

# Kompenzacija jalove snage s primjerom tvornice kabela

---

**Baćanek, Martin**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:382798>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-29**



*Repository / Repozitorij:*

[University North Digital Repository](#)



# Kompenzacija jalove snage s primjerom tvornice kabela

---

*Baćanek, Martin*

Undergraduate thesis/ Završni rad

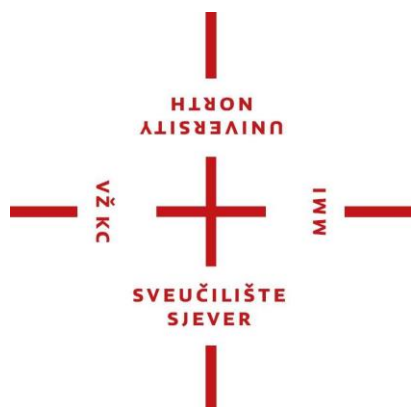
2023.

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

*Permanent link / Trajna poveznica:*

*Rights / Prava:*

*Download date / Datum preuzimanja:* **2023-03-14**

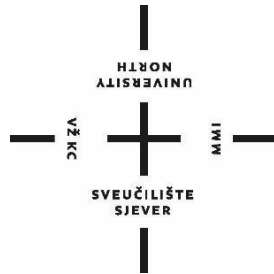


*Repository / Repozitorij:*

[University North Digital Repository](#)



**SVEUČILIŠTE SJEVER  
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**



ZAVRŠNI RAD br. 513/EL/2023

**KOMPENZACIJA JALOVE SNAGE  
S PRIMJEROM TVORNICE KABELA**

Martin Bačanek, 3770/336

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, Martin Bačanak (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Kompenzacija jalove snage s primjerom tvornice kabela (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

  
(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.

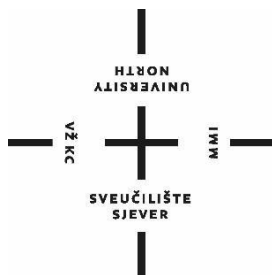
Ja, Martin Bačanak (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Kompenzacija jalove snage s primjerom tvornice kabela (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

  
(vlastoručni potpis)

**SVEUČILIŠTE SJEVER  
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**

**Odjel za elektrotehniku**



ZAVRŠNI RAD br. 513/EL/2023

**KOMPENZACIJA JALOVE SNAGE  
S PRIMJEROM TVORNICE KABELA**

**Student**

Martin Bačaneč, 3770/336

**Mentor**

dr. sc. Josip Nađ, dipl. ing. el.

Varaždin, ožujak 2023. godine

## Prijava završnog rada

### Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za elektrotehniku		
STUDIJ	preddiplomski stručni studij Elektrotehnika <input type="checkbox"/>		
PRISTUPNIK	Martin Bačanek	MATIČNI BROJ	3770/336
DATUM	17.01.2023.	KOLEGIJ	Elektromotorni pogoni
NASLOV RADA	Kompenzacija jalove snage s primjerom tvornice kabela		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Reactive power compensation with example of cable factory		
MENTOR	dr. sc. Josip Nađ	ZVANJE	Predavač
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. doc. dr. sc. Dunja Srpak 2. Josip Srpak, viši predavač 3. dr. sc. Josip Nađ, predavač 4. mr. sc. Ivan Šumiga, viši predavač 5.		

### Zadatak završnog rada

BROJ	513/EL/2023
OPIS	<p>U sklopu ovog završnog rada je potrebno obraditi temu kompenzacije jalove snage u elektromotornim pogonima.</p> <p>U uvodnom dijelu završnog rada je potrebno prikazati razloge nastanka jalove snage te osnovne principe njenog kompenziranja.</p> <p>Glavni dio završnog rada treba sačinjavati proračun kompenzacije s prikazom aktualnog rješenja u tvornici električkih kabela Elka.</p> <p>Na kraju je potrebno prikazati osnovnu ekonomsku računicu cijelog postupka.</p>

ZADATAK URUČEN

14.01.2023.



JNađ

## **PREDGOVOR**

Zahvaljujem svojem mentoru dr. sc. Josipu Nađu te timu inženjera iz tvornice kabela Elka koji su mi svojim korisnim savjetima i kvalitetnim uputama olakšali izradu završnog rada.

Martin Bačaneč

## Sažetak

U ovom radu opisani su utjecaji djelatnog, kapacitivnog i induktivnog trošila u krugu izmjenične struje. Istaknuta je problematika jalove snage te zašto ona nastaje, koji uređaji je proizvode te što se prema teoriji postiže kompenzacijom jalove snage. U radu je prikazana centralna kompenzacija tvornice kabela Elka te su navedene brojne prednosti same kompenzacije. Opisani su uređaji koji su potrebni za izvođenje kompenzacija te njihova glavna svojstva. Zatim su objašnjeni pojedini načini kompenzacije jalove snage prema razmještanju i vrsti trošila. Na osnovi primjera transformatorske stanice prikazan je proračun kompenzacije te ukupna ekonomska ušteda cijelog postupka. Rad je završen osnovnim ekonomskim proračunom kompenzacije na primjeru transformatorske stanice.

### KLJUČNE RIJEČI:

izmjenična struja, jalova snaga, faktor snage, kompenzacija, kondenzatorske baterije



## **Abstract**

This paper describes the effects of active, capacitive, and inductive loads in an AC circuit. The issues of reactive power and why it occurs, the devices that produce it, and how reactive power compensation is achieved according to theory are highlighted. The paper presents the centralized compensation of the Elka cable factory and outlines numerous advantages of power factor correction. The necessary devices for power factor correction and their main properties are described. Various ways of reactive power compensation based on the type and placement of loads are explained. Based on an example of a transformer station, the power factor correction calculation is shown, as well as the total economic savings of the entire process. The paper concludes with a basic economic calculation of power factor correction using the example of a transformer station.

### **KEY WORDS:**

Alternating current, reactive power, power factor, compensation, capacitor banks

## Popis korištenih kratica i oznaka

$c$	Faktor preračunavanja
$C$	Kapacitet kondenzatora
$\cos\varphi$	Faktor snage
$I$	Efektivna vrijednost struje
$I_c$	Nazivna vrijednost struje kondenzatorske baterije
$I_N$	Nazivna vrijednost struje
$I_{max}$	Maksimalna vrijednost struje
$I_{UKL}$	Nazivna vrijednost struje uklapanja
$I_0$	Nazivna vrijednost struje praznog hoda
$JEN J1$	Induktivna energija obračunata po višoj tarifi
$L$	Induktivitet prigušnice
$P$	Radna snaga
$R$	Otpor
$RNT R1$	Radna energija obračunata po nižoj tarifi
$RVT R1$	Radna energija obračunata po višoj tarifi
$S$	Prividna snaga
$t$	Vrijeme
$U$	Efektivna vrijednost napona
$U_{max}$	Maksimalna vrijednost napona
$Q$	Jalova snaga
$Q_c$	Kapacitivna jalova snaga
$Q_L$	Induktivna jalova snaga
$W$	Rad izmjenične struje
$W_j$	Jalova energija
$W_r$	Radna energija
$X_c$	Kapacitivni otpor
$X_L$	Induktivni otpor
$\omega$	Kružna frekvencija

# Sadržaj

<b>1. Uvod</b> .....	1
<b>2. Trošila u krugu izmjenične struje</b> .....	2
2.1. Radni otpor krugu izmjenične struje .....	2
2.2. Kapacitivni otpor u krugu izmjenične struje .....	3
2.3. Induktivni otpor u krugu izmjenične struje .....	5
<b>3. Snaga i energija u krugu izmjenične struje</b> .....	6
3.1. Trokut snage .....	6
3.2. Radna (djelatna) snaga .....	7
3.3. Reaktivna (jalova) snaga .....	7
3.4. Prividna snaga .....	8
<b>4. Kompenzacija jalove snage</b> .....	9
4.1. Pобоljšanje faktora snage .....	9
4.2. Kompenzacija jalove snage upotrebom kondenzatora .....	11
4.3. Primjer proračuna kapacitivne jalove snage .....	13
4.4. Načini kompenzacije jalove snage .....	16
4.4.1. Pojedinačna kompenzacija .....	16
4.4.2. Grupna kompenzacija .....	18
4.4.3. Centralna kompenzacija .....	19
<b>5. Uređaji za kompenzaciju jalove snage</b> .....	25
5.1. Kondenzatorske baterije .....	25
5.2. Prigušnice .....	29
5.3. Sklopnici .....	31
5.4. Regulator faktora snage .....	33
5.5. Daljinski nadzor i praćenje potrošnje .....	34
<b>6. Osnovna ekonomska ušteda</b> .....	36
6.1. Ušteda ugradnjom kondenzatora .....	36
6.2. Tarifni poticaji za kompenzaciju jalove snage .....	39
<b>7. Zaključak</b> .....	41
<b>8. Literatura</b> .....	42
<b>9. Popis slika</b> .....	43
<b>10. Popis tablica</b> .....	44

# 1. Uvod

Globalni porast cijena fosilnih energenata pa tako i povećana potražnja za električnom energijom glavni je uzrok u traženju ekonomičnijih rješenja u elektroenergetskom sustavu. Kompenzacija jalove snage jedna je od najučinkovitijih metoda za poboljšanje kvalitete električne energije [1].

Kompenzacijom jalove snage eliminira se nepotreban prijenos jalove snage kroz mrežu, a smanjenjem protoka jalove snage kroz mrežu smanjuju se ukupni gubici djelatne snage. Jalovom snagom se opterećuju vodovi u elektroprijenosnom sustavu te u pojedinim područjima uzrokuju teškoće u radu. Zbog toga distributer električne energije dodatno naplaćuje naknadu za prekomjernu preuzetu jalovu snagu ako se na mjestu potrošnje ne zadovoljava faktor snage 0,95 ili veći [1]. Time distributeri električne energije nastoje stimulirati potrošače da aktivno kompenziraju jalovu snagu i poboljšavaju kvalitetu mreže. Mjesta s najvećom potrošnjom jalove snage su industrijska postrojenja koja sadrže asinkrone motore, transformatore i slične induktivne uređaje.

U danjim poglavljima koja slijede opisano je zbog čega je ovim uređajima potrebna jalova snaga te kako se oni ponašaju na mreži. Najčešći uređaji za kompenzaciju su kondenzatorske baterije, a još se koriste i prigušnice te ostali uređaji poput regulatora faktora snage, kondenzatorskih sklopnika i zaštitnih osigurača. Kompenzacija preko kondenzatorskih baterija odlikuje se dugim vijekom trajanja, smanjenim troškovima ugradnje te brzom ekonomskom isplativošću.

Opisani su načini kompenzacije jalove snage te su navedene prednosti i nedostaci svake metode prilikom kompenzacije. U ovom radu glavna pažnja je posvećena centralnoj kompenzaciji u tvornici kabela Elka gdje je prikazana navedena kompenzacija u transformatorskim stanicama TS1 i TS2.

Cilj ovog rada je prikazati značaj kompenzacije jalove snage u industrijskim postrojenjima te shvatiti brojne prednosti koje postizemo samom kompenzacijom.

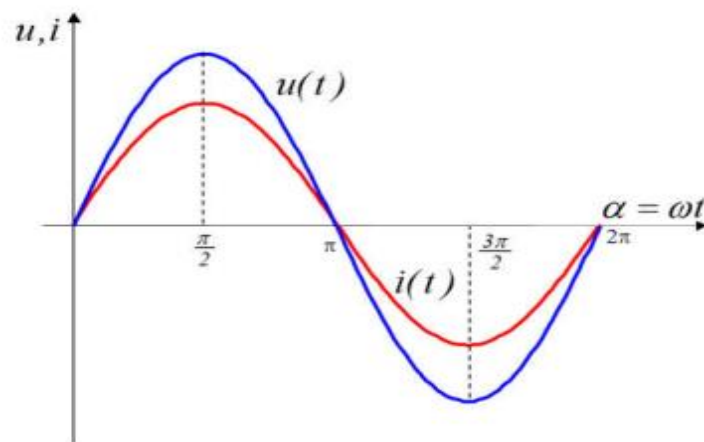
## 2. Trošila u krugu izmjenične struje

Istosmjerni strujni krugovi sastoje se od različitih kombinacija izvora, otpora, svitaka i kondenzatora. U takvim mrežama otpor  $R$  predstavlja odupiranje prolasku električne struje, kondenzator  $C$  po završetku prijelaznih pojava predstavlja prekid strujnog kruga, a svitak  $L$  uz zanemareni otpor predstavlja kratki spoj.

U izmjeničnim strujnim krugovima izmjenična struja stalno mijenja smjer struje i polaritet napona stoga se očituju drugačija ponašanja nabrojanih elemenata.

### 2.1. Radni otpor krugu izmjenične struje

Otpor kroz koji protječe izmjenična struja naziva se radni otpor [2]. Na djelatnom otporu su napon  $u(t)$  i struja  $i(t)$  u svakom trenutku povezani Ohmovim zakonom preko otpora  $R$ . Sinusoide napona i struje imaju iste maksimalne i nulte vrijednosti, tj. između napona i struje nema faznog pomaka. Ako između napona i struje nema faznog pomaka, kažemo da su napon i struja u fazi.



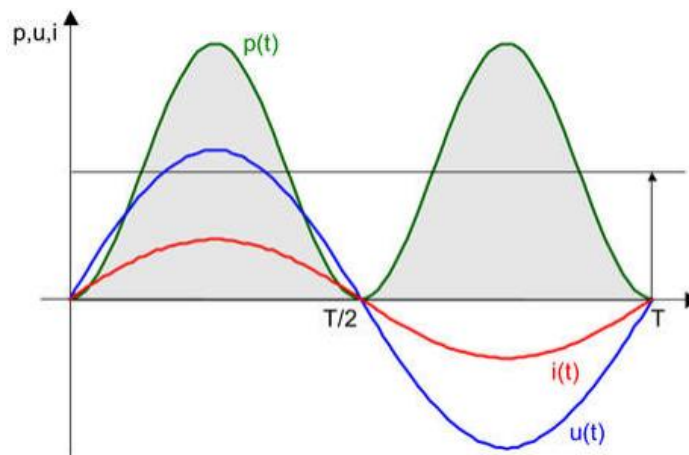
Slika 1. Prikaz struje i napona na otporu u fazi [2]

Struja i napon su vremenski promjenjive veličine pa za trenutnu snagu na otporu vrijedi sljedeći izraz.

