*Slika 3.2 Pojedinačna kompenzacija [11]*

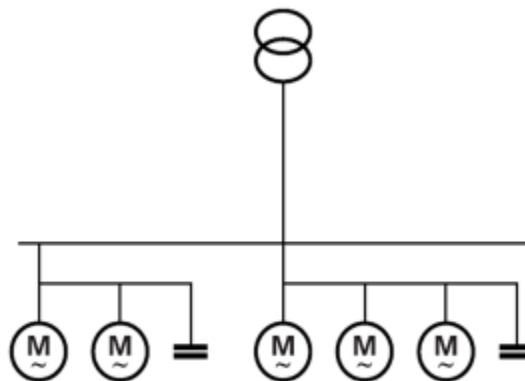
Takva vrsta kompenzacije koristi se kod trošila koja imaju veliku snagu i rade neprekidno više sati (npr. pumpe, transformatori, kompresori, indukcijske peći). [11]

Karakteristike:

- Nema prijenosa jalove snage mrežom.
- Nema potrebe za dodatnim sklopnim uređajima
- Nema potrebe za regulatorom faktora snage

### **3.2.2. Grupna kompenzacija**

U slučajevima gdje je primjerice više manjih motora u grupnom radu ili pak kod rasvjete većih objekata, umjesto pojedinačne kompenzacije praktičnije i bolje isplativo je kompenzirati cijelu grupu takvih potrošača. Tu vrstu kompenzacije nazivamo grupna kompenzacija. [12]



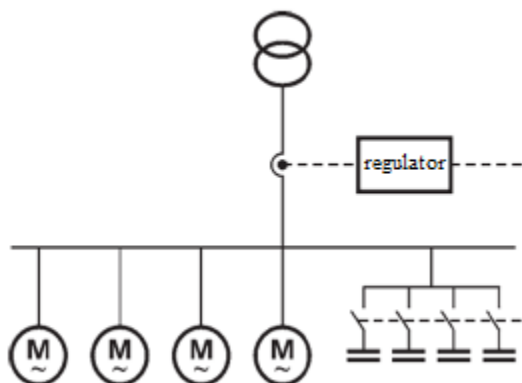
*Slika 3.3 Grupna kompenzacija [11]*

Karakteristike:

- Jalova snaga se prenosi samo jednim dijelom mreže
- Neophodni su sklopni uređaji

### 3.2.3. Centralna kompenzacija

U industrijskim postrojenjima s većim brojem trošila koja se napajaju iz jedne trafostanice, te kod pogona s promjenljivim potrebama jalove snage najadekvatnije rješenje je da se kompenzira iz jednog, centralnog mjesta.



Slika 3.4 Centralna kompenzacija [11]

Takva kompenzacija sadrži upravljački dio, odnosno regulator faktora snage. On ima postavljeno mjerenje kojim mjeri ukupnu jalovu snagu svih trošila. Ako izmjerena vrijednost ne odgovara zadanom limitu faktora snage tada uključuje ili isključuje kondenzatorske baterije kako bi se postigao željeni faktor snage. [13]

Karakteristike:

- Vrlo jednostavno upravljanje i nadzor faktora snage
- Zbog modularnosti i centralnog položaja jednostavno se servisira i nadograđuje
- Neophodni su sklopni uređaji
- Neophodan je mjerno/upravljački uređaj - regulator faktora snage

## **4. INSTALACIJA UREĐAJA ZA KOMPENZACIJU JALOVE ENERGIJE**

Da bi se pravilno kompenzirala jalova snaga nekog pogona potrebno se prvo upoznati s energetske potrebe istog. U obzir treba uzeti moguće proširenje pogona. Kako se ugradnjom kompenzacijskog uređaja mijenjaju energetske prilike u mreži važno je u samom startu odabrati pravilne komponente uređaja za kompenzaciju, da bi se omogućio dug i siguran rad, te izbjegle neželjene posljedice na mrežu i pogon. U nastavku je prikazana kompenzacija jalove snage na niskonaponskoj mreži s povećanim udjelom viših harmonika.

### **4.1. Opći podaci o lokaciji ugradnje**

Za primjer je uzeta kompenzacija pogona za lijevanje lakih metala u Kutini. U ovom slučaju potrošači se dijele na dvije vrste:

1. UREDSKI (računala, printeri, fotokopirni uređaji itd.)
2. POGONSKI (indukcijske peći, strojevi za proizvodnju automobilskih dijelova od aluminijske legure)

Za projektiranje kompenzacije potrebni su nam određeni podaci. Dio tih podataka vidljiv je na računu za struju, dok ostale podatke dobivamo iz mjerenja u samoj firmi.

Iz računa smo uzeli sljedeće podatke:

Radna energija = 28203 kWh

Jalova energija = 13999 kVArh

Ostvarena snaga = 75,06 kW

U ovom slučaju prilikom projektiranja kompenzacije proizvodni pogon još nije u punoj funkciji stoga treba uzeti u obzir snagu i  $\cos \varphi$  strojeva koji će se naknadno ugrađivati. Kako se radi o strojevima postavljenima u linije, te će se proširenje vršiti u vidu instaliranja identičnih linija, može se zaključiti da se  $\cos \varphi$  neće značajnije mijenjati. Prema postojećoj instaliranoj opremi može se pretpostaviti da snaga neće biti veća od 250 kW te se taj iznos može uzeti kao maksimalna snaga.

## 4.2. Snimka postojećeg stanja

Mjerenje je vršeno jednofaznim analizatorom mreže FLUKE 41B Power Harmonics Analyzer na svakoj fazi. Analizator mreže spaja se na isti način kao i vatmetar, a pošto je mjerenjem potrebno obuhvatiti sva trošila analizator je spojen na dolazne vodove kod glavne sklopke. Tokom mjerenja na mrežu su bile priključene indukcijske peći sa popratnom proizvodnom opremom, rasvjeta, računala i dodatni manji uredski potrošači.

Mjerenjem su dobiveni sljedeći podaci:

	L 1	L 2	L 3
U (V)	232	232	233
I (A)	78,1	102,9	104,1
P (kW)	16,6	22,4	22,6
S (kVA)	18,1	23,9	24,3
Q (kVAr)	7,3	8,6	9,0
Cos $\varphi$	0,92	0,94	0,93
THD – V (%)	1,9	2,8	2,9

Tablica 4.1 Mjerenje postojećeg stanja u mreži

To mjerenje je prikaz trenutnih vrijednosti, te se kao takvo ne može koristiti za proračun potrebne snage kompenzacijskog uređaja koji mora zadovoljavati potrebe za jalovom snagom u svim uvjetima rada pogona.

## 4.3. Proračun potrebne snage uređaja za kompenzaciju

Za proračun snage kompenzacijskog uređaja koriste se podaci sa računa za struju, jer su oni pokazatelj potrošnje električne energije za vremensko razdoblje od mjesec dana. Na računu za struju su iskazani podaci o snazi i količini preuzete radne energije i jalove energije.

Iz tih podataka slijedi proračun:

$$P = 75,06kW$$

Zbog predviđenog proširenja računa se sa snagom  $P = 250 kW$

$$W_r = 28203kWh$$

$$W_j = 13999kVArh$$

Ako se zahtjeva kompenzacija na  $\cos \varphi_2 = 0,99$  iz čega slijedi  $\tan \varphi_2 = 0,142$ , pa iz toga prema formuli 3-4 slijedi proračun:

$$\tan \varphi_1 = \frac{W_j}{W_r} = \frac{13999}{28203} = 0,496$$

Iz čega slijedi  $\cos \varphi_1 = 0,896$ , pa se koristeći formulu 3-1 dolazi do potrebne snage kompenzacije:

$$Q = P \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) = 250 \cdot (0,496 - 0,142) = 88,5 \text{ kVAr}$$

Treba odabrati prvi veći tipski uređaj, tj. 90 kVAr.

#### **4.4. Odabir adekvatnog uređaja za kompenzaciju**

Kod odabira uređaja za kompenzaciju jalove energije uvjet je bio da osim kompenziranja jalove energije treba spriječiti nastajanje rezonancije i da se filtriraju struje viših harmonika. Odabran je automatski prigušeni kompenzacijski uređaj tip ERG QAPL 090-7. Karakteristično za taj tip kompenzacije je da ima faktor prigušenja 7%, odnosno da filtrira 5. harmonik do 20%. Koristi se u mrežama s udjelom nelinearnih potrošača preko 20% i MTU frekvencijom većom od 250 Hz. Za sekvencu (red regulacije) smo odabrali 1:1:1:1:1:1, odnosno  $6 \times 15 = 90 \text{ kVAr}$ . Ta sekvencu se pokazala kao najbolja za takav tip pogona jer se postiže dovoljno točna regulacija, a izbjegava se prečesto preklapanje.

##### **4.4.1. Odabir komponenata za automatski prigušeni kompenzacijski uređaj**

Cilj prigušenog kompenzacijskog uređaja je da djeluje induktivno za sve harmonike iznad ugođene rezonantne frekvencije, a kod nižih frekvencija ima kapacitivni karakter kojim se kompenzira induktivitet trošila. Taj efekt se postiže serijskim spajanjem prigušnice i kondenzatora, čime se mijenja LC krug koji tvore kompenzacijski uređaj i transformator. Veoma važno je ugoditi rezonantnu frekvenciju da bude niža od prvog postojećeg višeg harmonika.

Dodatna prednost prigušene kompenzacije je efekt filtriranja. Serijski povezana s kondenzatorom prigušnica stvara serijski rezonantni krug s ugođenom frekvencijom na kojoj se u toj grani otvara niski put impedancije za harmoničku struju na toj frekvenciji. Zbog toga frekvencija ugađanja treba biti što bliže frekvenciji jedne od harmoničkih struja, kako bi što više struje tog harmonika prolazilo kroz tu granu, a što manje kroz potrošače.

Faktor prigušenja bira se ovisno o ukupnom izobličenju napona  $THD-V$ . Ukoliko  $THD-V$  iznosi  $< 7\%$  primjenjuje se harmonički filter s faktorom prigušenja  $p=7\%$ . Kada je  $THD-V$  u granicama 7-10% primjenjuje se harmonički filter s faktorom prigušenja  $p=5,67\%$ , a ukoliko  $THD-V > 10\%$  tada se primjenjuju posebno dizajnirani harmonički filteri. Prilikom kontrolnog mjerenja zabilježeni  $THD-V$  iznosio je 2,9% te je potrebno odabrati harmonički filter s faktorom prigušenja  $p=7\%$  kojim se postiže filtriranje 5. harmonika do 20%.

