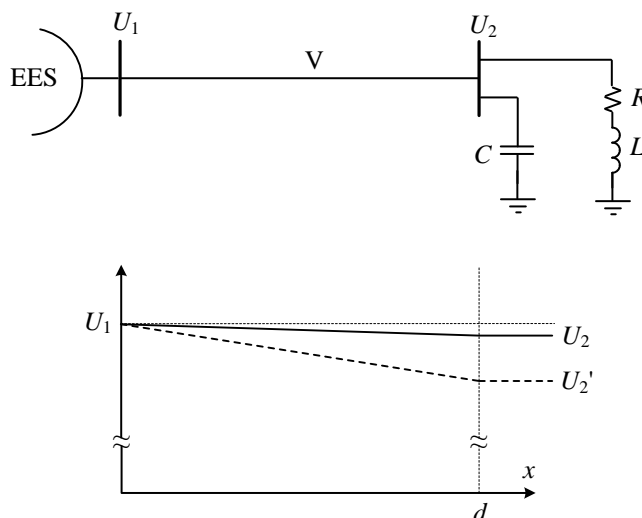


9. Primena otočnih kondenzatorskih baterija

9.1 Primena kondenzatorskih baterija u regulaciji napona

Kondenzatori se mogu koristiti za regulaciju napona u EES-u u otočnoj ili rednoj konfiguraciji. Na slici 1 je prikazano povećanje napona duž distributivnog voda pomoću otočnog kondenzatora na kraju voda, povećanje napona na RL potrošaču.



Slika 1: Povećanje napona duž distributivnog voda korišćenjem otočnog kondenzatora: U_2' napon potrošača bez kondenzatora, U_2 napon potrošača nakon priključenja kondenzatora

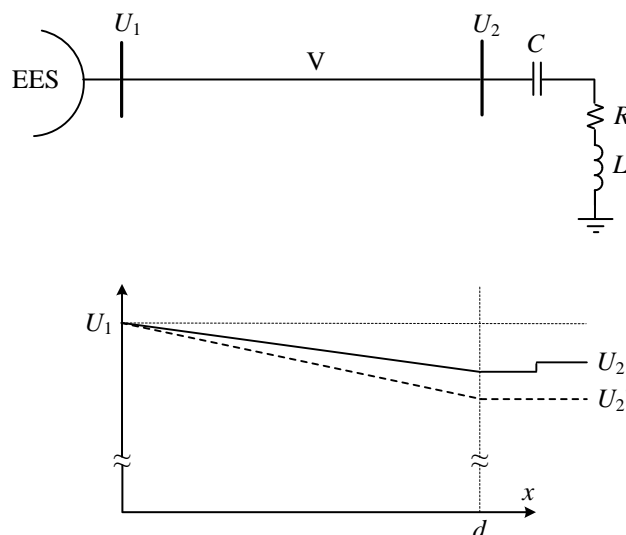
Prisustvo otočnog kondenzatora na kraju distributivnog voda omogućava kontinualnu promenu napona duž voda. Procentualno povećanje napona potrošača (napona na kraju voda) korišćenjem otočnog kondenzatora je:

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_2 - U_2'}{U_2'} \quad (9.1)$$

gde su: U_2 efektivna vrednost napona na kraju voda kada je priključen kondenzator i U_2' efektivna vrednost napona na kraju voda bez kondenzatora.

Idealno bi bilo da se maksimalno povećanje napona pomoću otočnog kondenzatora postiže kada je vod nominalno opterećen i da ne bude povećanja napona kada vod nije opterećen. Međutim, otočni kondenzator povećava napon na kraju voda nezavisno od opterećenja voda. Zbog toga je neophodno isključenje kondenzatora kada vod nije opterećen i ponovno uključivanje kada se vod opterećuje. Pri tome, mogu nastati oscilatorni tranzijenti. Korišćenje otočnih kondenzatora može dovesti i do problema zbog pojačanja harmonika prisutnih u naponu.

Na slici 2 je prikazano povećanje napona duž distributivnog voda i napona potrošača pomoću rednog kondenzatora na kraju voda.



Slika 2: Povećanje napona na distributivnom vodu korišćenjem rednog kondenzatora: U_2' napon na potrošaču bez kondenzatora, U_2 napon na potrošaču nakon priključenja kondenzatora

Kondenzator priključen na red sa distributivnim vodom omogućava povećanje napona na kraju voda zavisno od opterećenja voda: kada vod nije opterećen nema povećanja napona, a kada je vod maksimalno opterećen povećanje napona pomoću kondenzatora je maksimalno. Dobra osobina rednih kondenzatora je što ne zahtevaju isključenje i uključanje. Osim toga, redni kondenzator je znatno manje snage od otočnog.