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (2-1)$$

Trenutna snaga je također sinusoida s dvostrukom frekvencijom koja ne može biti negativna. Takva snaga s pozitivnim predznakom na djelatnom trošilu obavlja rad. Električna energija se nepovratno pretvara u toplinsku (vrši se električni rad) pa se dobivena snaga naziva radna ili djelatna snaga. Radna snaga jednaka je srednjoj vrijednosti između najmanje i najveće snage ( $U_m \cdot I_m$ ). [2]

$$P = \frac{U_m \cdot I_m}{2} = I^2 \cdot R \text{ [W]} \quad (2-2)$$

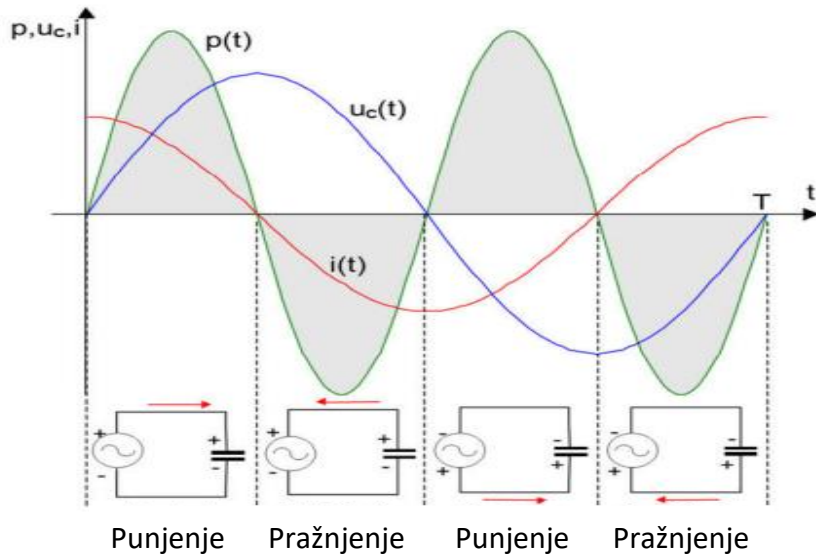


Slika 2. Krivulje napona, struje i snage na otporniku [1]

## 2.2. Kapacitivni otpor u krugu izmjenične struje

Uz radne otpore kondenzatori su najčešće pasivne komponente izmjeničnog sustava. Koriste se za razne primjene poput odvajanja istosmjerne struje od izmjenične, stvaranja faznog pomaka struje, uklanjanja harmonika, pohranu električne energije, kratkog spajanja izmjeničnih izvora itd. Dovede li se na kondenzator izmjenični napon, on će se zbog stalne promjene polariteta napona naizmjenično nabijati i izbijati. [2]

U trenutku kada nema napona na kondenzatoru (kondenzator je prazan) struja nabijanja na kondenzatoru je najveća. Ako se napon dovede na nabijen kondenzator, tada je struja jednaka nuli. Zbog ove razlike sinusoida struje ne prati sinusoidu napona nego su fazno pomaknute za kut  $\varphi = \frac{\pi}{2} = 90^\circ$ . Na kondenzatoru struja prethodi naponu za  $90^\circ$ .



Slika 3. Krivulja struje, napona i snage na kondenzatoru [1]

Idealni kondenzator u krugu izmjenične struje stvara otpor kapacitivnog karaktera i označava se sa  $X_c$ .

$$\frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I} = \frac{1}{\omega \cdot C} = X_c \quad (2-3)$$

Kapacitivni otpor je otpor u kondenzatoru koji se suprotstavlja protoku izmjenične struje te je obrnuto razmjeran frekvenciji. Ako frekvencija padne na nulu, otpor  $X_c$  teži u beskonačno i dolazi do prekida strujnog kruga. Kod ultravisokih frekvencija kapacitivni otpor postaje vrlo malen te kondenzator predstavlja kratki spoj. Pomnoži li se napon i struja na kondenzatoru, dobiva se izraz za trenutnu snagu na kondenzatoru. [2]

Trenutna snaga se mijenja prema sinusoidi s dvostrukom frekvencijom. Kod kondenzatora zbog promjene polariteta napona na izvoru energija se naizmjenično pohranjuje pa opet vraća u strujni krug te je ukupan iznos srednje vrijednosti snage na kondenzatoru jednak nuli.

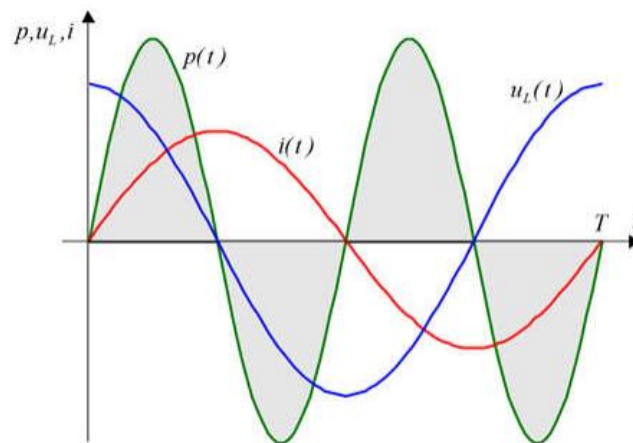
Dakle, svu energiju koju izmjenični izvor ili generator predaje kondenzatoru, kondenzator ponovo vraća u strujni krug. Ova vraćena snaga na kapacitetu naziva se kapacitivna jalova snaga i iskazuje se u voltamperima reaktivnim ( $VAr$ ).

### 2.3. Induktivni otpor u krugu izmjenične struje

Temeljno svojstvo svakog svitka je induktivnost. Induktivnost se postiže ako kroz neki svitak teče izmjenična struja. Zbog mijenjanja polariteta napona kod izmjenične struje na svitku se inducira napon samoindukcije. Svitci imaju široku primjenu u elektrotehnici. Jedna od najčešćih primjena je kod transformatora za induciranje električnog napona. U krugu izmjenične struje svitak predstavlja otpor induktivnog karaktera. Induktivni otpor je određen omjerom amplituda napona i struje i označava se sa  $X_L$ . [2]

$$\frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I} = \omega \cdot L = X_L \quad (2-4)$$

Inducirani napon u svitku razmjernan je brzini promjene struje u vremenu. Time je određena sinusoida struje u svitku. Kada je sinusoida struje jednaka nuli, napon postiže maksimalnu vrijednost. Isto tako kada sinusoida struje dosegne maksimalnu vrijednost, napon je nula. Kao i kod kapacitivnog trošila, ovdje između struje i napona postoji fazni pomak  $\varphi = \frac{\pi}{2} = 90^\circ$ , ali kod induktiviteta napon prethodi struji za  $90^\circ$ . [2]



Slika 4. Krivulja struje, napona i snage na zavojnici [1]

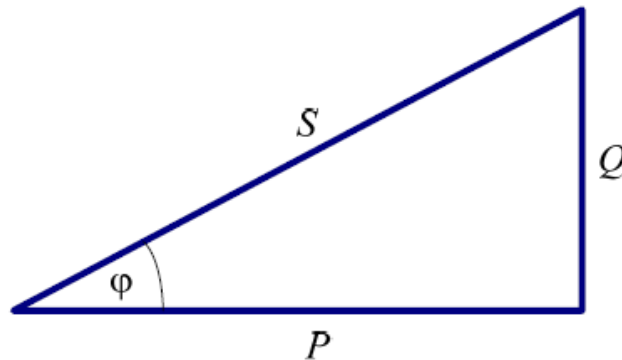
Trenutna snaga mijenja se prema sinusoidi s dvostrukom frekvencijom. U krugu s induktivitetom nema djelatnog trošila pa nema niti padova napona na trošilu, stoga je radna snaga jednaka nuli. Energija se na induktivitetu ne troši nego se pohranjuje u svitku te se ponovno vraća u strujni krug. Takva energija na svitku naziva se induktivna jalova snaga, a izražava se u voltamperima reaktivnim (VAr). [2]



### 3. Snaga i energija u krugu izmjenične struje

#### 3.1. Trokut snage

U prethodnom poglavlju 2. *Trošila u krugu izmjenične struje* spomenuto je kako se u krugu izmjenične struje pojavljuju različita trošila. Tako na trošilima razlikujemo radnu snagu na otporu te induktivnu i kapacitivnu jalovu snagu na reaktivnim elementima. Ukupnu snagu koju potrošač može uzimati iz mreže nazivamo prividnom snagom. Snage u izmjeničnom sustavu prikazujemo preko trokuta snage (Slika 5.)



Slika 5. Trokut snage [1]

Na trokutu snage najjasnije je vidljiv odnos radne ( $P$ ), jalove ( $Q$ ) te ukupne prividne snage ( $S$ ). Preko trigonometrijskih funkcija za pravokutni trokut možemo zapisati sljedeće izraze:

$$P = S \cdot \cos\varphi \quad \text{- radna snaga} \quad (3-1)$$

$$Q = S \cdot \sin\varphi \quad \text{- jalova snaga} \quad (3-2)$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad \text{- faktor snage} \quad (3-3)$$

Faktor snage je jedna od karakteristika koje se često navode na elektrotehničkim uređajima, a prikazuje koliki dio prividne snage koristi vanjsko trošilo. Faktor snage je prema trigonometriji pravokutnog trokuta definiran kao omjer priležeće katete nad hipotenuzom odnosno kao omjer radne i prividne snage. Vrijednost faktora snage kreće se između 0 do 1. Ako faktor snage iznosi 1, radi se o čistom radnom trošilu, a ako iznosi 0, radi se o čistom kapacitivnom ili induktivnom trošilu. Strujni krug izmjenične struje najčešće se sastoji od nekoliko radnih te reaktivnih elemenata stoga faktor snage često iznosi između 0 i 1, tj.  $0 \leq \cos\varphi \leq 1$ .

Kada se električna energija pretvara u neku drugu korisnu energiju, tada izmjenična struja vrši rad  $W$ . Mjerna jedinica kojom izražavamo električni rad izmjenične struje je vat po satu  $Wh$ . Ako se rad vrši na potpuno induktivnom ili kapacitivnom teretu, tada je ukupan rad izmjenične struje jednak nuli jer je za izračun rada potrebna radna snaga, a ona kod reaktivnih elemenata iznosi nula. U strujnim krugovima često nalazimo kombinaciju radnih i induktivnih tereta: omsko-induktivni, omsko-kapacitivni, stoga na ukupnu snagu utječe i faktor snage  $\cos\varphi$ .

Takav rad obavljen u nekom vremenskom intervalu  $t$  izražava se preko izraza:

$$W = P \cdot t \cdot \cos\varphi [Wh] \quad (3-4)$$

### 3.2. Radna (djelatna) snaga

Radna snaga izmjenične struje jednaka je umnošku napona i struje na trošilu. Kako se snaga mijenja po sinusoidi koja se nalazi u pozitivnom području, radna snaga ne može biti negativna. Ako su napon i struja na trošilu jednaki nuli, u tom slučaju energija ne dolazi iz izmjeničnog strujnog kruga te trenutna snaga iznosi nula. Isto tako, ako su napon i struja dosegli maksimalnu vršnu vrijednost, snaga je na tom trošilu najveća. Radna snaga pojavljuje se na omskom ili djelatnom trošilu.

Ako se u izmjeničnom strujnom krugu uz omsko trošilo pojavi i neko induktivno ili kapacitivno trošilo, tada za izračun radne snage koristimo i faktor snage  $\cos\varphi$ .

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi [W] \quad (3-5)$$

### 3.3. Reaktivna (jalova) snaga

Jalova snaga je ona koja se pojavljuje u izmjeničnim strujnim krugovima na reaktivnim elementima npr. na zavojnici ili kondenzatoru. Jalova snaga stvara energiju koja se ne troši i ne vrši djelatni rad nego se izmjenjuje između izvora i reaktivnog trošila. U praksi jalova snaga smatra se nepoželjnom snagom koja dodatno opterećuje vodove te elektroenergetski sustav, no od velikog je značaja jer se pomoću nje prikazuje prisustvo energije magnetskog polja. Ovisno o faznom pomaku jalova snaga može biti induktivnog ili kapacitivnog karaktera.

Ako napon prethodi struji, tada imamo pozitivnu jalovu snagu induktivnog karaktera, a ako struja prethodi naponu, tada je jalova snaga negativnog kapacitivnog karaktera.

Kada su u izmjeničnoj mreži spojeni različiti tereti, udio jalove snage računa se prema izrazu.

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi \text{ [VA]} \quad (3-6)$$

### 3.4. Prividna snaga

Prividna snaga je prema trokutu snage definirana kao ukupna radna i jalova snaga koju potrošač uzima iz mreže. Prividna snaga također definira i snagu nekog trošila jer ukupna snaga ovisi i o faznom pomaku. Prema faznom pomaku moguće je utvrditi ukupnu iskorištenu energiju u trošilu.

Ako je fazni pomak manji odnosno faktor snage  $\cos\varphi$  veći, tada će iskorištena energija u trošilu biti veća. Prema tome, ukupno iskorištenje snage koju trošilo prima ovisi o faznom pomaku te može biti:

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

Ukupnu prividnu snagu na trošilu bez uračunate ukupne djelotvornosti računa se kao umnožak efektivnih vrijednosti napona i struje.

$$S = U \cdot I \text{ [VA]} \quad (3-7)$$

Prividnu snagu moguće je izračunati i geometrijski preko trokuta snage.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ [VA]} \quad (3-8)$$

## 4. Kompenzacija jalove snage

### 4.1. Poboljšanje faktora snage

Jalova snaga je snaga ili energija koju stvaraju reaktivni elementi u izmjeničnim strujnim krugovima. Takva stvorena energija se ne troši nego se izmjenjuje između izvora i trošila te dodatno opterećuje elektroprijenosni sustav i stvara neželjene gubitke.

U elektroenergetskoj mreži izmjenične struje zbog upotrebe magnetskog polja prevladavaju induktivna trošila s induktivnom jalovom snagom. Jedni od najvećih potrošača jalove snage su transformatori i asinkroni motori.

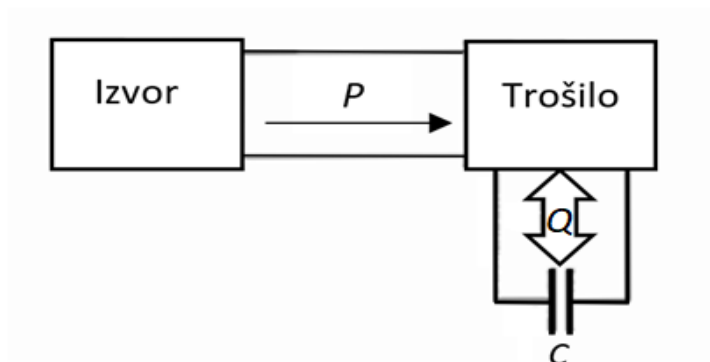
Transformatorima je jalova snaga potrebna za magnetiziranje jezgre. Ova potrošnja jalove snage u transformatorima je vrlo značajna uzimajući u obzir da je napon u mreži potrebno nekoliko puta transformirati prije dolaska do potrošača.