Da bi se postigao željeni cilj potrebno je pravilno proračunati parametre svih komponenta prigušenog kompenzacijskog uređaja. Automatski prigušeni kompenzacijski uređaj sastoji se od sljedećih komponenta:

1. Prigušnica
2. Kondenzatora
3. Sklopnika
4. Regulatora faktora snage
5. Osigurača za zaštitu energetskeg djela kompenzacije
6. Osigurača za zaštitu mjernog i upravljačkog dijela regulatora
7. Grebenaste sklopke (isklop u nuždi)
8. Energetskog i upravljačkog ožičenje svih komponenta

Osim opreme od koje se sastavlja kompenzacijski uređaj, mora se voditi računa o pravilnom odabiru sljedećih elementa:

- Strujni mjerni transformator
- Priključni kabel
- Osigurači na koje spajamo priključni kabel

#### 4.4.2. Energetski dio kompenzacijskog uređaja

Za ovaj kompenzacijski uređaj odabrane su prigušnice s faktorom prigušenja  $p=7\%$  proizvođača EPCOS – SIEMENS. Potrebna snaga uređaja (90kVAr) raspodijeljena je na 6 jednakih stupnjeva, pa je prema tome odabrana prigušnice snage 15kVAr.

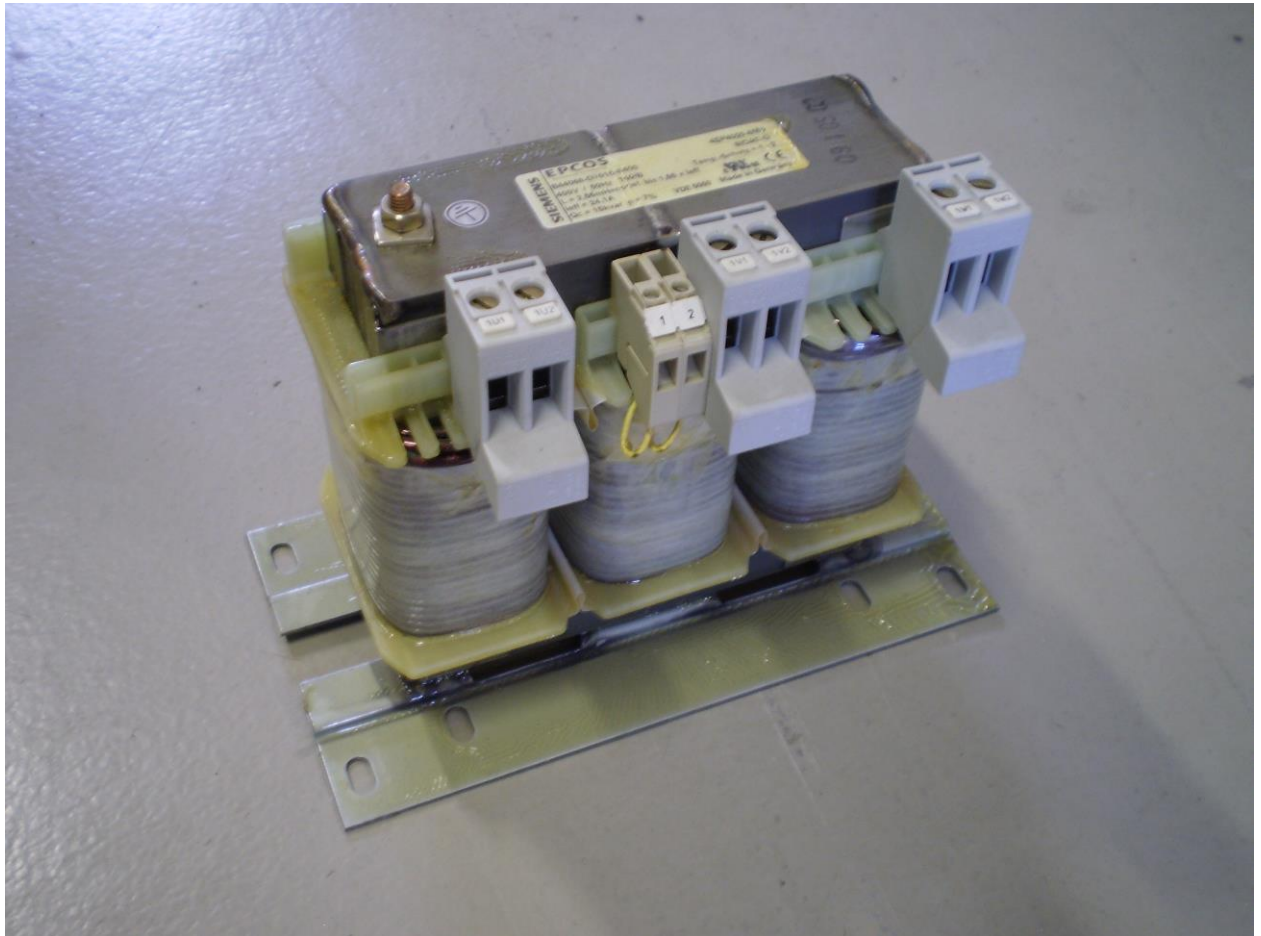
Prigušnica je opremljena termičkom zaštitom (mikroprekidač) koja kod previsoke temperature prigušnice isključuje sklopnik, a time prekida napajanje prigušnice.

Nazivni podaci prigušnice [14]:

Prigušenje (p)	7%
Rezonantna frekvencija ( $f_r$ )	189 Hz
Jalova snaga (Q)	15 kVAr
Induktivitet (L)	2,56 mH
Efektivna struja (I)	24,1 A
Nazivni napon (U)	400 V
Nazivna frekvencija (f)	50 Hz

Masa (m)	8,8 kg
Gubici (P <sub>g</sub> )	87 W
Maksimalna temperatura okoline	40 °C
Hlađenje	prirodno
Toplinska zaštita	mikroprekidač
Mehanička zaštita	IP00

Tablica 4.2 Nazivni podaci prigušnice



Slika 4.1 Prigušnica  $Q=15 \text{ kVAr}$ ,  $p=7\%$

Kod prigušene kompenzacije prigušnica se spaja u seriju s kondenzatorom, a to dovodi do povećanja napona na kondenzatoru. Zbog toga treba odabrati kondenzatore koji su predviđeni za napon viši od mrežnog napona. Do pravilnog iznosa napona dolazi se sljedećim izračunom:

$$U_c = U_N \cdot \frac{100}{100 - p} = 402 \cdot \frac{100}{100 - 7} = 432,25 \text{ V} \quad 4-1$$



Za nazivni napon  $U_N$  uvršten je napon izmjeren prilikom kontrolnog mjerenja sa jednofaznim analizatorom mreže FLUKE 41B Power Harmonics Analyzer. Izračunom smo dobili potreban napon kondenzatora  $U_C$ . Budući da su naponske vrijednosti kondenzatora normirane, potrebno je uzeti kondenzator za 440V.

U takvom spoju s prigušnicom, jalova snaga koju daje kondenzator je također drugačija od one koju daje dok nije spojen sa prigušnicom.

$$Q_C = \left(1 - \frac{p}{100}\right) \cdot \frac{U_C^2}{U_N^2} \cdot N_C = \left(1 - \frac{7}{100}\right) \cdot \frac{432,25^2}{402^2} \cdot 13,80 = 14,83 \text{ kVAr} \quad 4-2$$

Da bi se odabrao pravi tip kondenzatora, treba definirati kapacitet kondenzatora, što se radi sljedećim izračunom:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad 4-3$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad 4-4$$

$$C = \frac{1}{f_r^2 \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot L} \quad 4-5$$

Rezonantna frekvencija kod faktora prigušenja 7% je dobivena formulom:

$$f_r = f_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{p}} = 50 \cdot \frac{1}{\sqrt{0,07}} = 189 \text{ Hz} \quad 4-6$$

Induktivitet prigušnice je poznat:

$$L = 2,56 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

Pa kad su prikupljene i proračunate sve potrebne vrijednosti tada se kapacitet kondenzatora prema računa formuli 4-5:

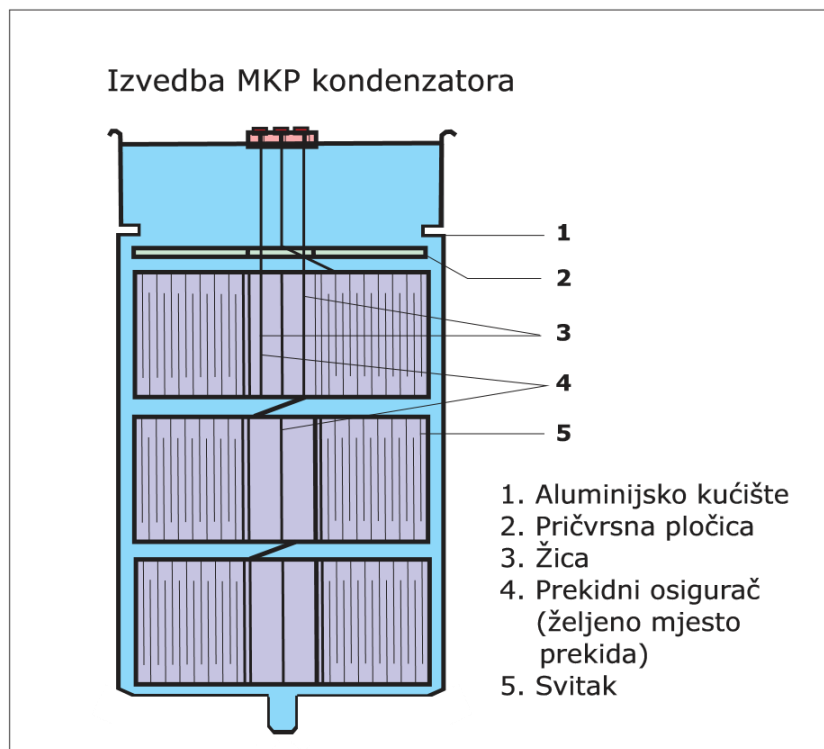
$$C = \frac{1}{189^2 \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot 2,56 \cdot 10^{-3}} = 276,9 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

Odabire se kondenzator s kapacitetom  $3 \cdot 92 \mu\text{F}$ , za ovaj kompenzacijski uređaj odabran je tip kondenzatorske baterije MKP440-D-16,7.