Redni kondenzatori imaju nekoliko nedostataka. Redni kondenzator ne može da obezbedi popravku faktora snage, tako da se njegovim korišćenjem ne postiže smanjenje gubitaka snage na vodu. Pri proticanju struje kratkog spoja, na rednom kondenzatoru će se javiti ekstremno visok napon, tako da redni kondenzator zahteva automatsku zaštitu koja će ga premostiti u slučaju proticanja struje kratkog spoja. Redni kondenzatori mogu formirati i rezonantna kola sa motorima ili ferorezonantna kola sa transformatorima, pa je njihova primena u distributivnim mrežama jako ograničena.

9.2 Popravka faktora snage korišćenjem otočnih kondenzatorskih baterija

Popravka faktora snage potrošača podrazumeva kompenzaciju toka reaktivne snage iz sistema ka potrošaču. Kompenzacijom reaktivne snage se postižu sledeći efekti:

- smanjenje R^2 gubitaka, a samim tim i smanjenje zagrevanja vodova i transformatora
- povećanje napona na mestu priključenja potrošača i povećanje efikasnosti potrošača
- smanjenje struje i oslobađanje prenosnih kapaciteta vodova i transformatora, što omogućava napajanje dodatnih potrošača

Osnovni motiv za kompenzaciju reaktivne snage kod potrošača je ekonomski, cilj je da se smanje troškovi zbog naplate preuzete reaktivne energije. Investicija u uređaje za kompenzaciju reaktivne snage se isplati u periodu od 6 meseci do 2 godine. Sa stanovišta elektrodistribucije, postoje tehnički benefiti od kompenzacije reaktivne snage. Kompenzacijom reaktivne snage se smanjuje ukupna struja u mreži za vrednost reaktivne struje. Zbog toga se smanjuje opterećenje transformatora i vodova što

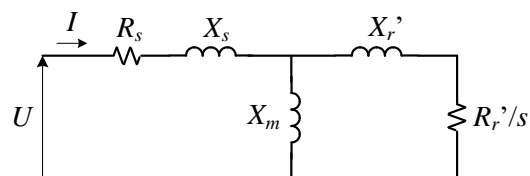
dovodi smanjenje tehničkih gubitaka u celom EES-u, do povećanja stabilnost elektroenergetskog sistema i sigurnosti snabdevanja potrošača.

Korišćenje kondenzatora za popravku faktora snage može dovesti do problema sa harmonicima. Iako kondenzatori nisu izvor hamonika, oni mogu pojačati harmonike koji su prisutni u naponu na mestu priključenja kondenzatora Takođe, mogući su i problemi sa uključenjem kondenzatorskih baterija zbog nastanka tranzijentnih oscilacija. Da bi se prevazišli ovi poblemi koriste se statički komperzatori reaktivne snage (SVC – *static var compensators*) sa realizacijama tiristorskog uključenja kondenzatora (TSC) i tiristorski regulisane prigušnice (TCR).

9.2.1 Potrošači reaktivne energije

Osnovni potrošači reaktivne energije u EES-u su: asinhroni motori, transformatori, elektrolučne peći, indukcionne peći, elektrovučne podstanice i fluorescentna rasveta.

Asinhroni motori se nalaze u sklopu različitih mašina i aparata i predstavljaju dominantan potrošač reaktivne energije u industriji i domaćinstvima. Na slici 3 je prikazana monofazna ekvivalentna šema asinhronog motora sa parametrima statora R_s i X_s , granom magnećenja X_m i sa parametrima rotora X_r' i R_r'/s svedenim na stranu statora, gde je s klizanje.



Slika 3: Monofazna ekvivalentna šema asinhronog motora

U praznom hodu asinhronog motora je $R_r'/s \rightarrow \infty$, tako da je reaktivna snaga motora:

$$Q_0 = 3U_n I_0 \approx 3X_m I_0^2 \approx 3 \frac{U_n^2}{X_m} \quad (9.2)$$

gde je U_n naznačeni napon motora, a I_0 struja praznog hoda motora.

Zbog relativno velikog vazdušnog zazora između rotora i statora, reaktivna snaga motora u praznom hodu iznosi (25÷35)% naznačene snage motora P_n .