Transformatori u praznom hodu troše malo jalove snage, no pri opterećenju potrošnja jalove snage raste s opterećenjem. Kako transformator predstavlja otpor vrlo visokog induktivnog karaktera čiji je pokazatelj napon kratkog spoja  $u_k$ , time i struja stvara velike gubitke jalove snage koji se povećavaju s kvadratom struje opterećenja. Prema tome, jalova snaga koju uzima transformator nazivne snage  $S_n$ , napona kratkog spoja  $u_k$ , opterećen prividnim opterećenjem  $S$  iznosi. [3]

$$Q_q = u_k \cdot S_n \cdot \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 \text{ [VAr]} \quad (4-1)$$

Faktor snage asinkronih motora ovisi o njihovom opterećenju, njihovoj nazivnoj snazi i njihovoj konstrukciji. Neopterećen asinkroni motor ima vrlo nizak faktor snage, no s povećanjem opterećenja faktor snage naglo raste te dosegne najveću vrijednost koja se kreće između 0.75 i 0.90. Uzrok takvog poboljšanja faktora snage je u tome da pri porastu radne snage jalova snaga lagano raste od vrijednosti praznog hoda do punog opterećenja. Faktor snage postaje niži s povećanjem broja polova te s primjenom zatvorenih izvedbi i motora s kliznim kolutima. [3]

Kako kod induktivnih tereta napon prethodi struji za smanjenje odnosno izjednačavanje faznog pomaka, u strujni krug se uključuju kapacitivni tereti suprotnog karaktera. Praktično se to izvodi dodavanjem kondenzatora u strujni krug. Na taj način se dovodi potrebna jalova snaga induktivnom trošilu.



Slika 6. Izmjena jalove snage između induktivnog trošila i kondenzatora [4]

Kondenzator je potrebno uključiti čim bliže induktivnom trošilu, a njegovim uklapanjem izjednačuju se jalove komponente suprotnog karaktera te se time vrši postupak koji se naziva kompenzacija jalove snage.

Promjenom jalove snage mijenja se omjer radne i prividne snage, tj. poboljšava se faktor snage. Dakle, kompenzacija jalove snage nije ništa drugo nego poboljšanje faktora snage  $\cos\varphi$ .

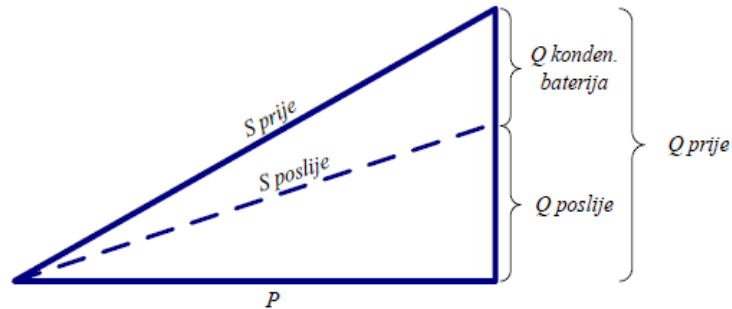
Faktor snage moguće je poboljšati i dodavanjem otpora u strujni krug; time se poveća radna snaga, no ova metoda zbog štednje energije nije isplativa. U Tablici 1. okvirno su prikazani faktori snaga za pojedine uređaje prije kompenzacije te nakon kompenzacije.

<i>Trošilo</i>	<i><math>\cos\varphi</math> (prije, poslije kompenzacije)</i>
<i>neopterećen transformator</i>	0.2 ... 0.4
<i>prigušnica</i>	0.2 ... 0.5
<i>privučena sklopka</i>	0.2 ... 0.4
<i>privučen relej</i>	0.2 ... 0.5
<i>nazivno opterećen elektromotor</i>	0.8 ... 0,93
<i>preopterećen elektromotor</i>	0.4 ... 0.8
<i>električni grijač</i>	1

Tablica 1. Faktori snaga za različita trošila [4]

## 4.2. Kompenzacija jalove snage upotrebom kondenzatora

Pomoću trokuta snage određuje se kapacitivna jalova snaga  $Q_c$  koja je potrebna za povećanje faktora snage.



Slika 7. Poboljšanje faktora snage dodavanjem kapacitivne baterije [1]

Preko trokuta snage određuje se omjer radne i jalove snage te omjer postojećeg i željenog faktora snage te se time dobiva iznos kapacitivne jalove snage.

$$Q_c = P \cdot (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \text{ [VAR]} \quad (4-2)$$

Potreban kompenzacijski kapacitet te iznos snaga i frekvenciju napona određuje se preko formule (4-3).

$$C = \frac{Q_c}{U^2 \cdot \omega} \quad (4-3)$$

Preko formule 4-2 izračuna se iznos kapacitivne jalove snage, no za izračun kompenzacijskog kapaciteta treba uračunati napon i frekvenciju, stoga se koristi formula 4-3.

Za priključni napon 220 V / 50 Hz i kapacitivnu jalovu snagu  $Q_c = 5.5 \text{ kVAR}$  vrijedi sljedeći izračun.

$$C = \frac{Q_c}{U^2 \cdot \omega}$$
$$C = \frac{5.5 \cdot 10^3}{220^2 \cdot 314.15} = 362 \mu\text{F}$$

Na Slici 8. prikazane su orijentacijske vrijednosti snage kondenzatora potrebne za kompenziranje jalove snage, ovisno o snazi elektromotora. [5]

Snaga motora (kW)	Snaga kondenzatora (kVAR)
1 ... 1,9	0,5
2 ... 2,9	1
3 ... 3,9	1,5
4 ... 4,9	2
5 ... 5,9	2,5
6 ... 7,9	3
8 ... 10,9	4
11 ... 13,9	5
14 ... 17,9	6
18 ... 21,9	8
22 ... 29,9	10
iznad 30	cca 35 % snage motora

Slika 8. Približne snage kondenzatora za kompenzaciju jalove energije pojedinih asinkronih motora [5]

Na Slici 9. prikazana je orijentacijska vrijednost snage kondenzatora za transformatore. Transformatori za razliku od asinkronih motora u praznom hodu troše malo jalove snage, no s povećanjem opterećenja raste potrošnja jalove snage [3], stoga se očituju sljedeće vrijednosti kondenzatora.

Snaga transformatora (kVA)	Snaga kondenzatora (kVAr)
15	0.81
30	1.37
45	1.84
75	2.57
112.5	3.42
150	4.28
225	5.77
300	7.13
750	9.98
1000	12.35
1500	14.25

Slika 9. Približne snage kondenzatora za kompenzaciju jalove energije pojedinih transformatora [6]

### 4.3. Primjer proračuna kapacitivne jalove snage

U ovom primjeru prikazan je račun za ukupnu potrošnju električne energije tijekom jednog mjeseca u tvornici kabela Elka. Račun je izdao distributer električne energije HEP te je na računu obračunata mrežarina u razdoblju 2022/11. Na računu je zanimljivo to što se preuzela prekomjerna jalova snaga na već kompenziranom sustavu te se dodatno zaračunala naknada.

OBRAČUN POTROŠNJE											
Obračunsko mjesto: KOLEDOVČINA NEKRETNINE D.O.O., KOLEDOVČINA 1, ZAGREB											
Broj obračunskog mjesta: 0171650197 Kategorija potrošnje: Poduzetništvo Tarifni model: SREDNJI NAPON BIJELI Obr.: 1											
Broj brojila	Datum od	Datum do	Tar.stavka	Stanje od	Stanje do	Kanal	Konstanta	Gubici %	Potrošak	Iznos kn	
146942737529	01.11.2022	30.11.2022	RVT R1	5216,0857	5326,4599	D	6000		662.245,20		
			RNT R2	3550,2319	3627,9646	D	6000		466.396,20		
			JEN J1	2711,6374	2780,7544	D	6000		414.702,00		
			JEN J2	8,7394	8,7394	D	6000		0,00		
Električna energija viša dnevna tarifa									0,00	662.245	92.714,30
Električna energija niža dnevna tarifa									0,00	466.396	32.647,72
Prekomjerna preuzeta jalova energija									0,00	42.250	6.760,00
Stanje max.	Konstanta	Ostvarena snaga	Gubici %	Koef.	Ugovorena snaga	Obračunata snaga					
0,3627	6000	2.176,200	0,00	1,00	0,00	2.176,00		56.576,00			
Naknada za obračunsko mjerno mjesto									1,00		66,00
<b>UKUPAN IZNOS OBRAČUNA</b>										<b>188.764,02</b>	
Legenda kanala očitavanja: E-očitavanje od strane ODS-a, K-očitavanje od strane kupca, P-procjena stanja, D-daljinsko očitavanje, R-preračun temeljem Općih uvjeta.											

Slika 10. Mjesečni račun za distribuciju struje

Tim inženjera iz tvornice kabela je napomenuo kako se u pojedinim mjesecima zna dogoditi da instalirani kapacitet ne zadovolji trenutne potrebe. No, u većini slučajeva vrijednost jalove snage iznosi unutar 33 % od iznosa radne snage te nije potrebno plaćati naknadu distributeru za prekomjernu jalovu snagu.

U ovom izračunu prikazat će se iznos kapacitivne jalove snage  $Q_c$  u sustav. U tvornici je preko regulatora podešen povoljni iznos faktora snage na 0.97. Kompenzacijom se želi postići iznos faktora snage između 0.95 i 0.99. Ako je faktor snage 0.95, distributer električne energije ne naplaćuje naknadu za prekomjernu preuzetu jalovu snagu. S većim faktorom snage  $\cos\varphi_2$  eliminira se problem dugogodišnjeg opadanja kapaciteta u kondenzatoru te će isto tako prilikom proširenja pogona rezervna snaga zadovoljiti kriterije.

U ovom slučaju radi se djelomična kompenzacija sustava sa  $\cos\varphi_2 = 0.97$ .



Ako se radi potpuna kompenzacija sustava,  $\cos\varphi_2$  se postavlja na vrijednost 0.99. Time se izjednačavaju kapacitivna i induktivna jalova komponenta, no takvu kompenzaciju nije poželjno raditi zato što se traži velika snaga kondenzatorskih baterija te isto tako postoji opasnost od prekompenzacije posebno pri djelomičnom opterećenju te kod skupne kompenzacije.

U slučaju prekomjerne kompenzacije mrežom teče kapacitivna jalova struja koja opterećuje vodove jednako kao i induktivna, a na induktivnim otporima uzrokuje nepoželjan porast napona. [5]

Kako bi se izračunalo kompenzacijski kapacitet, potrebni su sljedeći podaci s mjesečnog računa.

- RVT R1 - radna energija više tarife
- RNT R2 - radna energija niže tarife
- JEN J1 - induktivna jalova energija
- ukupna ostvarena snaga.

Kada se pronađu sljedeći podaci, slijedi proračun. Prvo je potrebno odrediti ukupnu radnu energiju  $W_r$  više i niže tarife.

$$W_r = (RVT R1) + (RNT R2) = 662\,245.20 + 466\,396.20 = 1\,128\,641.4 \text{ kWh} \quad (4-4)$$

Tada se iz računa uzmu podaci za ukupnu induktivnu jalovu energiju  $W_j$  te ukupnu ostvarenu snagu  $P$ .

$$W_j = JEN J1 = 414\,702.00 \text{ kVarh} \quad (4-5)$$

$$P = 2\,176.200 \text{ kW}$$

Za određivanje kompenzacijskog kapaciteta prema izrazu 4-2 potrebno je i odrediti tangense dobivenih kuteva  $\tan\varphi_1$  i  $\tan\varphi_2$ .

$$\tan\varphi_1 = \frac{W_r}{W_j} = \frac{1\,128\,641.4}{414\,702.00} = 2,73 \quad (4-6)$$

$$\varphi_2 = \arccos 0.97 = 11.47^\circ \text{ pa je } \tan\varphi_2 = \tan 11.47^\circ = 0.203$$

Za traženi faktor snage  $\cos\varphi_2 = 0.97$  potrebna je sljedeća kompenzacijska snaga.

$$Q_c = P \cdot (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)$$

$$Q_c = 2176,2 * (2,73 - 0,203)$$

$$Q_c = 5499.25 \text{ kVAr}$$

Na kraju izračuna vidi se poprilična kompenzacijska snaga. No, potrebno je uzeti u obzir to da se u tvornici nalazi velik broj asinkronih motora te ukupno sedam transformatorskih stanica pojedinačnih snaga od 0.63 do 1 MVA, stoga je bitno izvršiti kompenzaciju odnosno povećati faktor snage kako bi se poboljšali uvjeti u mreži, a naposljetku i smanjili troškovi.



*Slika 11. Transformatorska stanica snage 1 MVA*

Ovom ugradnjom kompenzacijskog uređaja ostvaruju se sljedeći učinci:

- ugradnjom kompenzacijskog uređaja smanjila se ukupna prividna snaga te je lako moguće povećati opterećenje uređaja i vodova
- smanjili su se ukupni padovi napona u mreži
- smanjila su se opterećenja na prekidačima, mjernim uređajima, osiguračima i zaštitnim uređajima
- smanjili su se gubici proporcionalni kvadratu struje

- smanjili su se ukupni troškovi za jalovu energiju.

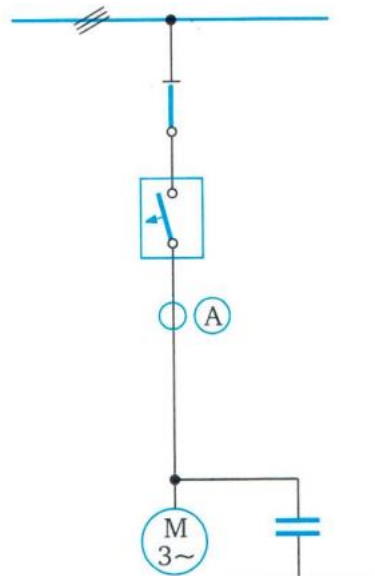
## 4.4. Načini kompenzacije jalove snage

Korištenjem kondenzatorskih baterija postoje četiri načina kompenzacije jalove snage [1], a to su pojedinačna, grupna, centralna i mješovita kompenzacija. Prema razmještaju i vrsti trošila te načinu upravljanja odabire se najpovoljnija metoda za kompenzaciju.

### 4.4.1. Pojedinačna kompenzacija

Kod pojedinačne kompenzacije kondenzatorske baterije se izravno priključuju na stezaljke trošila, a uklapanje i isklapanje se vrši zajedno sa spojenim trošilom. Time nisu potrebni dodatni prekidači za kondenzatorske baterije niti otpornici za pražnjenje kondenzatora. Kod ove kompenzacije jalova snaga se dovodi na samo mjesto potrošnje, čime se rasterećuju prijenosni elementi.