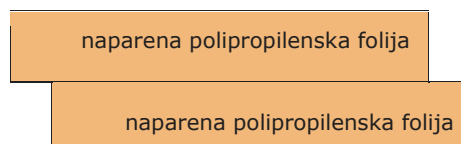
*Slika 4.2 Kondenzator MKP440-D-16,7*

MKP je standardna kondenzatorska tehnika koja je u primjeni već 30 godina. Takav kondenzator u sebi ima tri jednofazna svitka koji su postavljeni jedan iznad drugog što je vidljivo na slici 4.3.



*Slika 4.3 Poprečni presjek MKP kondenzatora*

Svitak je napravljen iz Al-Zn metalizirane plastične folije (polipropilen) (slika 4.4), te ima svojstvo tzv. samopopravljivosti (samoozdravljenje). Svitak je u Al posudi s ugrađenim nadtlačnim osiguračem. Ovaj tip kondenzatora impregniran je mekanom smolom (želatinom). [13]



*Slika 4.4 MKP kondenzatorski svitak*

U slučaju termičkog ili električkog preopterećenja nastaje električki kvar, proboj. Dielektrik je na mjestu kvara razbijen u plazmu koja eksplodira i gura druge slojeve dielektrika. Pražnjenje se nastavlja širenjem plazme preko metalnih slojeva, tako dugo dok metalno okruženje kvara u potpunosti ne izgori. To stvara savršenu izolaciju područja kvara u nekoliko mikro sekundi. Proces samopopravka rezultira neznatnim gubicima kapaciteta (manje od 100pF po kvaru). Kondenzator ostaje potpuno funkcionalan tijekom cijelog procesa. [9]

Nazivni podaci kondenzatora:

Proizvođač	EPCOS
Tip kondenzatora	MKP440-D-16,7
Nazivna snaga na 50 Hz	16,7 kVAr
Nazivna struja na 50 Hz	21,9 A
Nazivna snaga na 60 Hz	20 kVAr
Nazivna struja na 60 Hz	26,3 A
Kapacitet	3 · 92 μF (92 μF po fazi u spoju trokut)
Tolerancija kapaciteta	-5% / +10%
Masa	1,2 kg
Ispitni napon, priključak/priključak	2,15 · U <sub>N</sub> , AC, 2 s
Ispitni napon, priključak/kućište	3000 V AC, 10 s
Vijek trajanja	do 100000 sati
Temperatura okoline	minimalna temperatura -40°C maksimalna temperatura 55 °C
Hlađenje	prirodno ili prisilno
Maksimalna vlaga	95%
Nadmorska visina	do 4000 m nad morem
Pozicija ugradnje	vertikalno
Dimenzije (mm)	85 · 273 (promjer · visina)
Dielektrik	Polipropilenski film
Impregnacija	Biorazgradiva mekana smola, polusuha
Sigurnost	Samoozdravljenje, nadtlačni osigurač, maksimalna dozvoljena struja kvara 10000 A
Uređaj za pražnjenje	Predmontiran keramički otpornik za pražnjenje
Kućište	Ekstrudirani aluminij
Mehanička zaštita	IP00 (kapa IP54 kao opcija)
Priključci	dvostruki, za maksimalni presjek kabla 16 mm <sup>2</sup>
Maksimalni napon	U <sub>N</sub> + 10% (do 8 sati dnevno) U <sub>N</sub> + 15% (do 30 min dnevno) U <sub>N</sub> + 20% (do 5 min dnevno) U <sub>N</sub> + 30% (do 1 min dnevno)
Maksimalna struja	I <sub>N</sub> · 1,5
Struja uklapanja	I <sub>N</sub> · 200
Gubici:	
- Dielektrik	< 0,2 W/kVAr
- Ukupno (bez otpornika za pražnjenje)	< 0,45 W/kVAr
Maksimalni broj preklapanja	5000 na godinu

Tablica 4.3 Nazivni podaci kondenzatora MKP440-D-16,7

Tablica nazivnih snaga kondenzatora s obzirom na nazivni napon i nazivnu frekvenciju:

Napon:	Snaga kod 50 Hz:	Snaga kod 60 Hz:
440 V	16,7 kVAr	20 kVAr
415 V	14,9 kVAr	17,8 kVAr
400 V	13,8 kVAr	16,6 kVAr

Tablica 4.4 Nazivna snaga kondenzatora

Kondenzator se standardno isporučuje opremljen sa pred montiranim keramičkim otpornikom od 150 k $\Omega$  za pražnjenje koji je trajno priključen na kondenzator (slika 4.5).



Slika 4.5 Otpornik za pražnjenje kondenzatora

#### 4.4.3. Upravljački dio kompenzacijskog uređaja

Spajanjem kondenzatora u izmjenični strujni krug nastaje rezonantni strujni krug koji je u većoj ili manjoj mjeri prigušen. Kod uklapanja kondenzatora koji se nalazi u kompenzacijskom uređaju s već uključenim kondenzatorima, prijelazna uklopna struja je znatno veća od nominalne struje (čak do 200 puta). Velike vrijednosti uklopnih struja mogu dovesti do oštećenja, a također loše djeluju na kondenzatore. Zato se koriste sklopnici sa pred-kontaktima koji se zatvaraju prije glavnih kontakata, a otvaraju se kada su glavni kontakti sigurno zatvoreni. Pred-kontakti imaju u seriju spojene otpornike. Tim otpornicima se ograničuje uklopna struja kondenzatora. Smanjenjem uklopne struje smanjuju se i naponski padovi.

Kod prigušenih uređaja za kompenzaciju jalove snage mogu se koristiti kondenzatorski sklopnici bez pred-kontaktata za ograničavanje struje uklapanja jer u tom slučaju funkciju prigušenja struje uklapanja vrše antirezonantne filterske prigušnice.

Odabran ja tip sklopnika K3-32A00 230 proizvođača Benedikt & Jäger (slika 4.6) za uklapanje do 25 kVAr na naponu 415V. Nazivni napon svitka je 220-240 V na frekvenciji 50 Hz.



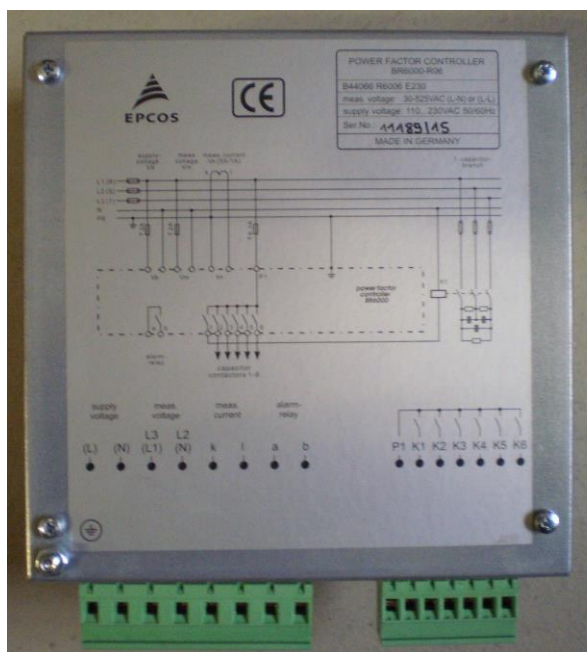
Slika 4.6 Sklopnik K3-32A00 230

Nazivni podaci sklopnika:

Nazivni napon (U):	220-240V	380-415V	500V	660-690V
Nazivna snaga (Q):	14 kVAr	25 kVAr	30 kVAr	41 kVAr

Tablica 4.5 Nazivni podaci sklopnika

Kako uređaj ima 6 stupnjeva, za regulaciju je odabran 6 stupanjski regulator faktora snage EPCOS BR 6000-R6 (slika 4.7)



Slika 4.7 Stražnja i prednja strana regulatora faktora snage EPCOS BR6000-R6

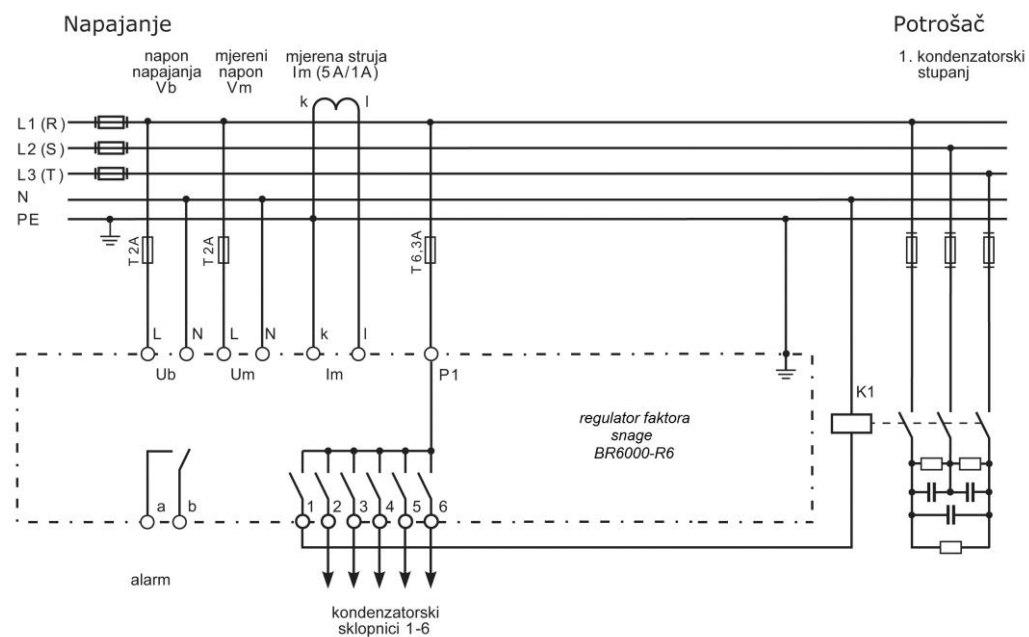
Nazivni podaci regulatora:

Radni napon	110-230V $\pm$ 15%, AC
Radna frekvencija	50/60 Hz
Mjerni napon	30 do 525V, AC
Mjerna struja	x/5A (1A)
Prikaz	Osvijetljen grafički zaslon 2x16 znakova
Broj relejnih izlaza	6
Alarmni izlaz	Da
Mrežna frekvencija	50Hz ili 60Hz
Uklonni napon relejnog izlaza	Maksimalno 250V, AC
Snaga sklapanja relejnog izlaza	Maksimalno 1000W
Vlastita potrošnja	Maksimalno 5VA
Struja odaziva	40mA
Ciljani $\cos\phi$	0,1 ind do 0,1 cap
Točnost	Struja, napon: 1% Snaga: 2%
Prikaz mrežnih parametara	Faktor snage, napon, prividna struja, frekvencija, reaktivna snaga, radna snaga, prividna snaga, nedostatak kVAr, temperatura, harmonici
Pohranjivanje maksimalnih vrijednosti	Napon, reaktivna snaga, radna snaga, prividna snaga, temperatura, THD-V, THD-I
Pohranjivanje broja preklopa	Da, svaki kondenzatorski stupanj
Pohranjivanje sati rada	Da, svaki kondenzatorski stupanj
Temperatura radne okoline	-20°C do +60°C

Temperaturno područje mjerenja	-30°C do +100°C
Masa	1 kg
Dimenzije	144·144·55 mm (š·v·d)
Mehanička zaštita	Naprijed: IP54 Straga: IP20

Tablica 4.6 Nazivni podaci regulatora faktora snage BR6000-R6

Regulator se spaja prema shemi (slika 4.8), napon za napajanje svitaka kondenzatorskih sklopnika i mjerni napon moraju biti spojeni na istu fazu, jer je samo mjerni napon nadziran (zaštita od ponovnog direktnog uključivanja kondenzatorskog sklopnika pri kratkotrajnom jednofaznom prekidu napajanja). [9]



Slika 4.8 Shema spajanja regulatora faktora snage BR6000-R6

Regulator faktora snage potrebno je programirati kako bi se postiglo željeno upravljanje kompenzacijskim uređajem. Unose se sljedeći podaci:

- I-CT PRIMARY [400A]– Podešava se primarna struja mjernog strujno transformatora u granicama od 5A do 13000A
- I-CT SECONDARY [5A]– Podešava sekundarna struja mjernog transformatora, moguće vrijednosti su 5A ili 1A
- END STOP [6]– Podešava se broj aktivnih stupnjeva, maksimalna vrijednost je 6
- CONTROL SERIES [1:1:1:1:1:1]– Omjer snaga kondenzatorskih stupnjeva određuje sekvencu regulacije. Vrijednost prvog stupnja uvijek se označava sa 1.
- CONTROL MODE [INTELLIGENT]– Odabire se način regulacije:



- SEQUENTIAL - linearno sklapanje
- LOOP - kružno sklapanje
- INTELLIGENT - inteligentno kružno sklapanje - kombinira prednosti kružnog uključivanja s puno bržim odzivom čak i kod velikih skokova opterećenja. Željena vrijednost faktora snage postiže se s najmanjim mogućim brojem sklapanja stupnjeva. Optimalna reakcija postiže se istovremenim uključivanjem više ili većih grupa kondenzatora da bi se nadoknadila potrebna reaktivna snaga u mreži. Uzima se u obzir broj uklopa kao i trajanje uklopljenog stanja pojedinih kondenzatorskih stupnjeva.
  - COMBINED CHOKE - kombinirano prigušenje
- POWER 1. STAGE [15 kVAr] – Za podešavanje osjetljivosti regulacije unosi se snaga najmanjeg stupnja (prvog) ugrađenog u uređaj za kompenzaciju u granicama 0,01 do 255,99
- TARGET  $\cos \varphi$  [0,99 IND] – podešava se željeni faktor snage u granicama 0,1 induktivno do 0,1 kapacitivno
- MEAS. VOLTAGE [230 V-L/N] – Unosi se vrijednost mjernog napona koja odgovara naponu na stezaljkama regulator, u granicama od 30 do 525
- V-CONVERTER [NO] – standardna postavka NO (ne), kod direktnog mjerenja. U slučaju indirektnog mjerenja napona unosi se prijenosni omjer mjernog naponskog transformatora. Na primjer ako je prijenosni omjer naponskog transformatora 20000:100V prijenosni omjer koji treba podesiti iznosi 200.
- SWITCH-IN-T. [40s] – podešava se vrijeme između dva uzastopna uključivanja kondenzatorskih stupnjeva u svrhu povećanja kapaciteta u mreži. Trebalo bi imati na umu da je u praksi stvarno vrijeme uključivanja ovisno o vremenu pražnjenja. Raspon u granicama od 1 sekunde do 20 minuta
- SWITCH-OFF-T. [40s] – podešava se vrijeme između dva uzastopna isključivanja kondenzatorskih stupnjeva u svrhu smanjenja kapaciteta u mreži. Raspon u granicama od 1 sekunde do 20 minuta
- DISCHARG TIME [60s] – to je vrijeme za koje je stupanj blokiran između isključivanja i ponovnog uključivanja. Vrijeme blokiranja ima prioritet nad vremenima uključivanja i isključivanja. Ovisi o vremenu pražnjenja kondenzatora, te je stoga određeno uređajem za kompenzaciju. Kod konvencionalnih uređaja za kompenzaciju bez dodatnih otpornika za brzo pražnjenje ili prigušnica, podešeno vrijeme pražnjenja ne bi trebalo biti manje od 40 sekundi. Raspon u granicama od 1 sekunde do 20 minuta

- ALARM TEMP. [55°C] – Ovdje se programira temperaturni alarm kod kojeg će kondenzatorski stupnjevi biti isključeni jedan za drugim. Alarmni relej reagirat će nakon 10 minuta. Kada temperatura padne potrebni kondenzatorski stupnjevi će biti ponovo uključeni.
- HARMONISC THD-V [7%] – harmonički limit, ovdje možemo unijeti limit totalnog harmoničkog izobličenja THD-V (u %). Kada je vrijednost prekoračena na zaslonu se prikazuje upozorenje. Raspon u granicama od 0,5 do 25,5.

Kako se radi o centralnoj (središnjoj) kompenzaciji, točan podatak o ukupnoj struji regulator dobiva od strujnog mjernog transformatora koji je potrebno instalirati tako da kroz njega protječe ukupna struja potrošača, odnosno kod glavne sklopke.

Da bi se odabrao pravilan strujni mjerni transformator treba znati maksimalnu struju koju će mjeriti taj transformator. Prema postojećoj instaliranoj opremi može se pretpostaviti da snaga neće biti veća od 250 kW, stoga se taj iznos uzima kao maksimalna snaga. Poznavanjem parametara potrošača, te iz kontrolnog mjerenja i računa za struju zaključuje se da  $\cos\varphi$  bez kompenzacije neće biti manji od 0,896. Napon je prema kontrolnom mjerenju  $U = 402 \text{ V}$ . Struja se može izračunati pomoću formule 4-7:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad 4-7$$

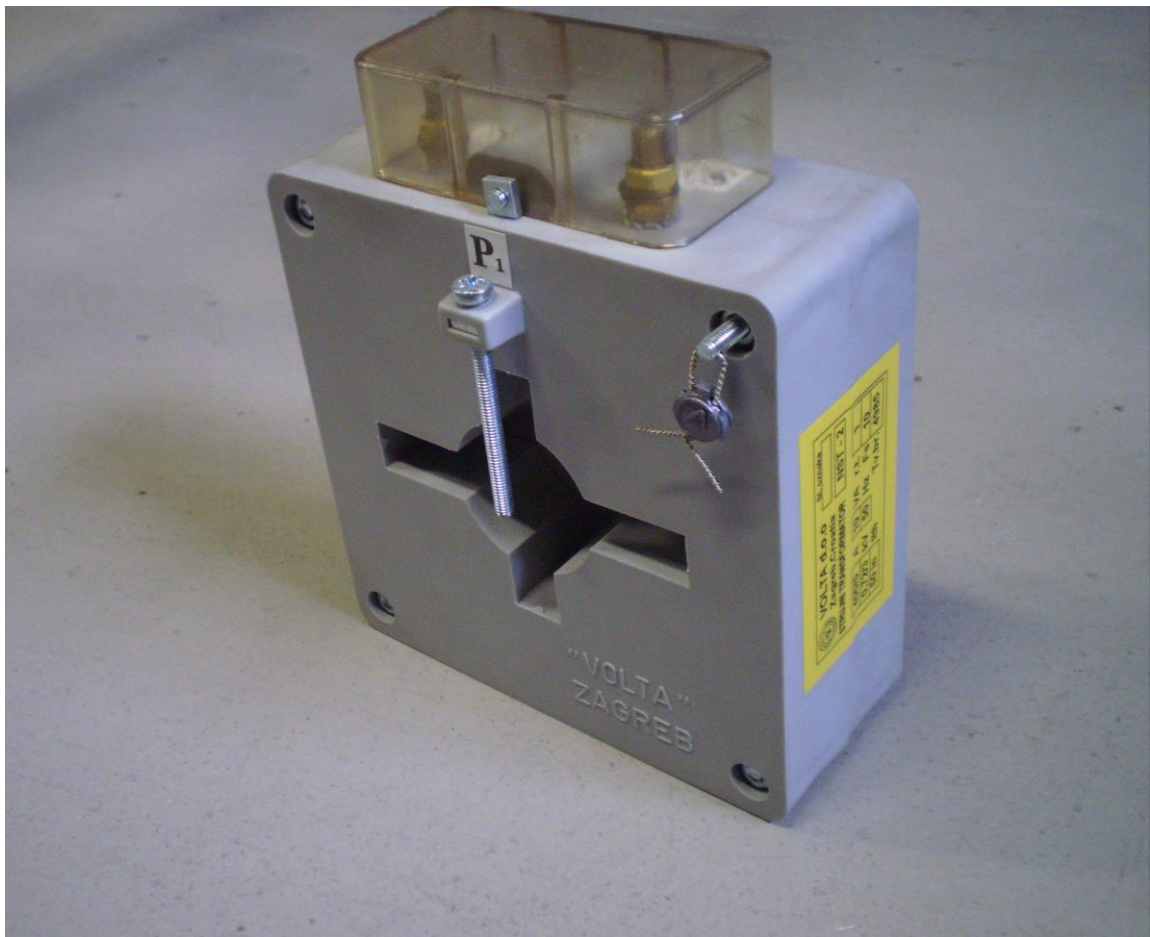
Iz čega slijedi:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{250 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 402 \cdot 0,896} = 400,72A$$

Budući da je nazivna struja automatske glavne sklopke 400A, maksimalna struja koja se dobije izračunom nije dopuštena, stoga je jedna od prednosti ugradnje kompenzacijskog uređaja smanjenje struje kroz glavnu sklopku. Ugradnjom kompenzacije postići će se  $\cos\varphi=0,99$ , pa će kod punog opterećenja pogona maksimalna struja biti sljedeća:

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{250 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 402 \cdot 0,99} = 362,67A$$

Zaključuje se da je potreban strujni mjerni transformator prijenosnog omjera 400/5A (slika 4.9)

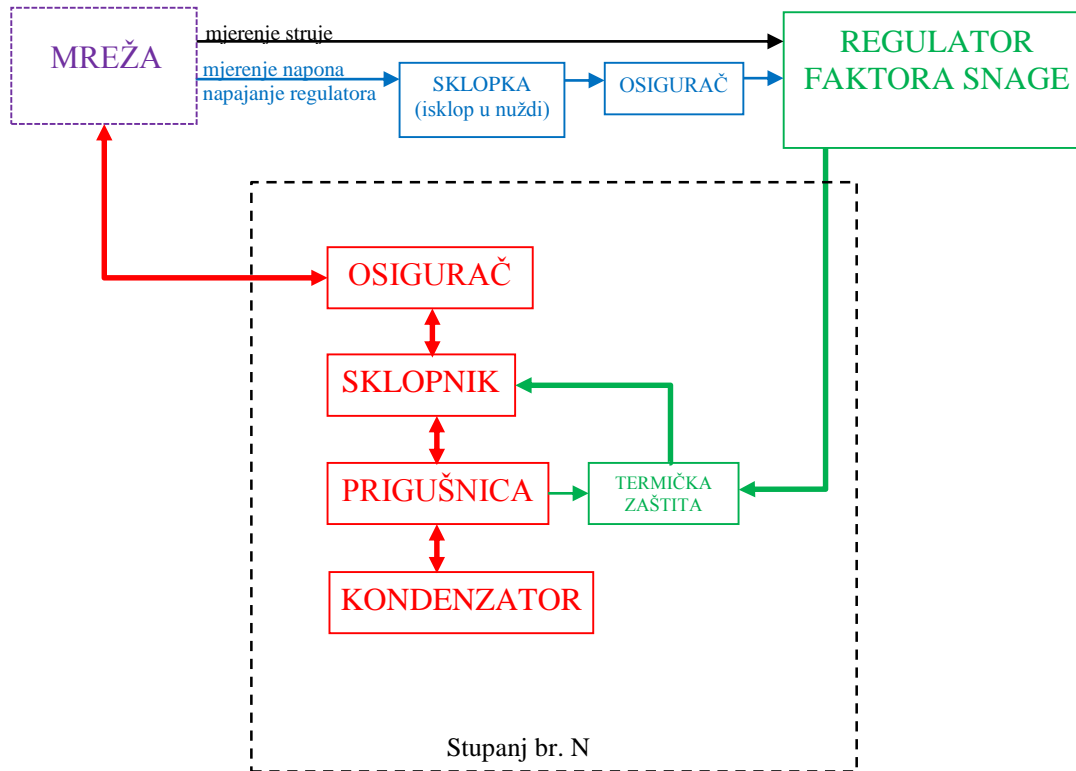


*Slika 4.9 Strujni mjerni transformator prienosnog omjera 400/5A*

Strujni mjerni transformator treba instalirati tako da kroz njega protječe ukupna struja potrošača. Opterećenje na sve tri faze je poprilično podjednako, pa je dovoljno vršiti mjerenje na jednoj fazi. Izlazi kompenzacijske mreže moraju biti instalirani nakon mjernog strujnog transformatora gledano u smjeru protjecanja struje. Jedna stezaljka sekundara mjernog transformatora mora biti uzemljena.

Za spajanje upravljačkog djela kompenzacije (napajanje regulatora faktora snage, napajanje svitaka kondenzatorskih sklopnika) korišten je vodič  $1\text{mm}^2$ , dok je za spajanje strujnog mjernog transformatora korišten vodič  $2,5\text{mm}^2$ .

Upravljanje kompenzacijskog uređaja vidljivo je na blok shemi (slika 4.10) gdje je prikazano upravljanje na jednom stupnju kompenzacijskog uređaja.



Slika 4.10 Blok shema automatskog prigušenog kompenzacijskog uređaja

Regulator faktora snage mjeri jalovu snagu na mjestu napajanja i ukoliko izmjereni  $\cos \varphi$  odstupa od zadanog  $\cos \varphi$  uklapa ili isklapa pojedine stupnjeve. Uklapanje je moguće uz uvjet da termička zaštita prigušnice to dopušta. Ovisno o potrebnom redu regulacije broj stupnjeva kao što je prikazan na blok shemi (slika 4.10) može biti već ili manji, te mogu međusobno imati različiti odnos snaga. Za kompenzacijski uređaj ERG QAPL 090-7 odabran je red regulacije 1:1:1:1:1:1, što znači da uređaj ima 6 stupnjeva međusobno jednakih snaga.

#### 4.4.4. Spajanje i zaštita kompenzacijskog uređaja

Za uključivanje i isključivanje kompenzacijskog uređaja, odnosno napajanja regulatora, te ujedno i za isklup u nuždi korištena je grebenasta sklopka Benedikt & Jäger nazivne struje 20A.

Prema uputi proizvođača regulatora faktora snage za zaštitu napajanja regulatora i mjerenja napona koriste se osigurači nazivne struje 2A (cilindrični tip 10x38). Isti tip osigurača, ali nazivne struje 6A, koristi se za napajanje svitaka kondenzatorskih sklopnika.

Za zaštitu energetskog djela korišteni su rastavljači osigurača NH00 montirani na bakrene sabirnice 30x10mm (slika 4.11). Dva stupnja kompenzacije spajaju se na jedan rastavljač sa

visokoučinskim osiguračima nazivne struje 80A, tako da su u kompenzaciji ukupno 3 rastavljača osigurača. Nakon spajanja priključnih kabela kompenzacijskog uređaja na sabirnice, montira se pleksiglas zaštita na sabirnice kako bi se osigurala zaštita od dodira. Za spajanje kompenzacijskog uređaja odabran je jednožilni kabel FG7(O)R debljine  $95\text{mm}^2$  po fazi. Taj vodič može provoditi struju do 356A pri temperaturi  $35^\circ\text{C}$ .



*Slika 4.11 Izvedba zaštite energetskeg djela uređaja za kompenzaciju*

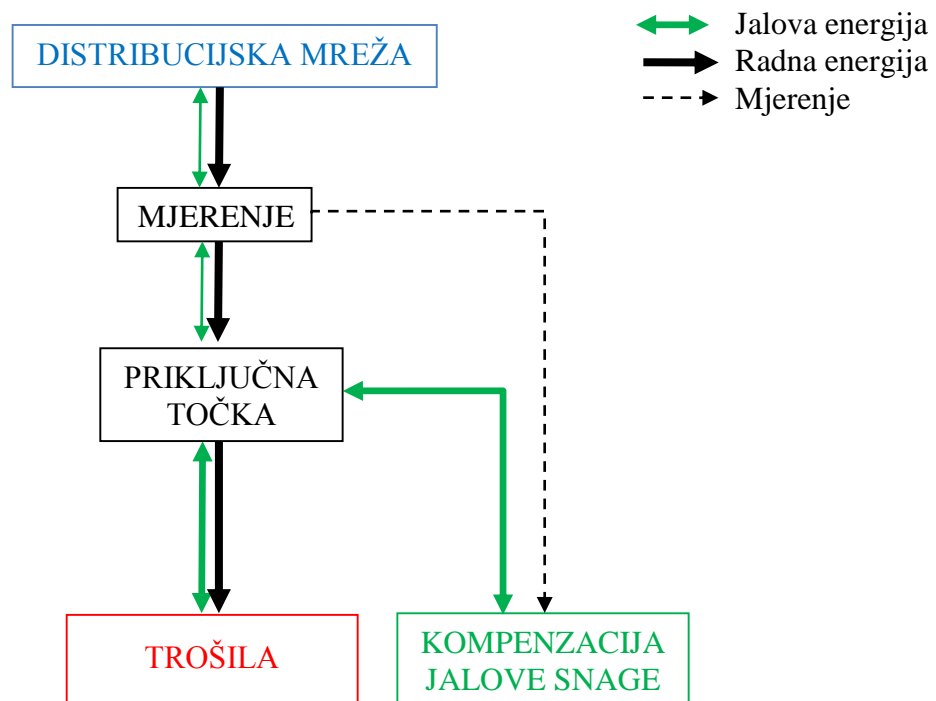
Ožičenje osigurača, prigušnica i kondenzatora izvedeno je vodičem P/F  $16\text{mm}^2$ .

Za spajanje kompenzacije u glavni razvodni ormar potrebno je ugraditi trolno podnožje osigurača NH1 koje se spaja na sabirnice. Za zaštitu su odabrani visokoučinski osigurači 250 A. (slika 4.12).



Slika 4.12 Spoj kompenzacije u glavni razvodni ormar

Prilikom instalacije uređaja potrebno je napraviti prekid u napajanju, kako bi se omogućilo spajanje priključnih vodova kompenzacije i ugradnja strujnog mjernog transformatora u beznaponskom stanju. S obzirom na mjesto ugradnje i upravljanje kompenzacijski uređaj je centralnog tipa i spaja se prema blok shemi (slika 4.13).