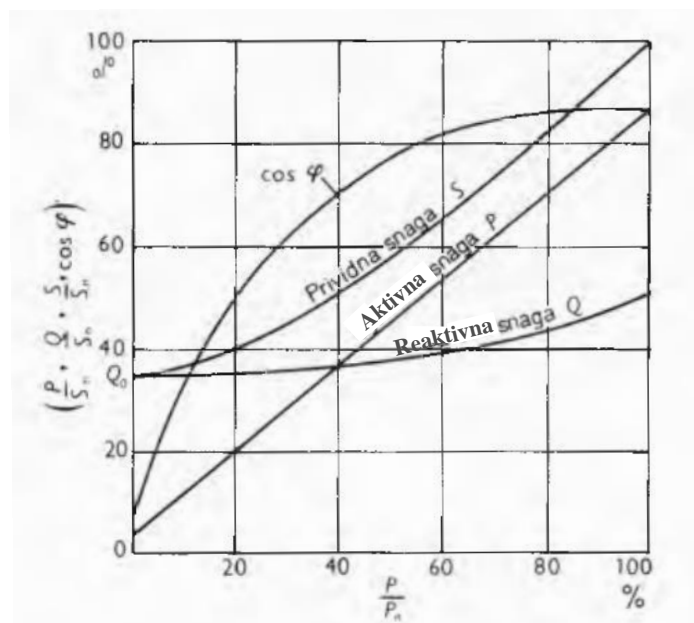
Sa povećanjem opterećenja motora raste i struja kroz statorski namotaj motora (koji ima određenu induktivnost rasipanja), a time i potrošnja reaktivne snage. Reaktansa asinhronog motora u režimu opterećenja je:

$$X_M = X_s + \frac{X_m X_r'}{X_m + X_r'} \approx X_s + X_r' \quad (9.3)$$

Reaktivna snaga motora pri opterećenju strujom I je:

$$Q = 3X_M I^2 \quad (9.4)$$

Faktor snage asinhronih motora zavisi od njihovog opterećenja, od naznačena snage i od konstrukcije. Na slici 4 je prikazana pogonska karakteristika asinhronog motora.



Slika 4: Pogonske karakteristike niskonaponskog asinhronog motora snage 55 kW, 1000 o/min

Na osnovu pogonske karakteristike asinhronog motora se vidi da neopterećeni motor ima veoma nizak faktor snage. Povećanjem opterećenja faktor snage raste, a pri punoj snazi ima najveću vrednosti koja se kreće između 0,75 i 0,90 (niže vrednosti se odnose na manje, a više na veće motore). Uzrok poboljšanju faktora snage je da se reaktivna snaga sporije povećava od aktivne

Ako se pretpostavi da je struja motora srazmerna aktivnoj snazi motora:

$$I = \frac{P}{P_n} I_n \quad (9.5)$$

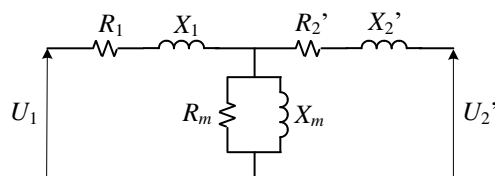
reaktivna snaga motora je:

$$Q = 3 \left(\frac{P}{P_n} \right)^2 X_M I_n^2 \quad (9.6)$$

Pri nominalnom opterećenju motora reaktivna snaga je (40÷70)% P_n .

Sinhroni motori se po pitanju reaktivne snage ponašaju kao i sinhroni generatori: kada su natpodbuđeni oni daju reaktivnu snagu, a kada su potpobuđeni oni uzimaju reaktivnu snagu iz mreže.

Transformatori takođe spadaju u velike potrošače reaktivne energije. Na slici 5 je prikazana monofazna ekvivalentna šema transformatora sa parametrima namotaja na primarnoj strani R_1 i X_1 , granom magnećenja sa parametrima R_m i X_m i sa parametrima namotaja na sekundarnoj strani X_2' i R_2' svedenim na primarnu stranu.



Slika 5: Monofazna ekvivalentna šema transformatora

Reaktivna snaga transformatora u praznom hodu je:

$$Q_0 = 3U_{1n}I_0 \approx 3X_m I_0^2 \approx 3 \frac{U_{1n}^2}{X_m} \quad (9.7)$$

gde je U_{1n} naznačeni primarni napon transformatora, a I_0 struja praznog hoda transformatora.

Za razliku od asinhronih motora, transformatori u praznom hodu troše malo reaktivne snage. Reaktivna snaga transformatora u praznom hodu iznosi (1÷3)% naznačene prividne snage S_n (manje vrednosti se odnose na velike visokonaponske transformatore, a velike vrednosti na male distributivne transformatore)

Struja opterećenja stvara u transformatoru velike gubitke reaktivne snage. Reaktivna snaga transformatora pri opterećenju strujom I_1 je:

$$Q = 3X_T I_1^2 \quad (9.8)$$

gde je reaktansa transformatora $X_T \approx X_1 + X_2'$.