Pojedinačna kompenzacija pogodna je za trošila koja većinu vremena rade pri konstantnoj ili nazivnoj snazi (pumpe, ventilatori, kompresori) te kod trošila s izuzetno lošim faktorom snage poput fluorescentnih ili natrijevih svjetiljka.



Slika 12. Pojedinačna kompenzacija, jednopolna shema [5]

Kod pojedinačne kompenzacije trofaznog asinkronog motora približna kompenzacijska snaga izračuna se prema formuli 4-7 [5].

$$Q = 0.9 \cdot \sqrt{3} \cdot I_0 \cdot U \cdot 10^{-3} \text{ [kVAr]} \quad (4-7)$$

Primjer korištenja formule 4-7. U ovom primjeru korišten je trofazni asinkroni motor sa sljedećim podacima vidljivim na natpisnoj pločici.

<b>KONČAR</b>		made in Croatia	
Code 276684		Nr 528011	
3 $\approx$	Type 5AZ 112M4	B3	
$\Delta / Y$	380 / 660 V	8,7 / 5 A	
4 kW	$\cos\varphi=0,82$		
50 Hz	1420 $\text{min}^{-1}$		
$t_0$ °C	Isol.F	IP 54	S1
IEC34-1VDE0530			

Slika 13. Natpisna pločica trofaznog asinkronog motora [7]

Nekompenziran trofazni asinkroni motor ima sljedeće podatke: nazivni napon  $U = 380 \text{ V}$ , spoj u trokut, s nazivnom strujom u trokutu  $I_N = 8.7 \text{ A}$ . Struja praznog hoda  $I_0$  otprilike iznosi 30 % vrijednosti nazivne struje. Pa slijedi  $I_0 = 0.3 \cdot I_N = 0.3 \cdot 8.7 = 2.61 \text{ A}$

$$Q = 0.9 \cdot \sqrt{3} \cdot I_0 \cdot U \cdot 10^{-3}$$

$$Q = 0.9 \cdot \sqrt{3} \cdot 2.61 \cdot 380 \cdot 10^{-3}$$

$$Q = 1.54 \text{ kVAr}$$

Potrebno je odabrati prvu veću standardnu veličinu kondenzatora, tj. od 2 kVAr.

Dobiveni rezultat moguće je provjeriti u poglavlju 4.2. (Slika 8.) gdje je na slici vidljivo da je za asinkroni motor snage 4 kW potreban kapacitet kondenzatora od 2 kVAr.

Kondenzator se na trofazni asinkroni motor spaja izravno na stezaljke motora ili se uključuje preko zasebne sklopke. Ako je kondenzator spojen izravno na stezaljke motora, osigurači koji su zaduženi za zaštitu elektromotora pružaju i zaštitu za kondenzator. Isto tako, ako se kondenzator na elektromotoru uključuje preko zasebne sklopke, osigurači motora imaju

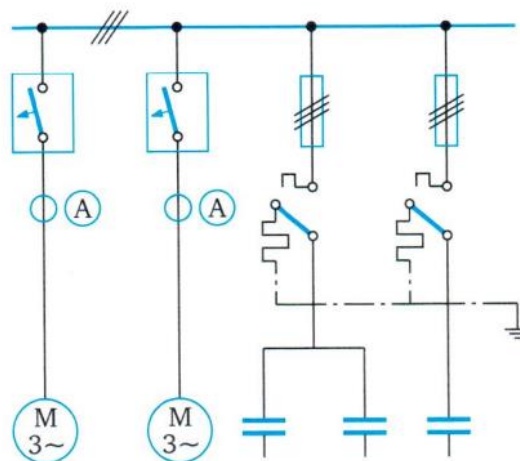
jednaku ulogu kao i kod izravnog spoja, ali je još potrebno i nadstrujnu zaštitu na sklopki podesiti na smanjenu (kompenziranu) struju. U slučaju da se ovakav elektromotor s pojedinačnom kompenzacijom nađe u pogonu gdje vlada velika zamašna masa, potrebno je osigurati spoj koji isklapa kondenzatore prije isključenja elektromotora kako se ne bi pojavio prenapon samouzbude. Na motorima koji se nalaze u dizalicama, kranovima i slično potrebno je osigurati spoj koji odvaja kondenzatore prilikom isklapanja motora jer bi u protivnom motor mogao ostati pogonjen energijom iz kondenzatora.

Prednost pojedinačne kompenzacije je u tome što za regulaciju nisu potrebni dodatni razvodni ormari s regulatorom faktora snage te mreža i vodovi nisu opterećeni jalovom snagom. Mana ove metode je to što na kraju imamo veliki instalirani kondenzatorski kapacitet koji je neaktivan sve dok je trošilo isključeno.

#### 4.4.2. Grupna kompenzacija

Grupna kompenzacija jalove snage primjenjuje se u postrojenjima gdje je potrebno regulirati jalovu snagu kod manjih grupa potrošača. Pogodan je za trošila koja su smještena u blizini nekog procesa kao što je rasvjeta nekog većeg poslovnog objekta ili za kompenzaciju elektromotornih pogona s grupom od više manjih motora.

Glavna značajka grupne kompenzacije je u tome da se grupa potrošača kompenzira sa zajedničkim kondenzatorom. Za ovakvu kompenzaciju potrebne su posebne sklopke s predotpornikom i otpornikom za pražnjenje, a kondenzatori se zajedno uklapaju s istim prekidačem s kojim se uključuju elektromotori. Kondenzatore je moguće izvesti i s automatskom regulacijom, ali se takvo uklapanje vrši pomoću vremenskog regulatora ili pomoću regulatora jalove snage.



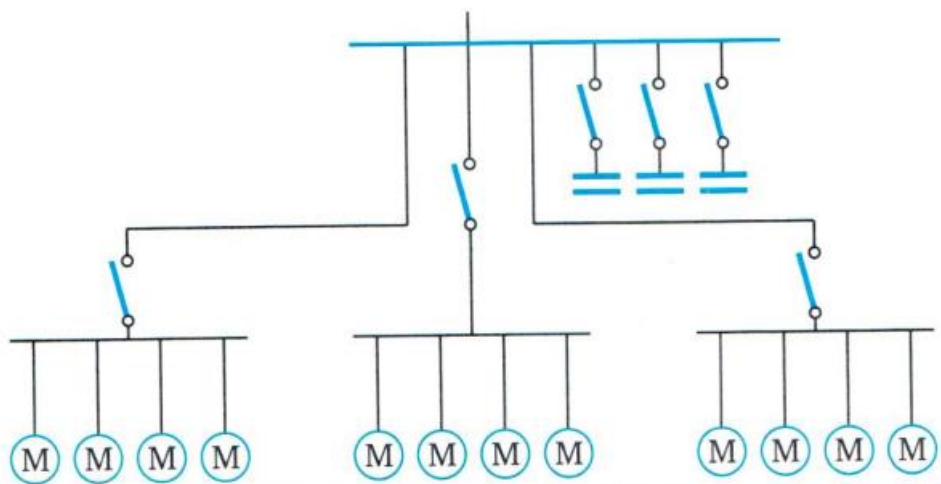
Slika 14. Grupna kompenzacija [5]

Prednost grupne regulacije je u tome što je potreban manji ukupni kapacitet kondenzatora pa je takvo rješenje jeftinije od pojedinačne regulacije, a glavni nedostatak je u tome što se kompenzacija poboljšava točno u nekoj određenoj grupi potrošača, a izvan te grupe ne postiže se nikakvo poboljšanje.

#### 4.4.3. Centralna kompenzacija

Kod centralne kompenzacije potrošači se jalovom energijom snabdijevaju iz jednog centralnog kondenzatora koji je najčešće smješten u transformatorskoj stanici. Time su vodovi djelomično rasterećeni prijenosom jalove snage.

Centralna kompenzacija sadrži automatski regulator faktora snage koji neprestano prati faktor snage u mreži i u slučaju pogoršanja uključuje kondenzatore. Isto tako i u slučaju prekomjerne kompenzacije regulator faktora snage isključuje kondenzatore. Za izvođenje centralne kompenzacije osim regulatora faktora snage potrebni su još i dodatni sklopnici za uključivanje i isključivanje te sklopnici za signalizaciju i pražnjenje. Ova kompenzacija zahtijeva najmanji kapacitet energetske kondenzatora. Stoga je ova kompenzacija isplativija u odnosu na pojedinačnu ili grupnu kompenzaciju.



Slika 15. Centralna kompenzacija [5]

Prednosti centralne kompenzacije su jednostavnost, automatsko poboljšanje faktora snage u vremenu, poboljšanje naponske stabilnosti te racionalna upotreba kondenzatora. Nedostatak

centralne kompenzacije je u tome što se stvara dodatno opterećenje jalovom snagom u vodovima između potrošača i kondenzatora.

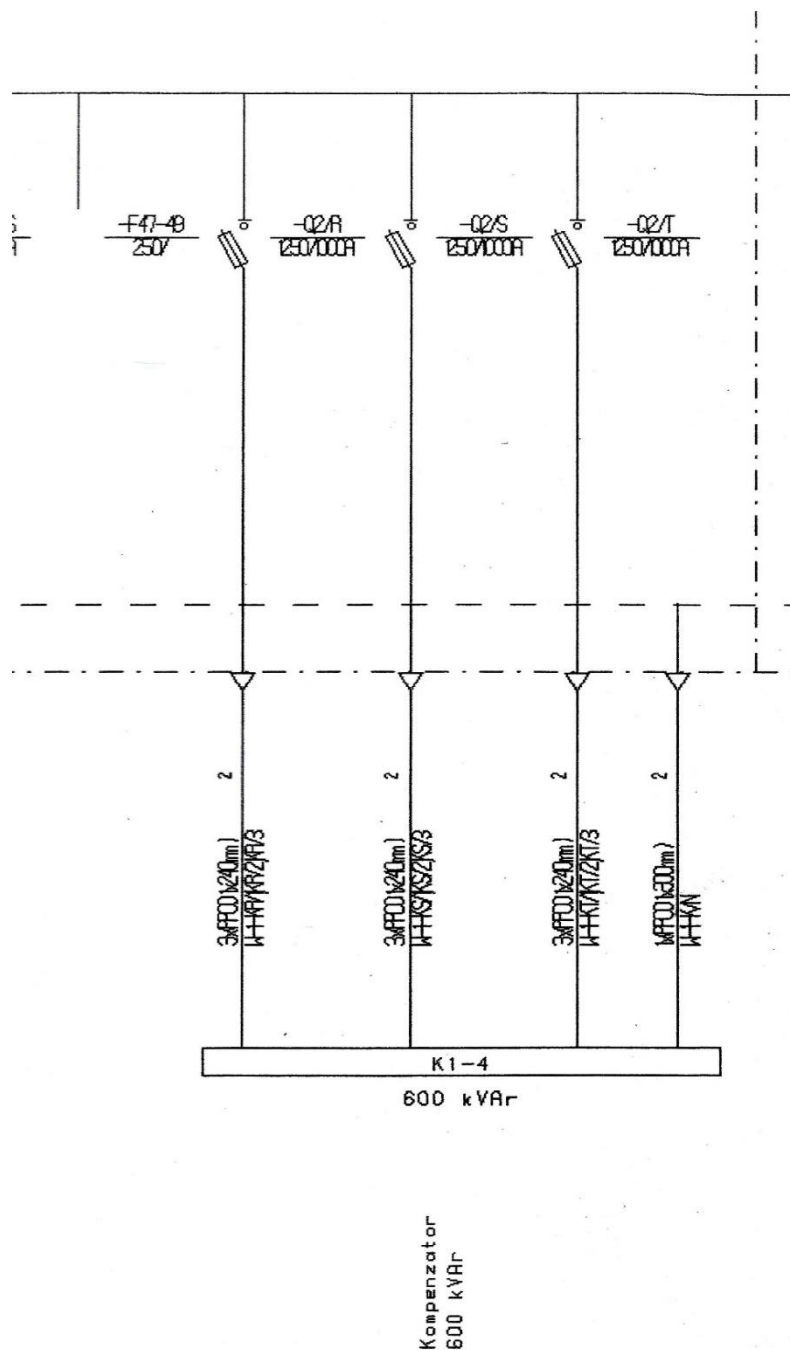
U tvornici kabela Elka koristi se centralna kompenzacija na način da je u svakoj transformatorskoj stanici smješten kompenzacijski ormar s automatskom regulacijom. Svaki kompenzacijski ormar sadrži regulator koji prati potražnju jalove energije te pomoću sklopnika uključuje kondenzatore.

U ormaru za kompenzaciju se osim kondenzatora i sklopnika nalaze i prigušnice koje sprječavaju pojavu rezonancije te zaštitni osigurači. Kompenzacijski ormari odlikuju se visokom pouzdanošću, dugim radnim vijekom trajanja kondenzatora i sklopnika (oko 10 godina), te isto tako sprječavaju nastajanje harmonika i osiguravaju zaštitu od prenapona i prekomjerne struje. Na Slici 16. prikazan je ormar za kompenzaciju jalove snage u transformatorskoj stanici TS1 ukupne jalove snage od 600 kVAr.



Slika 16. Kompenzacijski ormar u transformatorskoj stanici TS1

Na Slici 17. prikazana je jednopolna shema kompenzacijskog ormara TS1. Na shemi su slovima, brojkama i drugim znakovima navedeni najvažniji podaci o dijelovima i vodovima [9]. Shema kompenzacijskog ormara je vrlo bitan alat koji pomaže u projektiranju ormara za kompenzaciju jalove snage. Kompenzacijski ormar od 600 kVAr spojen je sa sustavom pomoću tri trožilna kabela naziva 3xPP00 1x240 mm<sup>2</sup> i s jednim jednožilnim kabelom naziva 1xPP00 1x200 mm<sup>2</sup>. Prema shemi kompenzacijski uređaj je zaštićen osiguračima od 1000 A.