Slika 4.13 Blok shema spajanja kompenzacijskog uređaja

Završen kompenzacijski uređaj:

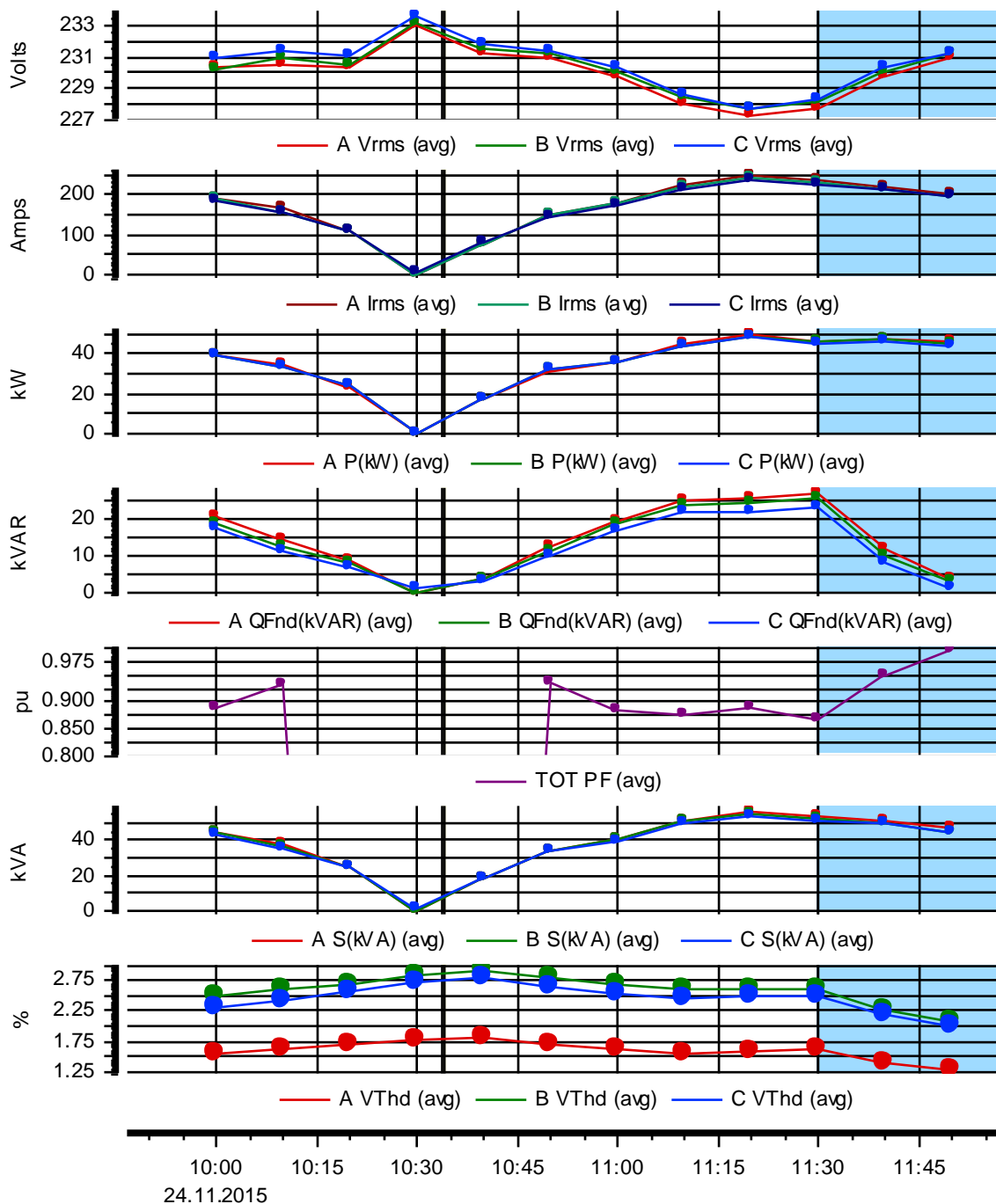


*Slika 4.14 Automatski prigušeni kompenzacijski uređaj tip ERG QAPL 090-7*

#### **4.5. Snimka novog stanja**

Da bi se pokazali utjecaji kompenzacijskog uređaja izvršena su mjerenja prijenosnim analizatorom mreže DRANETZ 4400 koji smo spojili na dolazne vodove prije svih potrošača (prije glavne sklopke) [15]. Analizator mreže DRANETZ 4400 spaja se na isti način kao i vatmetar, s tim se mjerenje vrši na sve tri faze istovremeno. Analizator je podešen da uzima uzorak

podataka u svim fazama svakih 10 minuta. Dobiveni podaci obrađeni su u programu Dran-View 6. [16]



Created with DranView 6.0.23

Slika 4.15 Vremenski dijagrami rezultata mjerenja

Na slici 4.15 prikazani su vremenski dijagrami za napon, struju, radnu snagu, jalovu snagu, faktor snage, prividnu snagu i THD-V (ukupno harmoničko izobličenje napona) tim redom. Plavom bojom označen je vremenski period u kojem je radio uređaj za kompenzaciju jalove snage.

Glavna sklopka pogona ugašena je u 10:30 sati i time je ostvareno beznaponsko stanje na svim trošilima. Mjerenje je vršeno na ulaznoj strani sklopke pa je na vremenskom dijagramu jasno



vidljiv postepen porast napona. On je uzrokovan postepenim gašenjem trošila zbog toga kako bi se pripremila za beznaponsko stanje. Tokom beznaponskog stanja izvršena je ugradnja uređaja za kompenzaciju jalove snage. Nakon prekida postepeno uključivanje trošila vidljivo je kroz postepen pad napona. Primjetan je rast napona nakon uključivanja kompenzacijskog uređaja.

Vremenski dijagram struje također prikazuje postepeno gašenje trošila, stanje prekida ( $I=0A$ ) i zatim postepeno uključivanje trošila. Također je vidljivo da se kompenziranjem jalove snage smanjuje struja.

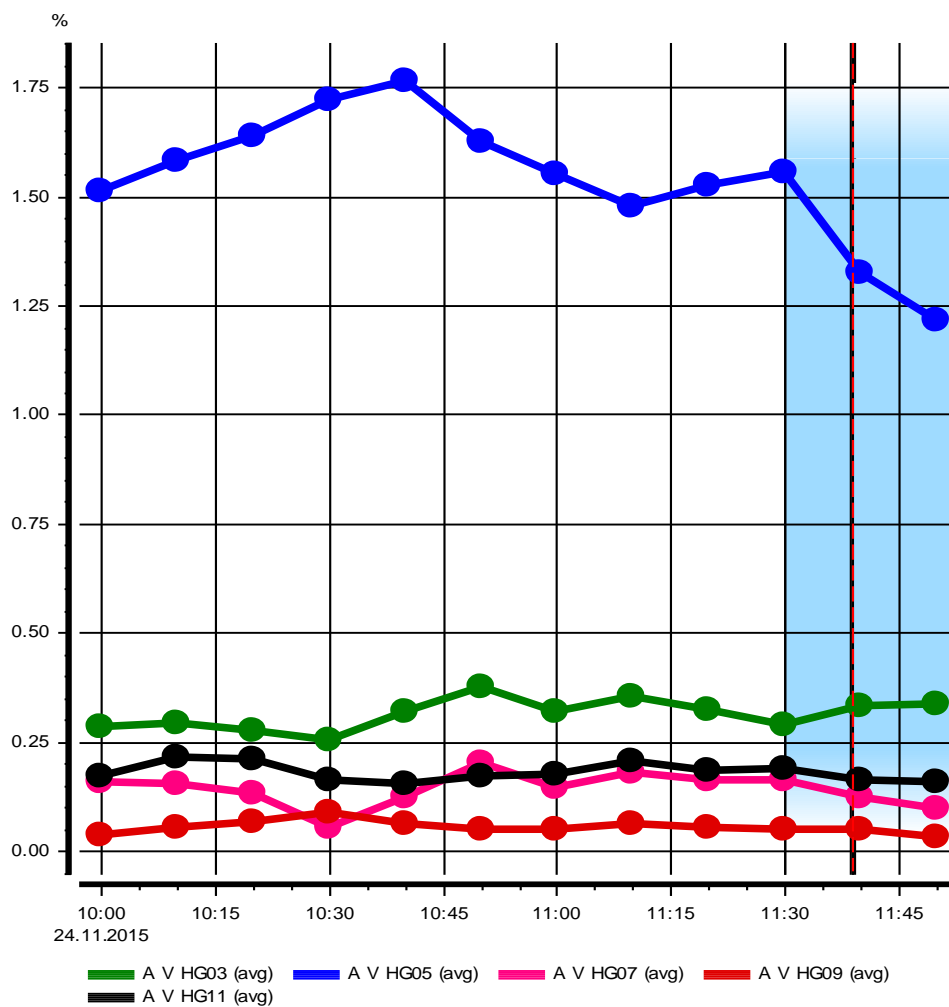
Kompenzacija jalove snage ne utječe na radnu snagu, što je jasno vidljivo na vremenskom dijagramu snage.

Pošto je mjerni uređaj bio spojen prije glavne sklopke, vremenski dijagram jalove snage moguće je protumačiti kao potrebu pogona za dodatnom jalovom snagom iz elektroenergetskog sustava. Ta potreba je zadovoljena kod samog korisnika uključivanjem kompenzacijskog uređaja, pa je i na dijagramu vidljiv pad ukupne jalove snage odnosno efekt izjednačavanja/kompenziranja induktivnog tereta trošila i kapacitivnog tereta kondenzatora.

Faktor snage je poremećen za vrijeme postepenog gašenja i uključivanja trošila, doduše to nije bio prioritet ovog mjerenja. Naglasak se stavlja na vremenski period dijagrama nakon 11:30 sati, gdje je faktor snage evidentno poboljšán kompenziranjem jalove snage.

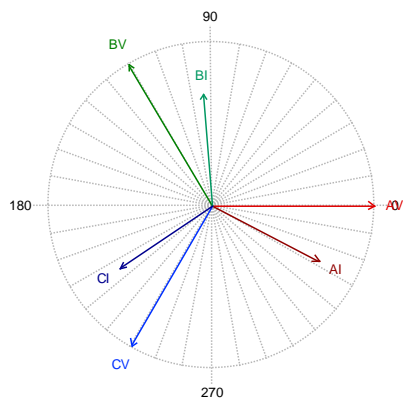
Kompenziranjem jalove snage smanjio se udio jalove snage u cjelokupnoj prividnoj snazi, što se odrazilo na dijagramu u vidu njezinog laganog pada.

Prigušnicama s faktorom prigušenja  $p = 7\%$ , odnosno rezonantnom frekvencijom  $f_r = 189\text{Hz}$  postiglo se traženo smanjenje utjecaja viših harmonika, a 5. harmonik na taj način se smanjuje i do 20%. Na dijagramu je vidljiv pad ukupnog harmoničkog izobličenja napona. Detaljniji prikaz harmonika u fazi A vidljiv je na slici 4.16 gdje su redom prikazani 3., 5., 7., 9., i 11. harmonik.