Ako se pretpostavi da je struja transformatora srazmerna njegovoj prividnoj snazi:

$$I_1 = \frac{S}{S_n} I_{1n} \quad (9.9)$$

reaktivna snaga transformatora je:

$$Q = 3 \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 X_T I_{1n}^2 \quad (9.10)$$

Transformator predstavlja veliki induktivni otpor čiji je pokazatelj napon kratkog spoja u_k . Struja opterećenja stvara u transformatoru velike gubitke reaktivne snage, oni se povećavaju sa kvadratom struje opterećenja. Pošto s:

$$X_T = u_k \frac{U_n^2}{S_n} \quad (9.11)$$

reaktivna snaga transformatora naznačene snage S_n , napona kratkog spoja u_k , koji je opterećen prividnom snagom S je:

$$Q = u_k S_n \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 \quad (9.12)$$

pri čemu je nominalna snaga transformatora $S_n = \sqrt{3} U_{1n} I_{1n}$.

Pri nominalnom opterećenju transformatora reaktivna snaga je (10÷15)% S_n .

Elektrolučne peći spadaju u nelinearne potrošače velikih snaga u EES-u. Elektrolučne peći su obično peći sa direktnim delovanjem luka; luk gori između vertikalnih elektroda i metala-šarže. Ovakve peći se koriste za topljenje čelika i predstavljaju agregate velikih snaga, čak i preko 100 MVA. Električna snaga koja se pri radu peći koristi za dobijanje toplotne energije posredstvom električnog luka, jako se razlikuje u pojedinim periodima rada peći. Reaktansa kola u pojedinim fazama izrade šarže takođe treba da bude različita, da bi se peć održavala u optimalnim radnim uslovima. Usled velikih promenljivih struja stvaraju se velike oscilacije napona, a zbog prirode električnog luka vrši se

injektiranje viših harmonika u mrežu. Zbog intenzivnosti procesa i dimenzija postrojenja postoje značajni gubici snage tokom topljenja. Električni luk je po svojoj prirodi nestabilan, brzopromenljiv i generiše harmonike po celom spektru, što uz veliku snagu peći, tj. veliku struju, stvara velike probleme kod projektovanja i implementacije kompenzacije reaktivne snage ovakvog postrojenja.

Električne karakteristike elektrolučne peći su aktivna snaga koju peć uzima iz mreže P_{akt} , snaga električnih gubitaka P_{gub} i korisna snaga koja se razvija u električnom luku P_{kor} . Za elektrolučnu peć se takođe definišu električni stepen korisnog dejstva η_{el} i faktor snage peći λ :

$$\eta_{el} = \frac{P_{kor}}{P_{akt}} \quad (9.13)$$

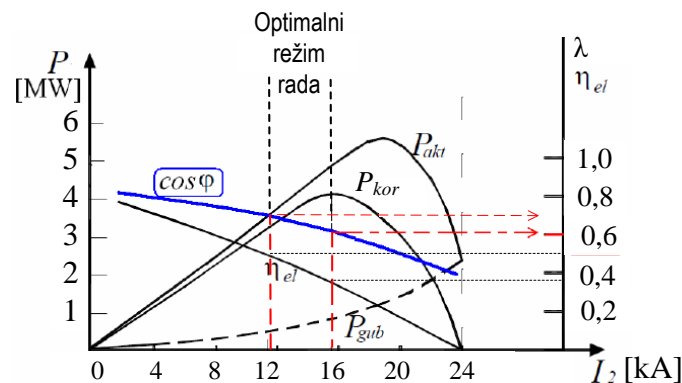
$$\lambda = \frac{P_{kor}}{S} \quad (9.14)$$

Električne karakteristike elektrolučne peći kapaciteta 10 tona u funkciji struje opterećenja peći su prikazane na slici 6.

Elektrolučna peć je tehnološki agregat koji je okarakterisan maksimalnom korisnom snagom i ukupnom efikasnošću koja uključuje električnu efikasnost η_{el} i termičku efikasnost η_{th} :

$$\eta = \eta_{el} \cdot \eta_{th} \quad (9.15)$$

Maksimalna korisna snaga koja se razvija u električnom luku se postiže pri relativno maloj električnoj efikasnosti peći od 0,35 i pri faktoru snage 0,6. Ipak, pri režimu maksimalne korisne snage P_{kor} ne postiže se i maksimalna produktivnost peći, tako da je optimalni režim rada peći kada je vrednost električne efikasnosti u opsegu od 0,35 do 0,5. Vrednost faktora snage elektrolučne peći u optimalnom režimu rada ima vrednosti od 0,6 do 0,7.