Slika 17. Jednopolna shema kompenzacijskog ormara TS1 [8]



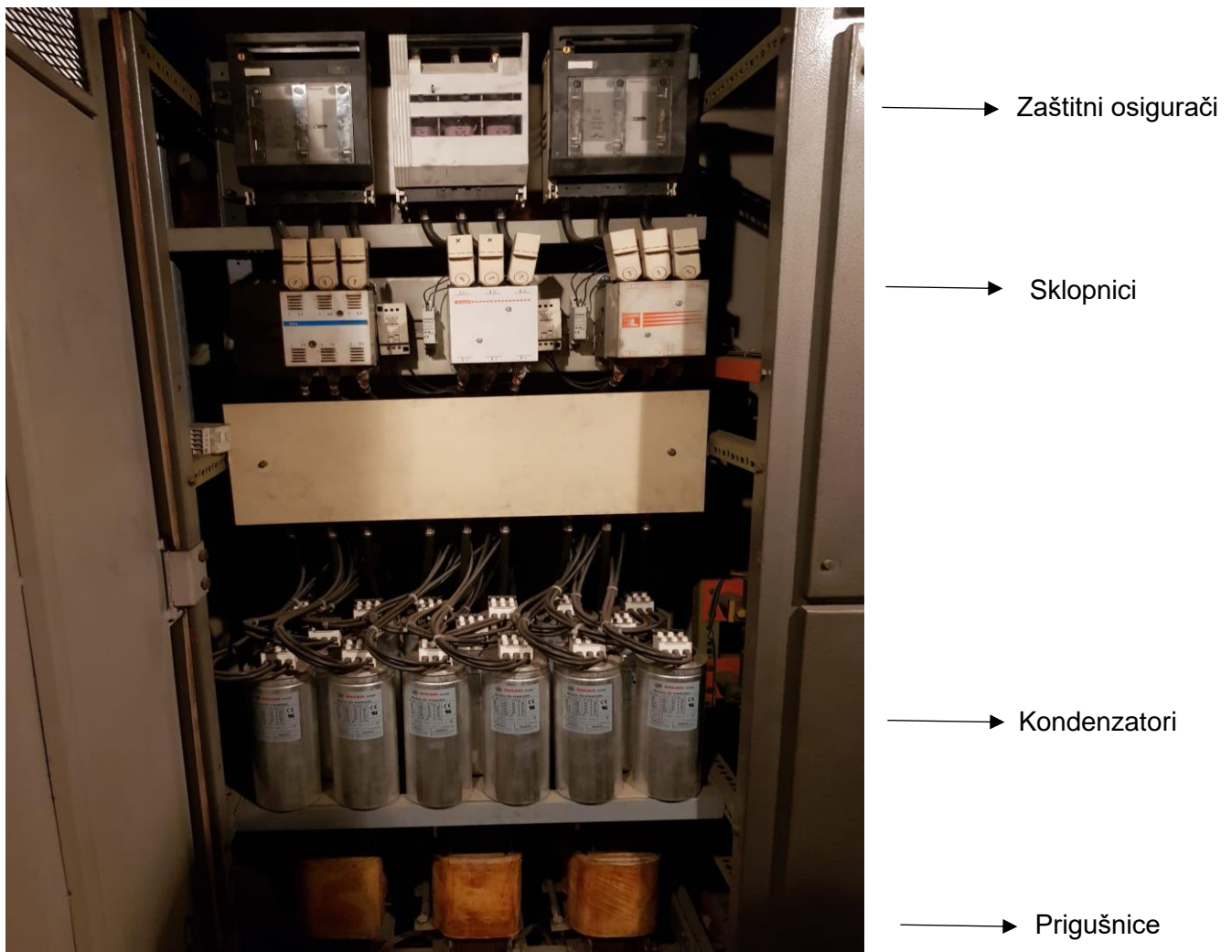
Na Slici 18. prikazana je unutrašnjost kompenzacijskog ormara u transformatorskoj stanici TS2. Unutar ormara nalaze se komponente koje su potrebne za kompenzaciju jalove snage u mreži, a to su zaštitni osigurači, sklopnici, kondenzatori i prigušnice.

Zaštitni osigurači u slučaju prevelike struje ili kratkog spoja prekidaju strujni krug te štite strujnu opremu. Svaki osigurač je nazivne vrijednosti 25 A.

Sklopnici se koriste za uključivanje i isključivanje kondenzatora. Sklopnici rade u kombinaciji s regulatorom faktora snage. U slučaju lošeg faktora snage, regulator preko navedenih sklopnika uključuje kondenzatore.

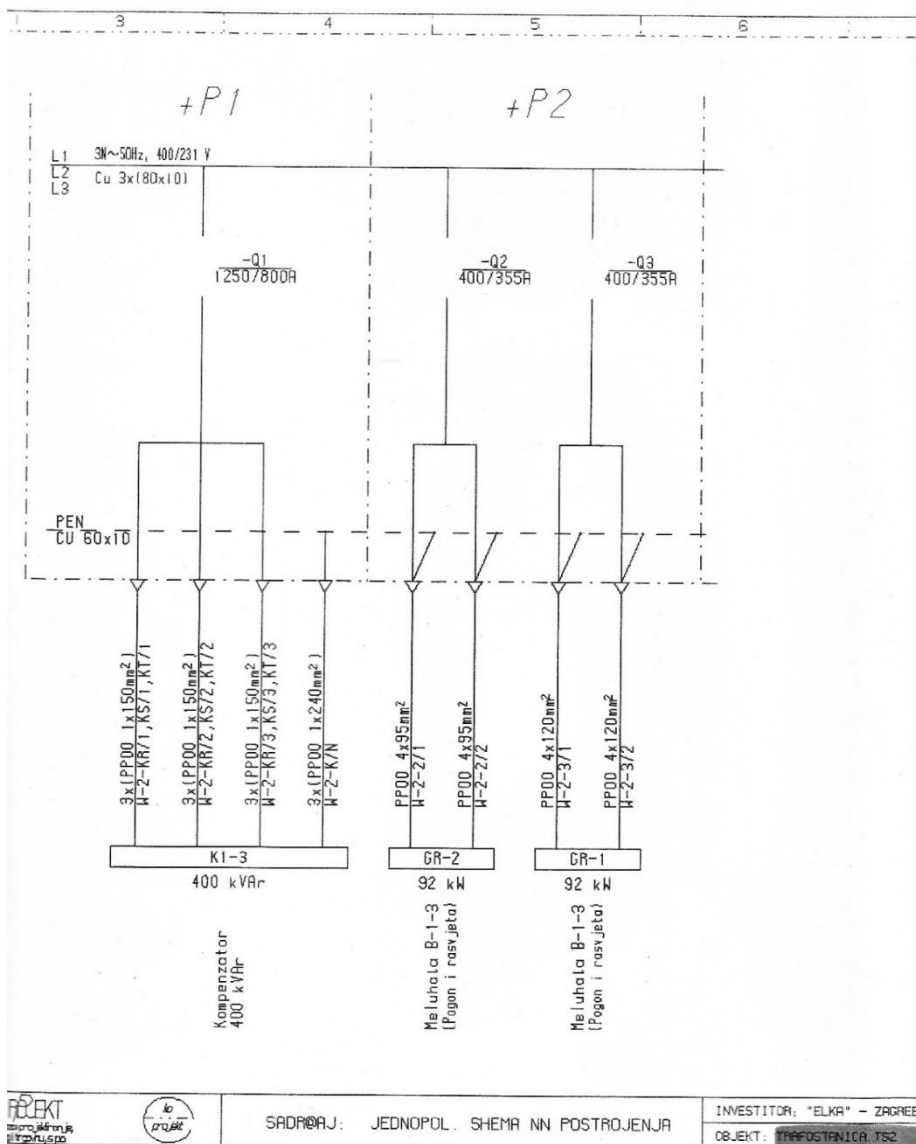
Kondenzatori su smješteni u kompenzacijski ormar i povezani su na način kako bi se zadovoljio instalirani kapacitet ovisno o prilikama u mreži gdje je potrebna jalova snaga.

Prigušnice su komponente koje se koriste kako bi se uklonili harmonijski naponi i struje koji mogu biti prisutni u mreži. Takvi periodički valovi razlikuju se od sinusnih i mogu uzrokovati probleme na opremi za kompenzaciju jalove snage.



Slika 18. Kompenzacijski ormar u transformatorskoj stanici TS2

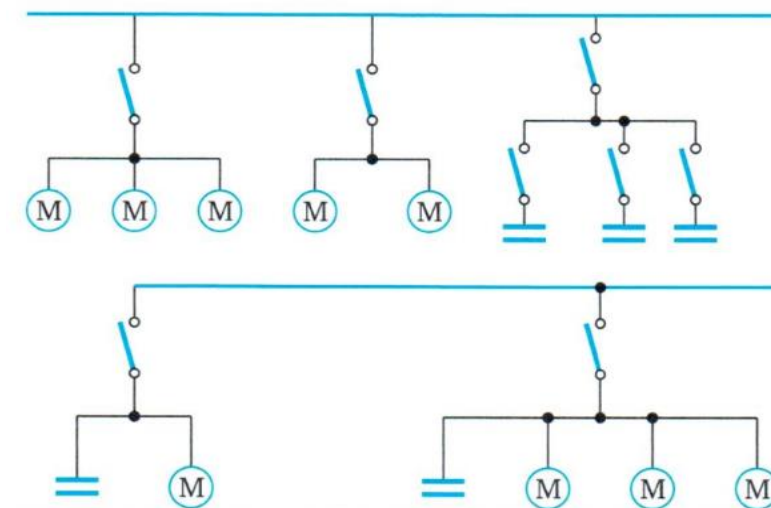
Na Slici 19. prikazana je jednopolna shema kompenzacijskog ormara TS2. Na shemi je prikazan kompenzacijski ormar od 400 kVAr koji je spojen sa sustavom pomoću tri trožilna kabela naziva 3xPP00 1x150 mm<sup>2</sup> i s jednim trožilnim kablom naziva 3xPP00 1x240 mm<sup>2</sup>.



Slika 19. Jednopolna shema kompenzacijskog ormara TS2 [8]

#### 4.4.4. Mješovita kompenzacija

Mješovita kompenzacija je kombinacija navedenih načina kompenzacije. Ta vrsta kompenzacije upotrebljava se osobito onda kad jedan dio trošila jalove snage radi stalno, a drugi samo povremeno [5].



Slika 20. Shematski prikaz mješovite kompenzacije, koja se sastoji od pojedinačne, grupne i centralne kompenzacije [5]

## 5. Uređaji za kompenzaciju jalove snage

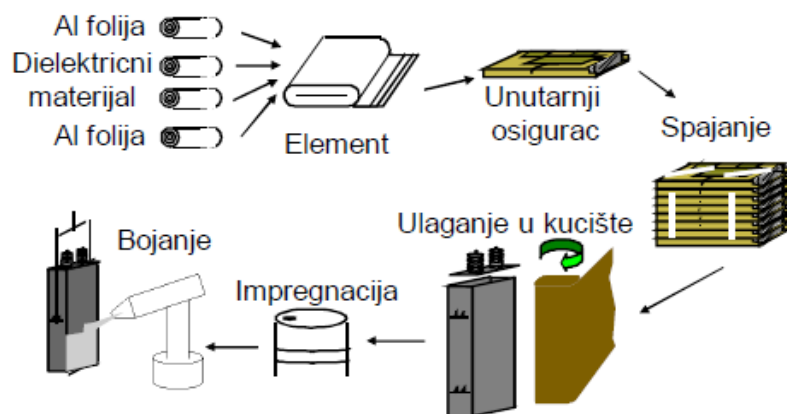
### 5.1. Kondenzatorske baterije

Kroz povijest su se kondenzatorske baterije prvi puta počele upotrebljavati oko 1914. godine, no zbog izrazito visoke cijene te kako su tada kondenzatori bili popriličnih dimenzija, njihova je upotreba ograničena. Oko 1939. godine pojavili su se jeftiniji kondenzatori manjih dimenzija, poboljšane konstrukcije, s manjim brojem kvarova, te je time počela šira primjena kondenzatora za kompenzaciju [1].

Trofazna kondenzatorska baterija je osnovni element za kompenzaciju jalove snage. Kondenzatori se mogu montirati u svakom položaju, a što se tiče mjesta ugradnje, potrebno ih je ugraditi čim bliže potrošaču kako bi se mreža maksimalno rasteretila jalovih tokova. Elektrode u kondenzatoru se izrađuju od aluminijske folije, a za dielektrik upotrebljava se papir natopljen mineralnim uljem. Ako dođe do kratkotrajnih opterećenja, postoji mogućnost da dođe do oštećenja dielektrika. Posljedica takvog opterećenja je lokalni proboj koji u većini slučajeva nije opasan po dielektriku, a ukupan gubitak kapacitivnosti po kondenzatoru nije veći od nekoliko  $pF$ . Prema kraju životnog vijeka kondenzatora, broj lokalnih proboja je sve veći, a takvi učestali proboji uzrokuju povećanje koncentracije plina u kućištu koji naposljetku deformiraju kondenzator.

Svaki kondenzator ima ugrađen otpornik koji isprazni kondenzator na 50 V u roku od 60 sekundi [1]. Prilikom servisiranja poželjno je pričekati dvije minute i tada početi servisne radove. Kondenzatori se izrađuju na način da se tanka aluminijska folija koja predstavlja dielektrik namata na bubanj određenog promjera. Debljina folije te broj slojeva namatanja i promjer bubnja određuje napon za koji je kondenzator namijenjen. Dobiveni cilindar koji tvori kondenzator se zatim skida s bubnja te se preša u odgovarajući oblik. Za povećanje kapaciteta kondenzatora u slučaju visokog napona elementi se spajaju paralelno, a u slučaju još višeg napona serijski. Na Slici 21. predočene su faze izrade kondenzatorskih baterija.

Kondenzatorske baterije se dijele na niskonaponske i visokonaponske. Dielektrik je načinjen od polipropilen folije natopljen mineralnim uljem, a elektrode su načinjene od aluminijske folije. Takve konstrukcije kondenzatora stvaraju vrlo malene gubitke. Kod visokonaponskih kondenzatora unutarnji otpornik za pražnjenje smanjuje napon na 75 V za 10 min [10].



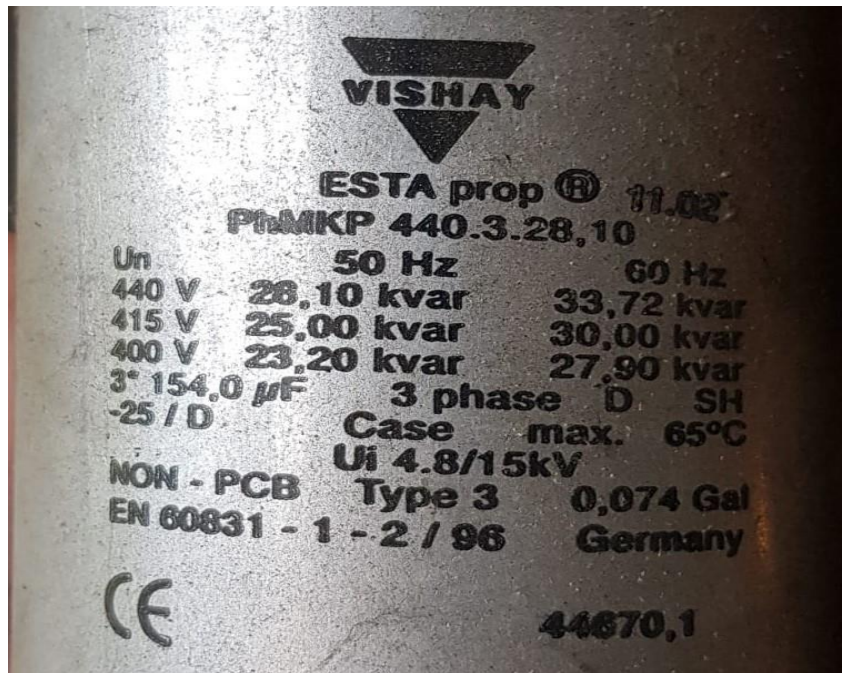
Slika 21. Faze izrade kondenzatorskih baterija [1]

Prilikom uklapanja kondenzatorskih baterija pojavljuje se uklopna struja s vrlo visokom amplitudom koja je reda veličine struje kratkog spoja. U početku takve struje su predstavljale prave konstrukcijske probleme prilikom projektiranja kondenzatora s tankom aluminijskom elektrodom. Danas je taj problem riješen usavršavanjem uklopnih prekidača na način da vrlo lako podnesu velike struje prilikom uklapanja  $I_{UKL} = (30 - 60)I_N$ . Isto tako prilikom proizvodnje kondenzatora definiran je IEC standard prema kojem maksimalna vršna vrijednost uklopne struje ne smije biti veća od stostruke efektivne nazivne struje kondenzatorske baterije ( $I_{max} < 100 \cdot I_c$ ).