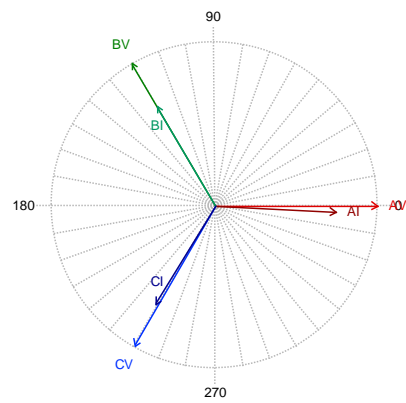
Slika 4.16 Vremenski dijagram neparnih harmonika u fazi A

Pošto instaliranim uređajem za kompenzaciju filtriramo harmonike od 5. na više, jasno je kako 3. harmonik nije time obuhvaćen, što je i vidljivo iz vremenskog dijagrama. Promjena je najviše izražena na 5. harmoniku koji je ujedno ima i najveću vrijednost u ovom slučaju, pa je njegovim filtriranjem potvrđen utjecaj prigušene kompenzacije.



a) bez kompenzacije

	A	B	C
V	0°	120°	241°
A	332°	94°	214°
$\Delta\varphi$	28°	26°	26°



b) sa kompenzacijom

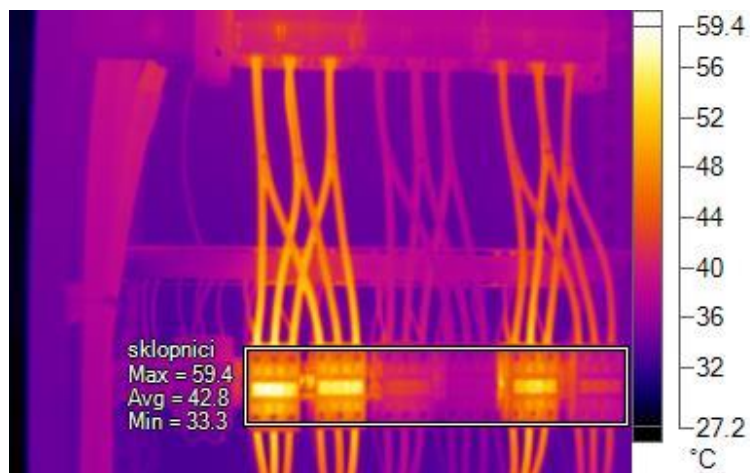
	A	B	C
V	0°	120°	241°
A	357°	120°	239°
$\Delta\varphi$	3°	360°	1°

Slika 4.17 Fazorski dijagrami prije i poslije kompenziranja jalove snage

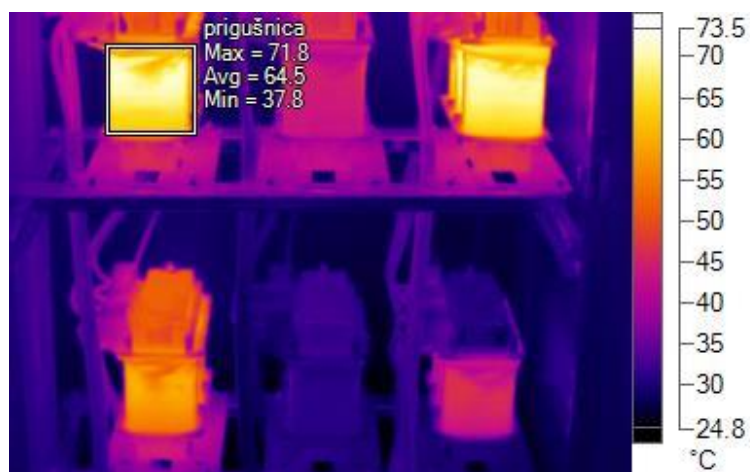
Učinak kompenziranja jalove snage prikazan je i na fazorskom dijagramu napona i struje. Slika 4.17 na mjeranju „a“ prikazuje kašnjenje struje za naponom za kut  $\varphi$  što je utjecaj induktivnog tereta na mreži. Taj uzorak je snimljen prije spajanja kompenzacijskog uređaja. Na istoj slici na mjeranju „b“ prikazani su fazori struje i napona sa aktivnim uređajem za kompenzaciju jalove snage. Vidljivo je da se kut  $\varphi$  smanjio na minimum. U tom trenutku u fazi B postignut je  $\cos\varphi=1$ , na slici 4.17 vidljivo je da struja ne kasni za naponom, pa se može reći da su u fazi.

## 5. ISPITIVANJE TERMORIZIJSKOM KAMEROM

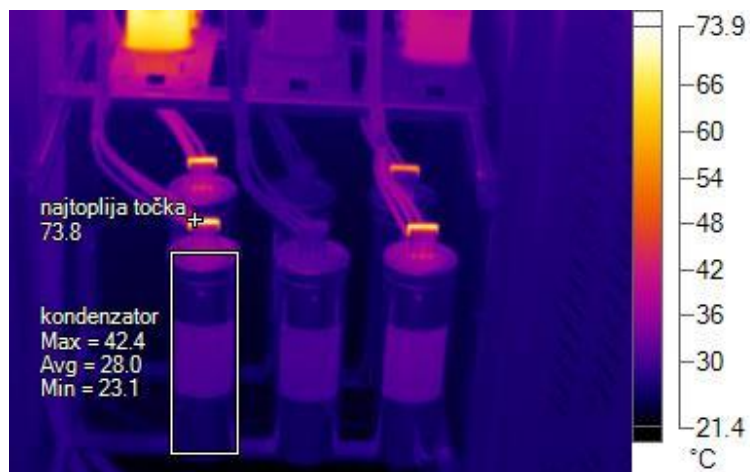
Kako bi se provjerili svi spojevi i eventualni nedostaci na opremi u kompenzacijskom uređaju izvršeno je ispitivanje termovizijskom kamerom Fluke Ti32. Slike su obrađene u programu SmartView 3.11



Slika 5.1 Termovizijska snima sklopnika



Slika 5.2 Termovizijska snimka prigušnica



Slika 5.3 Termovizijska snimka kondenzatora

Termovizijsku kameru Fluke Ti32 na korištenje ustupila je firma ERG d.o.o. iz Varaždina.

Snimanje termovizijskom kamerom nalazi široku primjenu u industrijskom održavanju, gdje se koristi za kontrolu temperature namotaja motora i generatora, a u energetici ima posebno veliku korist jer se mogu ispitivati elementi koji predstavljaju veliki rizik od električnog udara, a ispitivanje se može vršiti kod normalnog opterećenja pogona bez zastoja. Kvarovi koji se detektiraju često nisu vidljivi golim okom, moguće je detektirati slabe kontakte, dotrajalu opremu i probleme uzrokovane preopterećenjem.

Na slici 5.1 prikazane su temperature sklopnika. Jasno je vidljivo da sklopnici koji su u tom trenutku bili uklopljeni imaju povišenu temperaturu, odnosno maksimalnu temperaturu  $59,4^{\circ}\text{C}$ , minimalnu temperaturu  $33,3^{\circ}\text{C}$ , a prosječna zabilježena temperatura sklopnika bila je  $42,8^{\circ}\text{C}$ . Vidljivo je kako nema povišene temperature na spojevima, a izmjerena temperatura sklopnika je unutar dopuštenih vrijednosti.

Na slici 5.2 vidljiva je temperatura prigušnica, isto kao i kod sklopnika jasno se razazna koje prigušnice su u tom trenutku bile uključene. Izmjerena je maksimalna temperatura  $71,8^{\circ}\text{C}$ , minimalna temperatura  $37,8^{\circ}\text{C}$ , te prosječna temperatura  $64,5^{\circ}\text{C}$ . Također ni kod prigušnica nije uočena povišena temperatura koja bi upućivala na kvar ili loš spoj.

Kod kondenzatora na slici 5.3 najviša zabilježena temperatura je na keramičkom otporniku za pražnjenje gdje je maksimalna trenutna temperatura iznosila  $73,8^{\circ}\text{C}$ . Bitnija je temperatura samog kućišta kondenzatora, izmjerena je maksimalna temperatura  $42,4^{\circ}\text{C}$ , prosječna  $28,0^{\circ}\text{C}$ , a najniža temperatura iznosila je  $23,1^{\circ}\text{C}$ . Veoma je bitno da kondenzator ima omogućeno prirodno strujanje hladnog zraka za hlađenje, to je na ovome uređaju postignuto ventilacijskim otvorima na ormaru. Komponente u ormaru su raspoređene tako da su prigušnice koje se najviše zagrijevaju postavljene iznad kondenzatora, dok su kondenzatori koji su najosjetljiviji na toplinske utjecaje postavljeni na samo dno ormara gdje je ujedno i najniža temperatura u ormaru.

## 6. Zaključak

Spajanjem induktivnih ili kapacitivnih trošila na mrežu dolazi do faznog pomaka struje i napona. Pošto u praksi se najčešće susreću induktivna opterećenja a rjeđe kapacitivna, najčešće se govori o kašnjenju struje za naponom. Kod takvih slučajeva vodičima putuje induktivna jalova energija koja je potrebna za rad induktivnih trošila. Budući da se jalova energija izmjenjuje između izvora i trošila, djelatno se ne iskorištava, a njezino prenošenje vodovima stvara opterećenje pa ju je potrebno smanjiti na minimum. To se postiže spajanjem tereta suprotnog karaktera odnosno kapacitivnog opterećenja kod kojeg struja prethodi naponu. Taj postupak znači izjednačavanje induktivne i kapacitivne jalove komponente u mreži, a naziva se kompenzacija.

Jalova energija stvara troškove distributeru električne energije, pa zbog toga distributer električne energije naplaćuje naknadu za prekomjerno preuzetu jalovu energiju onim korisnicima koji ne ostvare faktor snage  $\cos\varphi = 0,95$  ili veći. Time se potiče korisnike da jalovu energiju kompenziraju čim bliže potrošačima.

Industrijska postrojenja koja su najveći potrošači na mreži, a time ujedno i imaju najveću potrebu za jalovom energijom, susreću se s novim izazovom, a to su viši harmonici. Sve više je nelinearnih potrošača koji su generatori viših harmonika, a dodavanjem kondenzatora u takve mreže povećavaju se viši harmonici i postoji opasnost od ulaska u rezonanciju. Rezonancija može imati štetne posljedice za kondenzatore, zaštitne elemente, mjernu opremu i sl. Viši harmonici mogu se smanjiti ugradnjom filtera, a jedan od načina je ugradnjom prigušnice u seriju s kondenzatorom. Ugradnjom takvih prigušenih kompenzacijskih uređaja eliminira se mogućnost pojave rezonancije.

Svaku komponentu takvog uređaja treba pravilno dimenzionirati kako bi se postigao željeni efekt. U ovom radu je za primjer prikazana ugradnja automatskog prigušenog kompenzacijskog uređaja snage  $Q_N = 90$  kVAr sa faktorom prigušenja  $p = 7\%$ , odnosno rezonantnom frekvencijom  $f_r = 189$  Hz. Prikazan je proračun kroz koji se dolazi do potrebnih elemenata uređaja za kompenzaciju.