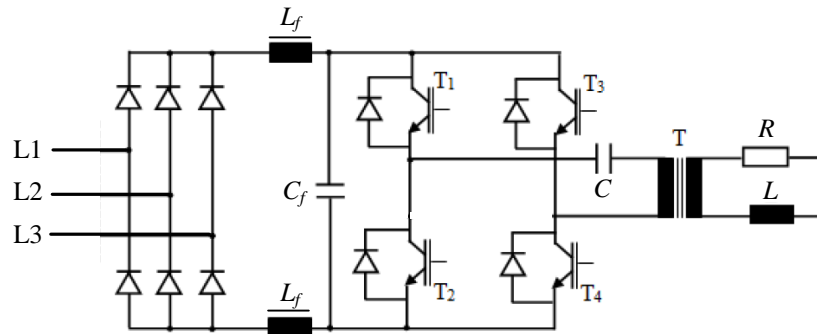


Slika 6: Električne karakteristike elektrolučne peći

Indukcione peći su uređaji za zagrevanje ili topljenje metala, kao što su razne vrste gvožđa i čelika, bakar, platina itd. Opseg frekvencija na kojima rade je od 2 Hz do 500 kHz, a opseg napona od 220 V do 6 kV. Princip rada indukcionih peći se zasniva na elektromagnetskog indukciji. Zagrevani materijal mora da bude dobar provodnik električne struje. Prednost indukcionih peći je što se toplota direktno generiše u metalu, tako da nije potrebno ostvariti prenos toplote kroz vazduh ili drugi provodnik toplote. Indukcione peći obično rade na transformatorskom principu ili na principu stvaranja vrložnih struja. Indukcione peći koje rade na transformatorskom principu imaju primarni namotaj sa velikim brojem zavojaka i sekundarni namotaj sa malim brojem zavojaka (jedan ili dva) koji su napravljeni od materijala koji se zagreva ili topi. Indukcioni peći koje rade na principu indukovanja vrtložnih struja

imaju induktor u koji se postavlja materijal koji se obrađuje (šarža). Kada se materijal nađe u promenljivom magnetskom polju u njemu se indukuju vrtložne struje koje zagrevaju materijal.

Frekvencije kojima se vrši indukciono zagrevanje zavise od tehnološkim procesa i kreću se od mrežne frekvencije (50 Hz) do nekoliko stotina kiloherca. Da bi se dobila promenljiva polja većih frekvencija, napajanje induktora se vrši iz invertora sa prilagodnim rezonantnim kolom. Invertori omogućavaju napajanje induktora strujom u željenom opsegu učestanosti, uz mogućnost regulisanja snage zagrevanja. Na slici 7 je prikazana šema napajanja indukcione peći pomoću mosnog invertora.

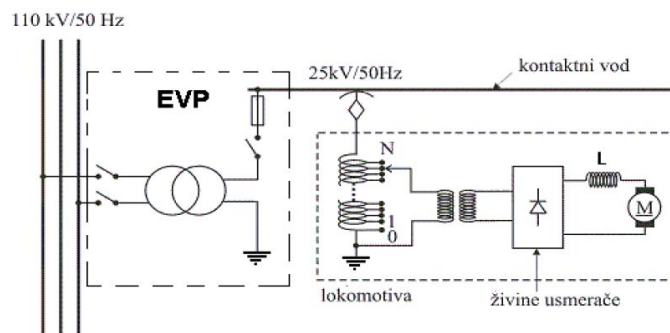


Slika 7: Ekvivalentna šema napajanja indukcione peći pomoću mosnog invertora

Postrojenje indukcione peći se napaja iz distributivne mreže preko ispravljača i invertora. U DC kolu se nalazi velika prigušnica induktivnosti L_f i kondenzator za skladištenje energije i filtriranje. Prugušnica u DC kolu se koristi za ograničenje struje u slučaju kratkog spoja na AC strani invertora. Mosni inverter sadrži IGBT tranzistore. Za napajanje induktora indukcione peći korišćen je transformator T prenosnog odnosa $N:1$. Induktor koji se koristi za dobijanje promenljivog magnetskog polja je predstavljen parametrima R i L .

Faktor snage indukcionih peći ima vrednosti od 0,6 do 0,8. Napajanje inukcione peći preko ispravljača i invertora ima za posledicu generisanje viših harmonika, tako da je neophodno da se popravka faktora snage vrši uz filtriranje viših harmonika.