Kontaktori su dimenzionirani za velike poremećaje uklopne struje, ali ovakvi poremećaji u naponu napajanja utječu na rad i dugotrajnost ostale opreme u pogonu poput računala, PLC-a, naponskih regulatora, ispravljača itd. Kako bi se sačuvala oprema u osjetljivim pogonima, kondenzatorske baterije se uključuje preko tiristora. Tiristori vrše uključenje točno u trenutku kada struja prolazi kroz nulu, time nema naglih skokova struje pa ni naglih skokova napona.



Slika 22. Trofazna kondenzatorska baterija



Slika 23. Nazivni podaci kondenzatorske baterije



Slika 24. Trofazne kompenzacijske baterije unutar kompenzacijskog ormara



Slika 25. Nazivni podaci kondenzatorske baterije

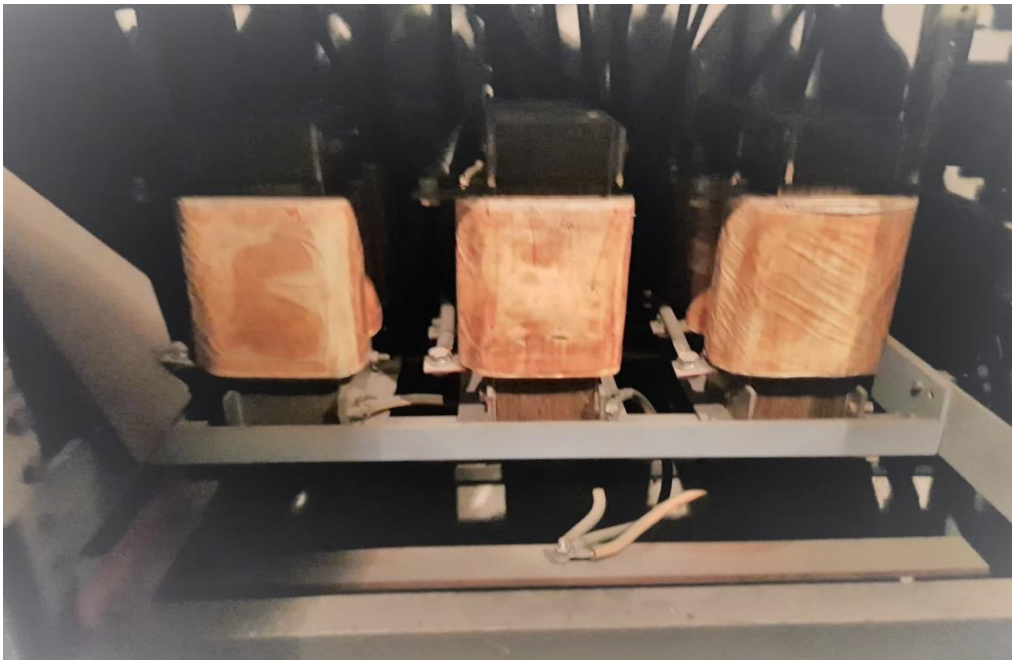
## 5.2. Prigušnice

Uređaji u suvremenim pogonima (frekventni regulatori, usmjerivači, uređaji za besprekidno napajanje) proizvode struju koja nije linearnog oblika te stvaraju dodatno mrežno onečišćenje harmonicima. Kondenzatorske baterije koriste se za proizvodnju jalove snage, a prigušnice zajedno s napojnim transformatorom troše jalovu snagu te stvaraju rezonanciju u strujnom krugu.

Povećana rezonancija u strujnim krugovima može dovesti do preopterećenja: kondenzatora, prijenosne opreme, transformatora, kontrolnih sistema, brojila itd. Kako bi se izbjegle ove rezonantne pojave, u seriju s kondenzatorom spajaju se filterske prigušnice. Prigušnice se dijele na jednofazne i trofazne te na prigušnice fiksne i promjenjive snage.

Glavna svojstva prigušnica su:

- mali gubici i jednostavna montaža
- otpornost prema harmonicima
- dugački vijek upotrebe
- toplinska zaštita preko mikroprekidača
- niska razina buke.



*Slika 26. Trofazne prigušnice unutar kompenzacijskog ormara*



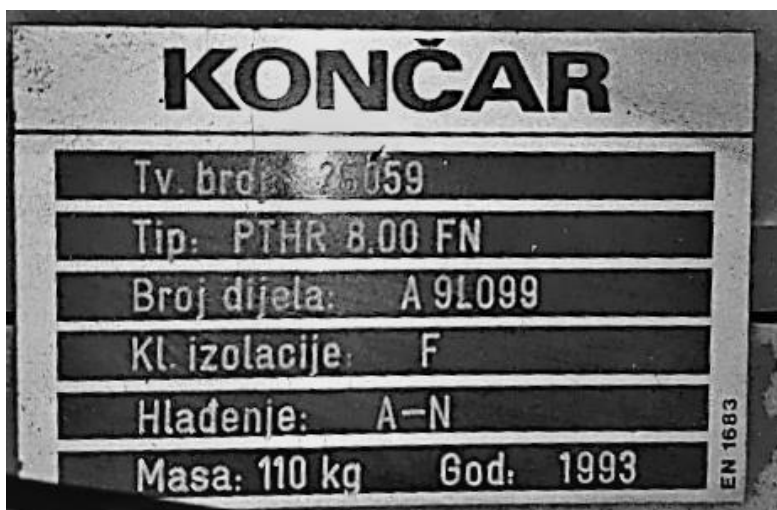
U Tablici 2. prikazani su nazivni podaci trofazne prigušnice.

Prigušenje (p)	7 %
Rezonantna frekvencija (fr)	189 Hz
Jalova snaga (Q)	100 kVAr
Induktivitet (L)	0.38 mH
Efektivna struja (I)	160 A
Nazivni napon (U)	400 V
Stupanj izolacije	3 kV
Stupanj mehaničke zaštite	IP00
Temperaturna klasa	F
Nazivna frekvencija (f)	50 Hz
Gubici	235 W
Masa	55 kg
Hlađenje	prirodno

*Tablica 2. Nazivni podaci trofazne kondenzatorske prigušnice [8]*



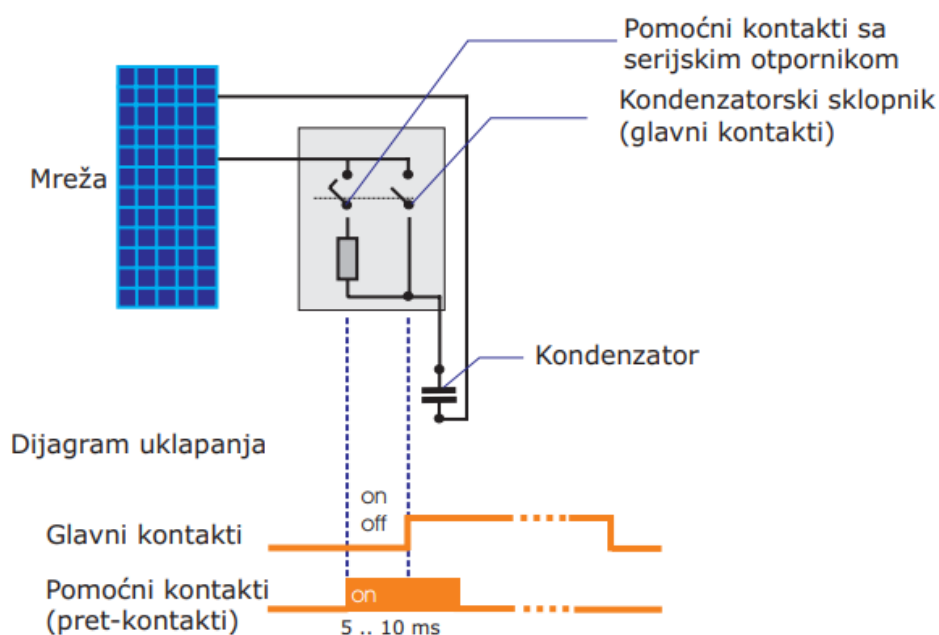
*Slika 27. Trofazne kondenzatorske prigušnice*



Slika 28. Natpisna pločica trofazne prigušnice

### 5.3. Sklopnici

Kontaktori ili specijalni kondenzatorski sklopnici koriste se za uklapanje i isklapanje kondenzatorskih baterija. Prilikom uklapanja kondenzatori koji se nalaze u nekom kompenzacijskom uređaju mogu biti nabijeni i time uklopna struja kondenzatora može dostići 200 puta veću vrijednost od nazivne vrijednosti struje. Takve velike uklopne struje mogu prouzročiti taljenje glavnih kontakata, ali i štetne posljedice za kondenzator. Zato je potrebno u automatskim postrojenjima koristiti posebne kondenzatorske sklopnike koji prigušuju uklopnu struju.



Slika 29. Prikaz uklapanja kondenzatorskih sklopnika [10]

Takvi kondenzatorski sklopnici sadrže pretkontakte koji ograničavaju struju uklapanja preko serijskog spojenog otpornika. Pretkontakti se zatvaraju prije glavnih kontakata, a kada su glavni kontakti sigurno zatvoreni, tada se pretkontakti otvaraju. Zahvaljujući pretkontaktima i prigušnim otpornicima ukupna struja uklapanja je  $< 70 \cdot I_n$ .



*Slika 30. Kondenzatorski sklopnici*

## 5.4. Regulator faktora snage

Regulator faktora snage preko displeja i kontrolnih tipki omogućuje jednostavno upravljanje i nadzor sustava. Na regulatoru preko displeja možemo pročitati trenutne vrijednosti sustava poput mrežnog napona, reaktivnu snagu, frekvenciju, radnu snagu, prividnu snagu, zadani faktor snage, trenutni faktor snage itd. Također preko displeja možemo pročitati i memorirane vrijednosti poput broja sklapanja kondenzatorskih sklopnika, maksimalnog napona, maksimalne vrijednosti harmonika, maksimalnu radnu snagu, maksimalnu prividnu snagu, ukupno vrijeme rada kondenzatora itd. Preko regulatora korisnik može brzo i jednostavno pročitati parametre sustava te napraviti analizu i pronaći eventualnu grešku u sustavu i otkloniti kvar.



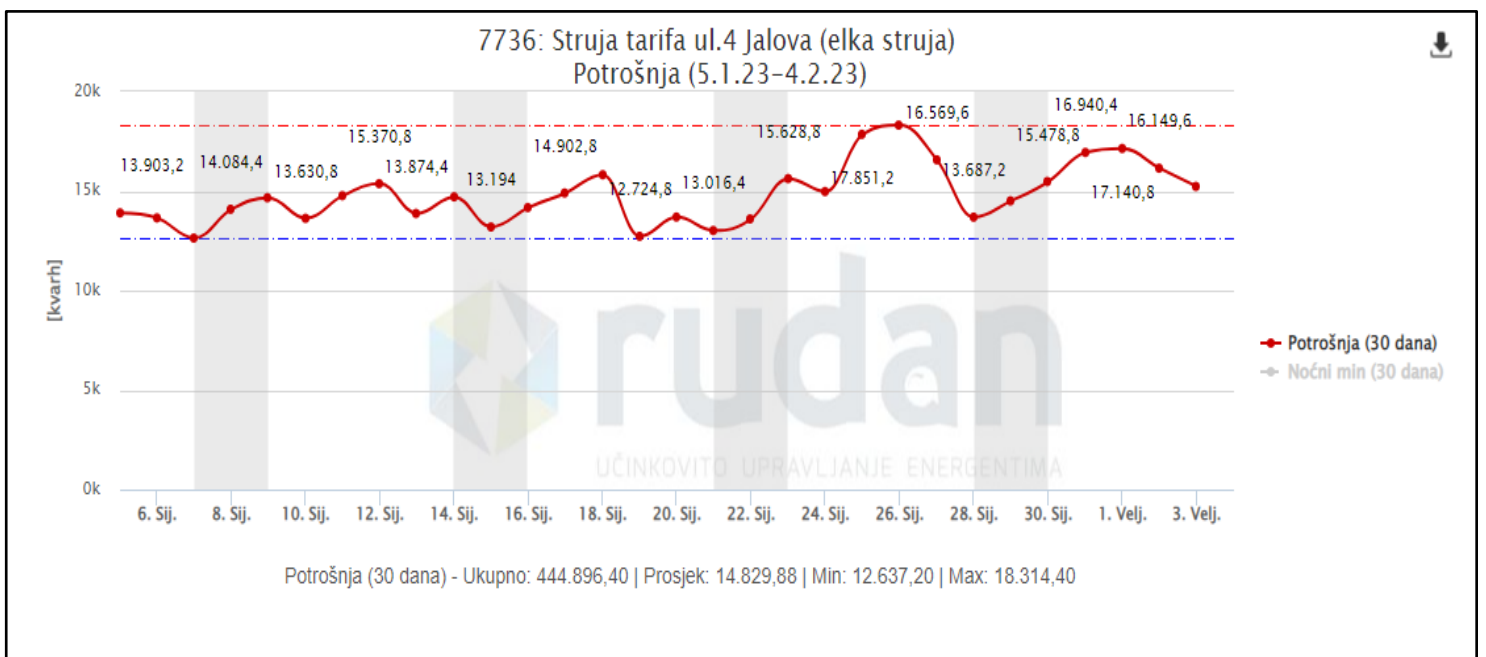
Slika 31. Regulator faktora snage

## 5.5. Daljinski nadzor i praćenje potrošnje

Kako bi se u svakom trenutku pratila potrošnja struje i ostalih energenata, tvornica Elka ima instalirani sustav Aquacontrol. Ovaj sustav nije obavezan uređaj za kompenzaciju, ali omogućuje praćenje potrošnje u stvarnom vremenu.