Obavljena su mjerenja prijenosnim analizatorom mreže Dranetz 4400 prije, tokom i nakon ugradnje kompenzacijskog uređaja. Rezultati mjerenja pokazuju pravilan rad uređaja, kojim je postignuta zadovoljavajuća kompenzacija jalove snage uz filtriranje 5. i viših harmonika. Naravno poboljšanjem faktora snage iznad 0,95 eliminirano je plaćanje naknade za prekomjerno preuzetu jalovu energiju prema distributeru električne energije.

Provjera cijelog uređaja izvršena je termovizijskom kamerom Fluke Ti32. Nisu uočena odstupanja od radnih temperatura pojedinih komponenata.

U Varaždinu, \_\_\_\_\_

Marko Mihalić

## 7. Literatura

1. Muzej komunikacija Macao, *AC (Alternating Current) Generators* [online]. Dostupno na: [http://macao.communications.museum/eng/exhibition/secondfloor/MoreInfo/2\\_4\\_1\\_ACG\\_enerador.html](http://macao.communications.museum/eng/exhibition/secondfloor/MoreInfo/2_4_1_ACG_enerador.html) [14. veljače 2016.]
2. Wolf, R. (1985) *Osnove električnih strojeva*. Zagreb: Školska knjiga.
3. London South Bank University, *Power Factor Correction* [online]. Dostupno na: <http://www.blc.lsbu.ac.uk/eservices/Module1/Module%201f.html> [17. veljače 2016.]
4. Pavić, A. (2003) *Osnove elektrotehnike: udžbenik za 2. razred elektrotehničkih škola*. 2. izd. Zagreb: Element.
5. Stack Overflow, *Electrical Engineering* [online]. Dostupno na: <http://electronics.stackexchange.com/questions/169957/what-does-it-mean-for-reactive-power-to-be-delivered-consumed> [11. veljače 2016.]
6. Stanić, E. (2007) *Osnove elektrotehnike*. 29. izd. Zagreb: Školska knjiga.
7. Udovičić, B (2005) *Elektroenergetski sustavi*. Zagreb: Kigen.
8. Srb, N. (2007) *Elektromotori i elektromotorni pogoni*. Zagreb: Graphis.
9. Katalog EPCOS (2013) *Power Factor Correnction*.
10. Riteh, *Kompenzacija jalove energije* [online]. Dostupno na: <http://www.riteh.eu/kompenzacija-jalove-energije/> [26. prosinca 2015.]
11. Große-Gehling, M. et. al. (2009) *Blindleistungskompensation: Netzqualität*. Berlin: VDE Verlag.
12. Just, W. i Hofman, W. (2003) *Blindstromkompensation in der Betriebspraxis*. Berlin: VDE Verlag.
13. Katalog ERG (2010) *Niskonaponski uređaji za kompenzaciju jalove snage*.
14. Katalog EPCOS (2001) *Power Factor Correnction*.
15. Dranetz-BMI (2004) *PowerGuide 4400: User's Guide*. New Jersey
16. Dranetz-BMI, *Dran-View 6.0 Proffesional/Enterprise: User's Guide AC Power Analysis Software*. New Jersey.

## Popis slika

Slika 1.1 Inducirani napon kod vrtnje svitka u homogenom magnetskom polju [1] .....	3
Slika 1.2 Vremenski dijagram izmjenične struje [3].....	4
Slika 1.3 Vremenski dijagram struje i napon kod omskog tereta [3].....	5
Slika 1.4 Vremenski dijagram struje i napona kod kapacitivnog tereta [3] .....	6
Slika 1.5 Vremenski dijagram struje i napona kod induktivnog tereta [3] .....	7
Slika 2.1 Trokut snage [5].....	9
Slika 3.1 Mjesečni račun za struju [10].....	14
Slika 3.2 Pojedinačna kompenzacija [11] .....	15
Slika 3.3 Grupna kompenzacija [11].....	16
Slika 3.4 Centralna kompenzacija [11] .....	17
Slika 4.1 Prigušnica $Q=15$ kVAr, $p=7\%$ .....	22
Slika 4.2 Kondenzator MKP440-D-16,7.....	24
Slika 4.3 Poprečni presjek MKP kondenzatora.....	25
Slika 4.4 MKP kondenzatorski svitak.....	25
Slika 4.5 Otpornik za pražnjenje kondenzatora .....	27
Slika 4.6 Sklopnik K3-32A00 230 .....	28
Slika 4.7 Stražnja i prednja strana regulatora faktora snage EPCOS BR6000-R6 .....	29
Slika 4.8 Shema spajanja regulatora faktora snage BR6000-R6.....	30
Slika 4.9 Strujni mjerni transformator prijenosnog omjera 400/5A.....	33
Slika 4.10 Blok shema automatskog prigušenog kompenzacijskog uređaja.....	34
Slika 4.11 Izvedba zaštite energetskeg djela uređaja za kompenzaciju.....	35
Slika 4.12 Spoj kompenzacije u glavni razvodni ormar.....	36
Slika 4.13 Blok shema spajanja kompenzacijskog uređaja.....	36
Slika 4.14 Automatski prigušeni kompenzacijski uređaj tip ERG QAPL 090-7.....	37
Slika 4.15 Vremenski dijagrami rezultata mjerenja .....	38
Slika 4.16 Vremenski dijagram neparnih harmonika u fazi A.....	40
Slika 4.17 Fazorski dijagrami prije i poslije kompenziranja jalove snage.....	41
Slika 5.1 Termovizijska snima sklopnika .....	42
Slika 5.2 Termovizijska snimka prigušnica .....	42
Slika 5.3 Termovizijska snimka kondenzatora .....	42

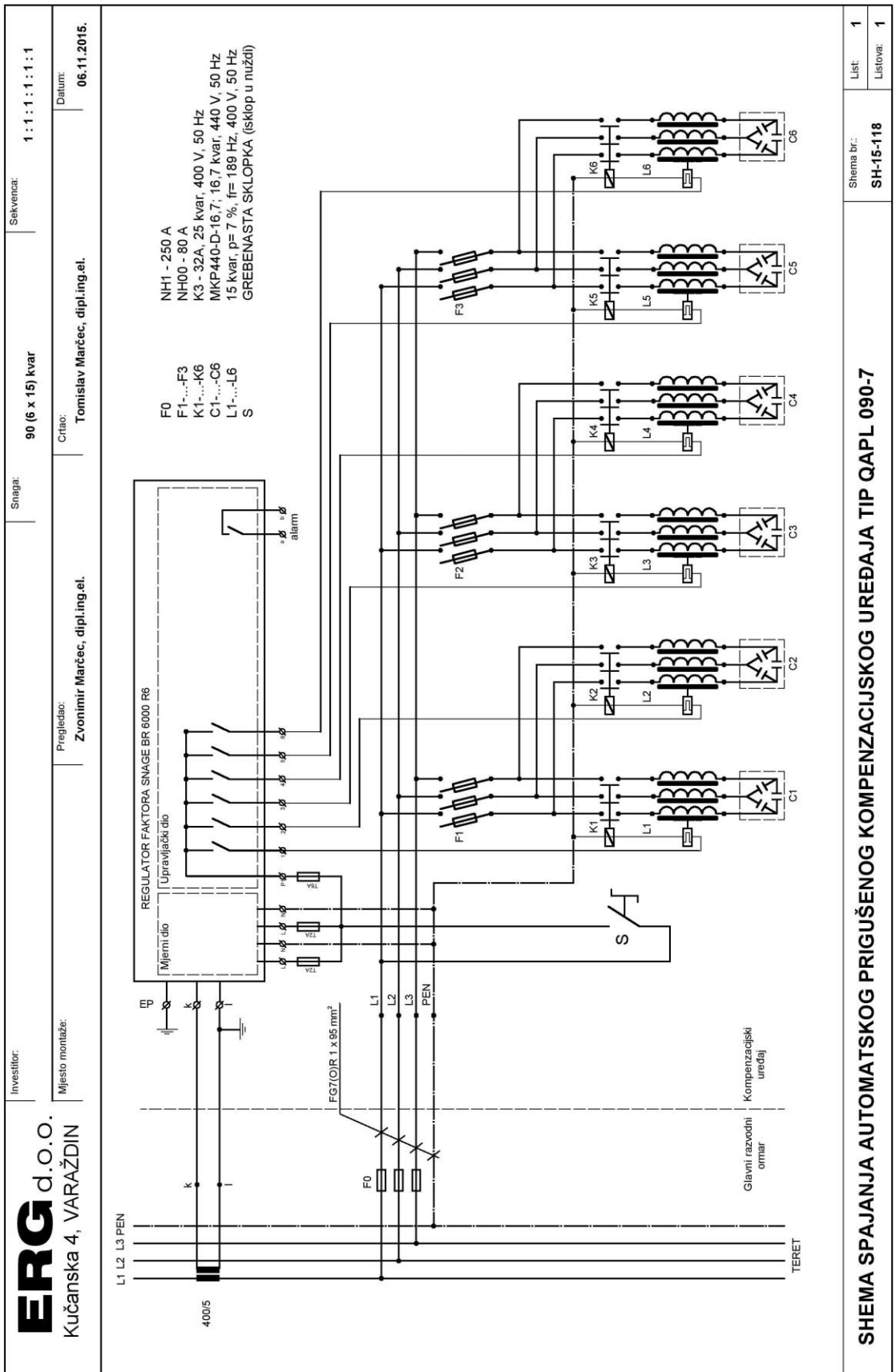


## **Popis tablica**

Tablica 3.1 Faktori proračunavanja [9] .....	13
Tablica 4.1 Mjerenje postojećeg stanja u mreži .....	19
Tablica 4.2 Nazivni podaci prigušnice .....	22
Tablica 4.3 Nazivni podaci kondenzatora MKP440-D-16,7 .....	26
Tablica 4.4 Nazivna snaga kondenzatora .....	27
Tablica 4.5 Nazivni podaci sklopnika .....	28
Tablica 4.6 Nazivni podaci regulatora faktora snage BR6000-R6.....	30

## **Prilozi**

Prilog 1 Shema spajanja automatskog prigušenog kompenzacijskog uređaja tip QAPL 090-7 ...	48
---	----



**SHEMA SPAJANJA AUTOMATSKOG PRIGUŠENOG KOMPENZACIJSKOG UREĐAJA TIP QAPL 090-7**

Prilog 1 Shema spajanja automatskog prigušenog kompenzacijskog uređaja tip QAPL 090-7