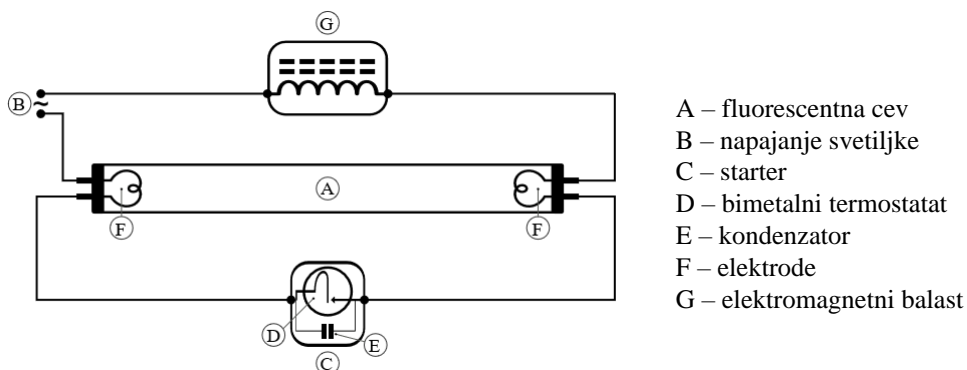
Elektrovučne podstanice su postrojenja koja se koriste za napajanje kontaktne mreže koja preko pantografa napaja električna vučna vozila. U elektrovučnim podstanicama se vrši AC/DC konverzija elektrirčne energije i one se sa primarne AC strane napajaju monofaznim ili trofaznim naizmeničnim naponom, dok na sekundarnoj DC strani daju jednosmerni napon kojim se napaja kontaktna mreža. Napajanje ovog tipa se izvodi kod vozova i podzemnog železničkog saobraćaja (metro) pri čemu je napon napajanja (1.5÷3) kV DC, dok je kod tramvaja napon kontaktnog voda 600V (750V) DC. Kod železničkog saobraćaja se obično koriste elektrovučne postanice koje vrše AC/AC konverziju, a u lokomotivama se nalaze autotransformatori, ispravljači i redni motori jednosmerne struje. Elektrovučne podstanice u Srbiji su transformatorske stanice 110/25 kV/kV, 2x7,5 MVA, ukupne instalisane snage 300 MVA u 20 postrojenja. Na slici 8 je prikazana principijelna šema elektrovučne podstanice 110/25 kV/kV za napajanje električne lokomotive.



Slika 8: Ekvivalentna šema elektroenergetske podstanice

Elektroenergetske podstanice jednofaznog sistema 25 kV, 50 Hz priključuju se na međufazni napon tofazne elektroenergetske mreže. Zbog toga mogu da nastanu naponske i strujne nesimetrije. Ublažavanje nesimetrije se može vršiti napajanjem elektroenergetskih podstanica sa različitih faza, "V" i Skott-ovom spregom transformatora. Faktor snage lokomotive se kreće u opsegu do 0,5 do 0,8.

Fluorescentna rasveta radi na principu pražnjenja u gasovima. Zbog toga se fluorescentne svetiljke priključuju na mrežu preko balasta da bi se obezbedio visok napon potreban za iniciranje pražnjenja i uspostavljanje struje između elektroda u fluo cevi. Najčešće se koriste elektromagnetski balasti, iako se u poslednje vreme sve više koriste i elektronski balasti kojima se zbog rada na višoj frekvenciji izbegavaju flikeri, a povećava se i efikasnost svetiljke. Na slici 9 je prikazano strujno kolo fluorescentne svetiljke.



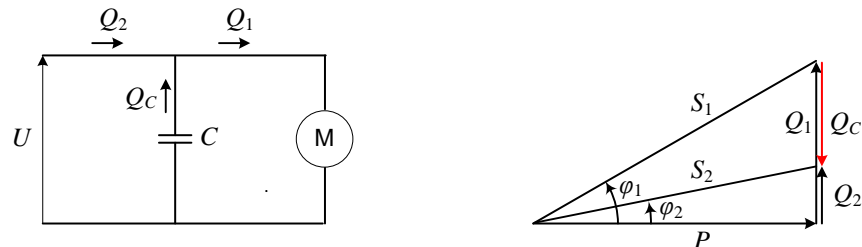
Slika 9: Strujno kolo fluorescentne svetiljke

Elektromagnetni balast se sastoji od kondenzatora i elektromagnetne prigušnice sa gvozdenim jezgrom. Elektromagnetna prigušnica omogućava stvaranje napona paljenja fluo cevi, ograničava radnu struju, pomaže u stabilizaciji napona napajanja, a pošto je vezana na red sa sijalicom umanjuje i harmonijska izobličenja. Pošto je elektromagnetna prigušnica pretežno induktivno opterećenje, direktno smanjuje faktor snage koji u proseku iznosi 0,5. Zbog toga je obavezna upotreba kondenzatora za korekciju faktora snage. U praksi se teži da se u izradi prigušnice koristi što deblja lak žica i što veći presek magnetnog jezgra (manji omski i induktivni otpor), kao i što kvalitetniji silikonski limovi (veća magnetna permeabilnost i manji gubici u gvoždju W/kg). Dobro projektovana prigušnica ima manje gubitke snage i manja harmonijska izobličenja, tako da se može postići faktor snage i do 0,98-0,99%, uz THD do 15%.