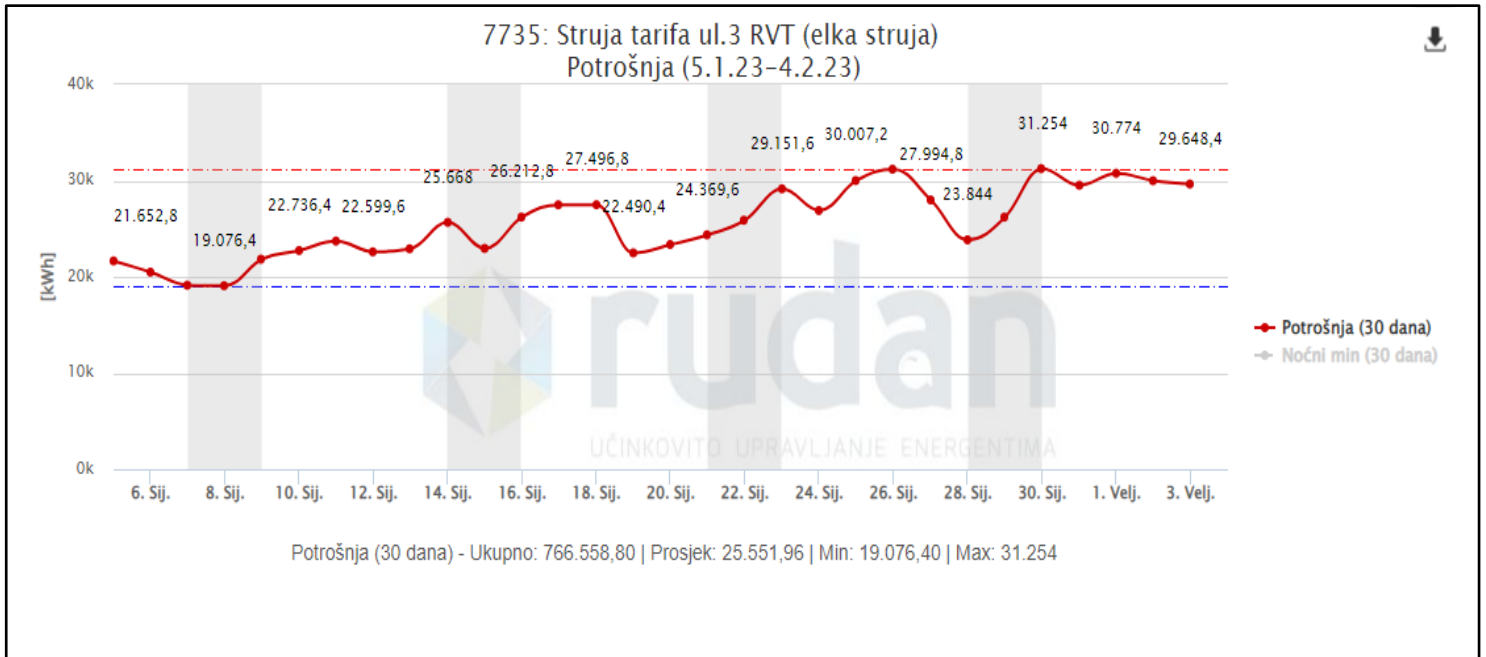
Ako dođe do povećane potrošnje električne ili jalove energije, preko zadanog sustava može se vrlo lako očitati točno vrijeme kada je nastalo zadano opterećenje te eventualno otkloniti kvar.

Na Slici 32. prikazana je dnevna potrošnja jalove energije za razdoblje 5. 1. 2023. – 4. 2. 2023. Preko sustava evidentirana je najveća potrošnja jalove energije od 18.314,40 kVArh, a na dijagramu je također vidljivo da je povećana potrošnja ostvarena 26. siječnja s potrošnjom od 16.569,6 kVArh, a ostvarena je i najmanja potrošnja 7. siječnja te 19. siječnja s potrošnjom od otprilike 12 kVArh jalove energije. Dnevna potrošnja jalove energije u tvornici kabela Elka je 14.829,88 kVArh.



Slika 32. Prikaz mjesečne potrošnje jalove energije

Na Slici 33. prikazana je dnevna potrošnja električne energije (viša tarifa) za razdoblje 5. 1. 2023. – 4. 2. 2023. Najveća potrošnja je bila 30. siječnja – 31.254,6 kWh, a najmanja 7. i 8. siječnja – 19.076,40 kWh. Na dijagramu je vidljivo da je povećana potrošnja radne energije evidentirana i 26. siječnja. Prema tome može se zaključiti da s povećanom potrošnjom radne energije raste i potrošnja jalove energije. Dnevna prosječna potrošnja radne energije (viša tarifa) u tvornici kabela Elka je 25.551,96 kWh.



Slika 33. Prikaz mjesečne potrošnje radne snage (viša tarifa)

## 6. Osnovna ekonomska ušteda

### 6.1. Ušteda ugradnjom kondenzatora

S ugradnjom kondenzatora u nekompenziran sustav postižu se značajne uštede u vidu smanjenja računa za struju. U ovom primjeru prikazat će se ukupna ušteda na transformatorskoj stanici TS1. Transformatorska stanica TS1 ima ukupnu prividnu snagu od 1 MVA pri faktoru snage 0.87. Na ormaru za kompenzaciju u transformatorskoj stanici TS1 preko regulatora ukupan faktor snage podignut je na 0.97.

Prema tarifnom modelu za poduzetnike s uračunatim prijenosom, distributer prividnu snagu naplaćuje 5.22 €/kVA. Transformatorska stanica TS1 ima prividnu snagu iznosa 1 MVA te ukupnu radnu snagu iznosa 870 kW. Radna snaga se dobiva iz umnožaka prividne snage i faktora snage ( $MVA \cdot \text{faktor snage} = kW$ ). Prema formuli:

$$MVA = \frac{MW}{\cos\varphi} \quad (6-1)$$

$$MVA \cdot \cos\varphi = MW$$

$$1 \cdot 0.87 = 0.87MW = 870kW$$

Preko iste formule izračuna se nova prividna snaga s poboljšanim faktorom snage.

$$\frac{870kW}{0.97} = 896.9kVA$$

Ovdje se iz izračuna može uočiti kako se uz povećani faktor snage smanjila ukupna prividna snaga, a sa smanjenjem prividne snage smanjuje se i naplata elektroprivredi. Kako se bi ovo postiglo, potrebno je kompenzirati jalovu snagu ugradnjom kondenzatora. Potreban kapacitet za kompenzaciju moguće je odrediti iz formula opisanih pod naslovom *4.3 Primjer proračuna kapacitivne jalove snage*, no u praksi se za računanje potrebne kompenzacijske snage često koriste unaprijed definirane tablice (*Tablica 3.*).

Tablica se koristi tako da se u prvom stupcu pronađe trenutni nepovoljni faktor snage, a zatim se vodoravno slijede brojevi do stupca sa željenim faktorom snage. U primjeru se dobiva broj 0.316 koji se množi s radnom snagom pa slijedi:

$$Q_c = c \cdot P \quad (6-2)$$

$$Q_c = 0.316 \cdot 870 = 274.9 kVAr$$

Uzima se prvi veći kompenzacijski uređaj, tj. od 300 kVAr.

Kako bi se smanjila potražnja za prividnom snagom, potrebno je koristiti kompenzator koji daje 300 kVAr jalove snage. Na shemi koja je prikazana na *Slici 17. Jednopolna shema kompenzacijskog ormara TS1* prikazan je kompenzator s ukupnom jačinom kondenzatora od 600 kVAr, no zadani kompenzator sastoji se od dva kompenzacijska ormara koji svojom jalovom snagom snabdijevaju dvije transformatorske stanice – TS1 i TS4. Svaka transformatorska stanica je ukupne prividne snage od 1 MVA.

Sada slijedi mjesečni račun za naplatu snage.

S nekompenziranim sustavom naplata prividne snage iznosi  $1\ 000\ kVA \cdot 5.22\ \text{€} = 5\ 220\ \text{€/mjesečno}$ .

Sa kompenziranim sustavom, novi obračun sa ispravljenim faktorom snage iznosi  $896.9\ kVA \cdot 5.22\ \text{€} = 4\ 677.12\ \text{€/mjesečno}$ .

Dakle, ukupna godišnja ušteda iznosi 6513,60 €.

Cijena pojedinačnih kondenzatorskih baterija od 24,8 kVAr (400 V) iznosi 203,50 €. Za zadani kompenzacijski uređaj od 300 KVAr potrebno je 12 kondenzatorskih baterija. Dakle, ukupna cijena kondenzatorskih baterija iznosi:  $12 \cdot 203,50\ \text{€} = 2\ 442\ \text{€}$ .

U ovu cijenu potrebno je još uračunati i cijenu prigušnica, sklopnika, regulatora, zaštitnih osigurača, instalacijskog ormara te cijenu ugradnje kompenzacijskog ormara.

Cijena gotovog kompenzacijskog sustava od 300 kVAr prema *web-trgovini* tvrtke Schrack Technik iznosi oko 12.000 € bez troškova montaže i instalacije [12]. Prema tome, povrat investicije bi trebao biti oko 2 godine nakon instalacije kompenzacijskog uređaja. No, s ugradnjom kompenzacijskog ormara distributer električne energije ne bi više naplaćivao naknadu za prekomjernu preuzetu jalovu snagu koja iznosi  $0.021\ \text{€/kVA} \cdot \text{h}$ . Dakle, ukupan povrat investicije bi trebao biti ranije od 2 godine.

Kondenzatorske baterije odlikuju se dugim vijekom trajanja (oko 10 godina) stoga se kompenzacija kao srednjoročna investicija svakako isplati.

Kod održavanja kompenzacijskog ormara potrebno je provjeriti ventilator, podešenu temperaturu na termostatu te filter ventilacije. Isto tako provjeravaju se vizualno sve komponente i podešeni parametri na regulatoru faktora snage.



Factor K ( kvar/kW )													
initial cosφ	final cosφ												
	0.80	0.85	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1
0.60	0.583	0.714	0.849	0.878	0.907	0.938	0.970	1.005	1.042	1.083	1.130	1.191	1.333
0.61	0.549	0.679	0.815	0.843	0.873	0.904	0.936	0.970	1.007	1.048	1.096	1.157	1.299
0.62	0.515	0.646	0.781	0.810	0.839	0.870	0.903	0.937	0.974	1.015	1.062	1.123	1.265
0.63	0.483	0.613	0.748	0.777	0.807	0.837	0.870	0.904	0.941	0.982	1.030	1.090	1.233
0.64	0.451	0.581	0.716	0.745	0.775	0.805	0.838	0.872	0.909	0.950	0.998	1.058	1.201
0.65	0.419	0.549	0.685	0.714	0.743	0.774	0.806	0.840	0.877	0.919	0.966	1.027	1.169
0.66	0.388	0.519	0.654	0.683	0.712	0.743	0.775	0.810	0.847	0.888	0.935	0.996	1.138
0.67	0.358	0.488	0.624	0.652	0.682	0.713	0.745	0.779	0.816	0.857	0.905	0.966	1.108
0.68	0.328	0.459	0.594	0.623	0.652	0.683	0.715	0.750	0.787	0.828	0.875	0.936	1.078
0.69	0.299	0.429	0.565	0.593	0.623	0.654	0.686	0.720	0.757	0.798	0.846	0.907	1.049
0.70	0.270	0.400	0.536	0.565	0.594	0.625	0.657	0.692	0.729	0.770	0.817	0.878	1.020
0.71	0.242	0.372	0.508	0.536	0.566	0.597	0.629	0.663	0.700	0.741	0.789	0.849	0.992
0.72	0.214	0.344	0.480	0.508	0.538	0.569	0.601	0.635	0.672	0.713	0.761	0.821	0.964
0.73	0.186	0.316	0.452	0.481	0.510	0.541	0.573	0.608	0.645	0.686	0.733	0.794	0.936
0.74	0.159	0.289	0.425	0.453	0.483	0.514	0.546	0.580	0.617	0.658	0.706	0.766	0.909
0.75	0.132	0.262	0.398	0.426	0.456	0.487	0.519	0.553	0.590	0.631	0.679	0.739	0.882
0.76	0.105	0.235	0.371	0.400	0.429	0.460	0.492	0.526	0.563	0.605	0.652	0.713	0.855
0.77	0.079	0.209	0.344	0.373	0.403	0.433	0.466	0.500	0.537	0.578	0.626	0.686	0.829
0.78	0.052	0.183	0.318	0.347	0.376	0.407	0.439	0.474	0.511	0.552	0.599	0.660	0.802
0.79	0.026	0.156	0.292	0.320	0.350	0.381	0.413	0.447	0.484	0.525	0.573	0.634	0.776
0.80		0.130	0.266	0.294	0.324	0.355	0.387	0.421	0.458	0.499	0.547	0.608	0.750
0.81		0.104	0.240	0.268	0.298	0.329	0.361	0.395	0.432	0.473	0.521	0.581	0.724
0.82		0.078	0.214	0.242	0.272	0.303	0.335	0.369	0.406	0.447	0.495	0.556	0.698
0.83		0.052	0.188	0.216	0.246	0.277	0.309	0.343	0.380	0.421	0.469	0.530	0.672
0.84		0.026	0.162	0.190	0.220	0.251	0.283	0.317	0.354	0.395	0.443	0.503	0.646
0.85			0.135	0.164	0.194	0.225	0.257	0.291	0.328	0.369	0.417	0.477	0.620
0.86			0.109	0.138	0.167	0.198	0.230	0.265	0.302	0.343	0.390	0.451	0.593
0.87			0.082	0.111	0.141	0.172	0.204	0.238	0.275	0.316	0.364	0.424	0.567
0.88			0.055	0.084	0.114	0.145	0.177	0.211	0.248	0.289	0.337	0.397	0.540
0.89			0.028	0.057	0.086	0.117	0.149	0.184	0.221	0.262	0.309	0.370	0.512
0.90				0.029	0.058	0.089	0.121	0.156	0.193	0.234	0.281	0.342	0.484

Tablica 3. Faktor proračuna [11]

Primjeri proračuna kompenzacijske snage pomoću Tablice 3.

Faktor snage trofaznog asinkronog motora snage  $P = 22 \text{ kW}$  sa  $\cos\varphi_1 = 0.80$  treba popraviti pomoću kondenzatora na  $\cos\varphi_2 = 0.94$ . Potrebno je odrediti kompenzacijsku snagu kondenzatora. [5]

$$Q = c \cdot P$$

$$Q = 0.387 \cdot 22 = 8.52 \text{ kVAr}$$

Snage kondenzatora su nominirane stoga se uzima kondenzator kapacitivne snage od 8 kVAr.

Faktor snage transformatora radne snage  $P = 400 \text{ kW}$   $\cos\varphi_1 = 0.87$  treba popraviti pomoću kondenzatora na  $\cos\varphi_2 = 0.97$ . Potrebno je odrediti kompenzacijsku snagu kondenzatora.

$$Q = c \cdot P$$

$$Q = 0.316 \cdot 400 = 126.4 \text{ kVAr}$$

Snage kondenzatora su nominirane stoga se uzima kondenzator veće kapacitivne snage od 140 kVAr.

## 6.2. Tarifni poticaji za kompenzaciju jalove snage

Kako se kroz mrežu mora prenositi prividna snaga, stvaraju se gubici prilikom distribucije. Time distributeri električne energije prema tarifnom pravilu od 1. 9. 1999. ukupni iznos računa za utrošenu električnu energiju bez poreza obračunavaju prema izrazu 6-1. [10]

$$\text{cijena} = (\text{radna energija} \cdot \text{€/kWh} + \text{najviša očitana snaga} + \text{€/kWh}) \cdot \left(1 + \frac{K}{100}\right) \text{€}. \quad (6-3)$$

$$\text{Faktor } K \text{ je dan izrazom: } K = \frac{18}{\cos^2 \varphi} - 20$$

Ako je  $\cos \varphi \geq 0.95$ , faktor  $K$  je negativan te distributer stimulira potrošača i ne obračunava dodatnu naknadu, ako je  $\cos \varphi < 0.95$ , tada potrošač plaća naknadu distributeru. Kućanstvo i javna rasvjeta spadaju u kategorije koje ne plaćaju jalovu energiju stoga je i  $K = 0$ .

U ovom primjeru preko formule 6-3 prikazat će se ukupna cijena utrošene električne energije. Tvornica kabela Elka pripada u tarifnu kategoriju „poduzetništvo“, stoga u svojem tarifnom modelu plaćaju i preuzetu jalovu energiju.

U prethodnom poglavlju 4.3. *Primjer proračuna kapacitivne jalove snage* izračunati su iznosi radne i jalove energije pa se i u ovom primjeru uzimaju isti podaci za radnu energiju  $W_r$ , jalovu energiju  $W_j$ , ukupnu ostvarenu snagu  $P$ , iznos električne energije više tarife *RVT R1* te iznos električne energije niže tarife *RNT R2*.

U formuli 6-3 najprije je potrebno odrediti iznos faktora  $K$ . Za izračun faktora  $K$  potrebno je odrediti iznos prividne snage  $S$ , te iznos faktora snage  $\cos \varphi$ .

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$S = \sqrt{1\,128\,641.4^2 + 414\,702.00^2}$$

$$S = 1\,202\,418.05 \text{ kVA}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{1\,128\,641.4}{1\,202\,418.05} = 0.93$$

$$K = \frac{18}{\cos^2 \varphi} - 20 = \frac{18}{0.938^2} - 20 = 0.459$$

Iz računa se još uzimaju sljedeći podaci.

$$P = 2\,176 \text{ kW}$$

$$RVT R1 = 662.245,2 \text{ kWh}$$

$$RNT R2 = 466.396,2 \text{ kWh}$$

Potrebne su i jedinične cijene za kWh, prema HEP-ovom tarifnom modelu za srednji napon tarifni model bijeli cijene su sljedeće. [13]

Električna energija viša dnevna tarifa 0.018581 €/kWh.

Električna energija niža dnevna tarifa 0.009290 €/kWh.

Kako je formula 6-3 namijenjena samo za jednu tarifu, a u ovom slučaju koriste se i viša i niža tarifa, potrebno je poznavati i iznos srednje tarife.

Iznos srednje tarife dobiven preko prosjeka više i niže tarife je 0.013935 €/kWh.

Sada slijedi finalni obračun.

$$\text{cijena} = (\text{radna energija} \cdot \text{€/kWh} + \text{najviša očitana snaga} + \text{€/kWh}) \cdot \left(1 + \frac{K}{100}\right)$$

$$\text{cijena} = (RVT R1 \cdot 0.018581) + (RNT R2 \cdot 0.009290) + P + 0.013935) \cdot \left(1 + \frac{K}{100}\right)$$

$$\text{cijena} = ((662\,245.2 \cdot 0.018581) + (466\,396.2 \cdot 0.009290) + 2\,176 + 0.013935) \cdot \left(1 + \frac{0.459}{100}\right)$$

$$\text{cijena} = (12\,305.2 + 4\,332.83 + 2\,176 + 0.013935) \cdot (1.00459)$$

$$\text{cijena} = 18\,814.05 \cdot 1.00459$$

$$\text{cijena} = 18\,900.41 \text{ €}.$$

Dobivena cijena prikazuje ukupnu naknadu elektroprivrede za korištenje mreže. Ako distributer električne energije ne bi naplaćivao jalovu energiju ( $K = 0$ ), tada bi ukupna naknada iznosila:

$$\text{cijena} = 18.814,05 \cdot (1 + 0) = 18.814,05 \text{ €}.$$

Budući da je cijeli sustav u tvornici kabela Elka kompenziran te kako je vrijednost faktora snage općenito jako dobra  $\cos\varphi = 0.93$ , distributer ne naplaćuje značajnu razliku u cijeni naknade, no mrežom se prenosi prividna snaga koja se sastoji od radne i jalove snage. Jalova snaga smanjuje kapacitet distribucijskih vodova te uzrokuje gubitke, stoga distributer nastoji tarifnim poticajem smanjiti naknadu krajnjim poduzetnicima. Kako bi se smanjila navedena naknada, potrebno je kompenzirati zadani sustav. S kompenzacijom smanjuje se ukupna naknada distributeru, poveća se prividna snaga te je lako moguće povećati opterećenje uređaja i vodova bez dodatnih troškova.

## 7. Zaključak

Jalova snaga je prema teorijskom razmatranju nepovoljna snaga koja uzrokuje dodatne gubitke u elektroenergetskom sustavu, no u praksi je potrebna za rad induktivnih trošila stoga je ova snaga neophodna. Kako bi se smanjili gubici jalove snage, potrebno je izvršiti kompenzaciju. Kompenzacija je postupak u kojem spajamo teret suprotnog karaktera kako bi se izjednačilo induktivne i kapacitivne jalove komponente u mreži. Kod induktivnih tereta struja zaostaje za naponom, a kod kapacitivnih tereta struja prethodi naponu stoga kod induktivnih tereta spajamo terete kapacitivnog opterećenja npr. kondenzatore.

Kompenzacijom povećavamo kapacitet djelatne snage koja je potrebna za rad trošila te u prijenosu rasterećujemo vodove i poboljšavamo naponske prilike u mreži. Prilikom ugradnje uređaja za kompenzaciju potrebno je odabrati pravilan način za kompenzaciju te pažljivo dimenzionirati svaku komponentu kako bi se postigao željeni učinak na cjelokupni sustav. Općenito svaka industrija raspolaže velikom priključnom snagom pa tako i ova tvornica kabela. Tvornica Elka za kompenzaciju u svojem sustavu primjenjuje centralnu kompenzaciju.

Centralna kompenzacija izvedena je tako da se više uređaja kompenzira jalovom energijom iz jednog centralnog izvora, u ovom slučaju kondenzatorske baterije se nalaze unutar transformatorskih stanica TS1 i TS2. U transformatorskim stanicama nalaze se ormari u kojima su smješteni svi potrebni uređaji za kompenzaciju jalove snage. Kompenzacija preko kondenzatorskih baterija, kako je u radu prikazano, na transformatorskoj stanici TS1 je vrlo isplativa investicija što se prikazuje u kratkom roku otplate, a osim same smanjene naplate elektroprivredi kompenzacija nudi i brojna poboljšanja napojne mreže te omogućuje povećanje prividne snage u mreži.

Cilj ovog rada bio je prikazati važnost kompenzacije u industrijskom postrojenju. Na primjeru obračuna potrošnje električne energije opisana je ukupna potražnja jalove energije u tvornici.

## 8. Literatura

- [1] Igor Kuzle: *Kompenzacija jalove snage Skripta. Fakultet elektrotehnike i računarstva*, Zagreb [online]. Dostupno na: <https://dokumen.tips/documents/kompenzacija-jalove-snage-skripta-55c3b774941d7.html?page=1> [Pristupano 7. siječnja 2023.]
- [2] Ljubomir Malešević (2018) *OSNOVE ELEKTROTEHNIKE II, SPLIT* [online]. Dostupno na: [https://www.oss.unist.hr/sites/default/files/file\\_attach/Osnove%20elektrotehnike%20II%2C%20ud%C5%BEbenik%20-%20Ljubomir%20Male%C5%A1evi%C4%87.pdf](https://www.oss.unist.hr/sites/default/files/file_attach/Osnove%20elektrotehnike%20II%2C%20ud%C5%BEbenik%20-%20Ljubomir%20Male%C5%A1evi%C4%87.pdf) [Pristupano 7. siječnja 2023.]
- [3] [https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/faktor\\_snage\\_i\\_njegova\\_kompenzacija\\_u\\_energetskim\\_postrojenjima\\_i\\_mrezama.pdf](https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/faktor_snage_i_njegova_kompenzacija_u_energetskim_postrojenjima_i_mrezama.pdf) [Pristupano 7. siječnja 2023.]
- [4] Armin Pavić *OSNOVE ELEKTROTEHNIKE, 2.dio: udžbenik za 2. razred elektrotehničkih škola*. Zagreb: Element.
- [5] Neven Srb (2007) *Elektromotori i elektromotorni pogon*, Zagreb: Graphis
- [6] Claiton Moro Franchi (2019): *Electrical Machine Drives Fundamental Basic and Practice*. CRC Press.
- [7] <http://e-elektro.blogspot.com/2013/08/trofazni-asinkroni-motor-s-kaveznim.html>
- [8] *Službena Elkina dokumentacija*
- [9] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=17570>
- [10] Srete Nikolovski i studenti (2012.), *Kompenzacija jalove snage u distributivnim mrežama*, Osijek, [online]. Dostupno na <https://vdocuments.site/kompenzacija-jalove-snage-u-distributivnim-mrezama.html> [Pristupano 7. siječnja 2023.]
- [11] <https://electrical-engineering-portal.com/capacitor-bank-power-factor> [7. siječnja 2023.]
- [12] <https://www.schrack.hr/trgovina/sigurnosna-rasvjeta-ups-co-senzori/kompenzacija-jalove-snage/sustavi-kompenzacije-jalove-snage-i-komponente/kompenzacija-jalove-snage-s-prigusnicama-7/modularni-sustav-u-samostojećem-celicnom-ormaru-sirina-800mm/kompenzacija-lsfc-7-300-25kv.html> [Pristupano 7. siječnja 2023.]
- [13] <https://www.hep.hr/ods/korisnici/poduzetnistvo/tarifne-stavke-cijene-161/161> [Pristupano 7. siječnja 2023.]

## 9. Popis slika

<i>Slika 1. Prikaz struje i napona na otporu u fazi [2].....</i>	<i>2</i>
<i>Slika 2. Krivulje napona, struje i snage na otporniku [1].....</i>	<i>3</i>
<i>Slika 3. Krivulja struje, napona i snage na kondenzatoru [1].....</i>	<i>4</i>
<i>Slika 4. Krivulja struje, napona i snage na zavojnici [1].....</i>	<i>5</i>
<i>Slika 5. Trokut snage [1].....</i>	<i>6</i>
<i>Slika 6. Izmjena jalove snage između induktivnog trošila i kondenzatora [4].....</i>	<i>10</i>
<i>Slika 7. Poboljšanje faktora snage dodavanjem kapacitivne baterije [1].....</i>	<i>11</i>
<i>Slika 8. Približne snage kondenzatora za kompenzaciju jalove energije pojedinih asinkronih motora [5].....</i>	<i>12</i>
<i>Slika 9. Približne snage kondenzatora za kompenzaciju jalove energije pojedinih transformatora [6].....</i>	<i>12</i>
<i>Slika 10. Mjesečni račun za distribuciju struje.....</i>	<i>13</i>
<i>Slika 11. Transformatorska stanica snage 1 MVA.....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 12. Pojedinačna kompenzacija, jednopolna shema [5].....</i>	<i>16</i>
<i>Slika 13. Natpisna pločica trofaznog asinkronog motora [7].....</i>	<i>17</i>
<i>Slika 14. Grupna kompenzacija [5].....</i>	<i>18</i>
<i>Slika 15. Centralna kompenzacija [5].....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 16. Kompenzacijski ormar u transformatorskoj stanici TS1.....</i>	<i>20</i>
<i>Slika 17. Jednopolna shema kompenzacijskog ormara TS1 [8].....</i>	<i>21</i>
<i>Slika 18. Kompenzacijski ormar u transformatorskoj stanici TS2.....</i>	<i>22</i>
<i>Slika 19. Jednopolna shema kompenzacijskog ormara TS2 [8].....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 20. Shematski prikaz mješovite kompenzacije, koja se sastoji od pojedinačne, grupne i centralne kompenzacije [5].....</i>	<i>24</i>
<i>Slika 21. Faze izrade kondenzatorskih baterija [1].....</i>	<i>26</i>
<i>Slika 22. Trofazna kondenzatorska baterija.....</i>	<i>27</i>
<i>Slika 23. Nazivni podaci kondenzatorske baterije.....</i>	<i>27</i>
<i>Slika 24. Trofazne kompenzacijske baterije unutar kompenzacijskog ormara.....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 25. Nazivni podaci kondenzatorske baterije.....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 26. Trofazne prigušnice unutar kompenzacijskog ormara.....</i>	<i>29</i>
<i>Slika 27. Trofazne kondenzatorske prigušnice.....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 28. Natpisna pločica trofazne prigušnice.....</i>	<i>31</i>
<i>Slika 29. Prikaz uklapanja kondenzatorskih sklopnika [10].....</i>	<i>31</i>
<i>Slika 30. Kondenzatorski sklopnici.....</i>	<i>32</i>
<i>Slika 31. Regulator faktora snage.....</i>	<i>33</i>
<i>Slika 32. Prikaz mjesečne potrošnje jalove energije.....</i>	<i>34</i>
<i>Slika 33. Prikaz mjesečne potrošnje radne snage (viša tarifa).....</i>	<i>35</i>

## 10. Popis tablica

<i>Tablica 1. Faktori snaga za različita trošila [4].....</i>	<i>10</i>
<i>Tablica 2. Nazivni podaci trofazne kondenzatorske prigušnice [8] .....</i>	<i>30</i>
<i>Tablica 3. Faktor proračuna [11].....</i>	<i>38</i>