Elektronski balasti, iako su skuplji od elektromagnetskih, našli su široku primenu kod fluorescentnih svetiljki zbog uštede energije, dužeg radnog veka fluo-cevi, mogućnosti dimovanja, zbog manjih dimenzija, manjeg treperenja i manjeg stroboskopskog efekta. Princip rada je da se ulazni naizmenični napon frekvencije 50 Hz pretvori u jednosmerni pa se onda pomoću invertora pretvara u naizmenični napon vrlo visoke frekvencije 20÷50 kHz. Bez zaštitnih mera, struja koju apsorbuje ispravljačko-invertorsko kolo poprima vrlo velika izobličenja. Iako su osnovni harmonik napona i struje u fazi, zbog velikih izobličenja faktor snage ima vrednost 0,50÷0,60. Postavljanjem niskopojasnog filtra ispred ispravljačkog elementa, znatno se popravlja faktor snage do vrednosti 0,96÷0,98 i THD faktor do 22÷30%. Ako se ugradi aktivni filter između ispravljačkog i invertorskog elementa, faktor snage dostiže vrednost i do 0,998, a THD faktor se smanjuje do 5%. Oba filtra, pasivni ili aktivni, povećavaju cenu elektronske prigušnice i do 30%, međutim zahvaljujući masovnoj proizvodnji ona može i da bude i manja. Kod kompaktnih fluo svetiljki (CFL), mnogi proizvođači ne ugrađuju korektore faktora snage zbog malog prostora, malih gabarita i zbog smanjenja cene svetiljke. Ovakve CFL imaju faktor snage 0,6 i THD 100%.

9.2.2 Popravka faktora snage potrošača sa prostoperiodičnim naponima i strujama

Popravka faktora snage korišćenjem otočne kondenzatorske baterije podrazumeva kompenzaciju toka reaktivne snage iz sistema ka potrošaču. S obzirom na nepoželjne posledice prenosa reaktivnih snaga, njihov tok u mreži treba svesti na najmanju moguću meru, tako da izvore reaktivne snage treba približiti potrošačima reaktivne snage. Na slici 10 je prikazana kompenzacija reaktivne snage motora korišćenjem kondenzatorske baterije i odgovarajući fazorski dijagram snaga.



Slika 10: Kompensacija reaktivne snage motora i odgovarajući fazorski dijagram snaga

Ako se induktivnom potrošaču koji uzima iz mreže aktivnu snagu P i reaktivnu snagu Q paralelno priključi kondenzator koji je izvor reaktivne snage Q_c , njihova kombinacija će uzimati iz mreže razliku reaktivnih snaga:

$$Q_2 = Q_1 - Q_c \quad (9.16)$$

Prividna snaga će se, uz nepromenjenu aktivnu snagu P , smanjiti od $S_1 = \sqrt{P^2 + Q_1^2}$ na:

$$S_2 = \sqrt{P^2 + Q_2^2} = \sqrt{P^2 + (Q_1 - Q_c)^2} \quad (9.17)$$

Priključenjem kondenzatora takođe se smanjuju i ugao između aktivne i prividne snage od φ_1 na φ_2 , a faktor snage će se time povećati, odnosno poboljšati. Opisanim postupkom se izvodi paralelna kompenzacija reaktivne snage motora.

Za popravak faktora snage od $\cos\varphi_1$ na $\cos\varphi_2$ i smanjenje prividne snage od S_1 na S_2 potrebna je reaktivna snaga kondenzatorskih baterija:

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) \quad (9.18)$$

Ako se želi uz poznati utrošak reaktivne energije W_q (očitan na brojilu) naći potrebna snaga Q_C kondenzatora koji treba ugraditi da bi se postigao određeni srednji (obračunski) faktor snage $\cos\varphi_2$ za vreme t pogonskih sati, ona se može izračunati iz relacije:

$$Q_C = \frac{W_q - W \operatorname{tg} \varphi_2}{t} \quad (9.19)$$

gde je W aktivna energija očitana na brojilu.

Kondenzatorske baterije mogu biti vezane u zvezdu ili u trougao. U slučaju veze u zvezdu, potrebna kapacitivnost kondenzatora u grani, pri efektivnoj vrednosti linijskog napona U , je:

$$C = \frac{Q_C}{\omega U^2} \quad (9.20)$$

U slučaju veze kondenzatorskih baterija u trougao, potrebna kapacitivnost kondenzatora u grani, pri efektivnoj vrednosti linijskog napona U , je:

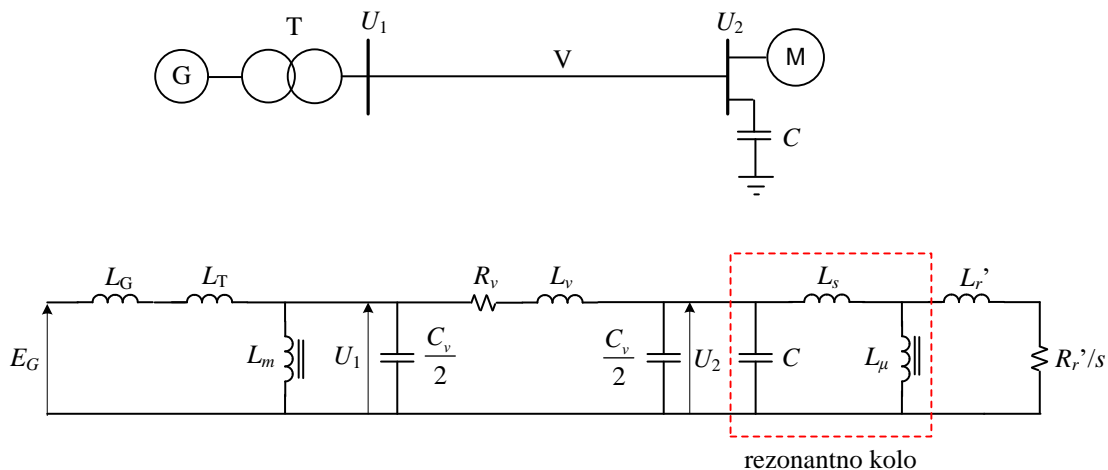
$$C = \frac{Q_C}{3\omega U^2} \quad (9.21)$$

U slučaju veze u trougao potreban je 3 puta manja kapacitivnost baterija da bi se postigla ista reaktivna snaga Q_C , ali su baterije izložene $\sqrt{3}$ puta većem naponu u odnosu na kondenzatorske baterije koje su vezane u zvezdu.

Baterije kondenzatora se izrađuju u najčešće tipskim jedinicama: 2,5-5-10-25-50-75... kvar. U zavisnosti od pogona koji se kompenzuje i vrednosti iz niza vrši izbor baterija kondenzatora za kompenzaciju.

9.2.3 Pojava rezonanse pri prekompenzaciji reaktivne snage

Ukoliko je izvršena prekompenzacija reaktivne snage može doći do pojave paralelne rezonanse (antirezonanse), odnosno do povećanja napona na mestu prijemnika. Ovo povećanje napona može biti opasno i za prijemnik i za kondenzatorsku bateriju. Na slici 11 je prikazana ekvivalentna šema sistema u kome je zbog prekompenzacije reaktivne snage asinhronog motora nastala paralelna rezonansa.



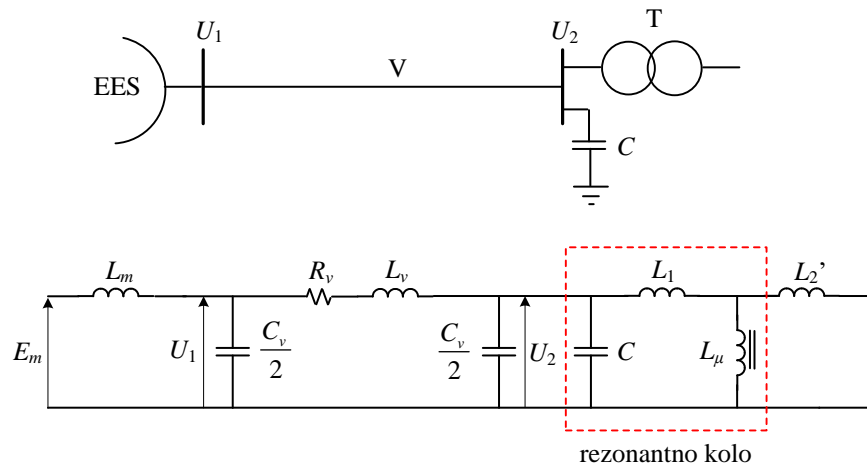
Slika 11: Ekvivalentna šema sistema u kome je zbog prekompenzacije reaktivne snage asinhronog motora nastala paralelna rezonansa

Na slici 11 sa E_G i L_G su označene elektromotorna sila i induktivnost rasipanja generatora, sa L_T i L_m su označene induktivnost rasipanja i magnećenja transformatora, R_v , L_v i C_v su otpornost, induktivnost i kapacitivnost voda, a sa L_s , L_r' , R_r' i L_μ su označeni induktivnost rasipanja statora, induktivnost rasipanja rotora svedena na stator i induktivnost magnećenja motora sa klizanjem s . Rezonantno kolo na slici 11 čini redna veza induktivnosti rasipanja statora i induktivnosti magnećenja motora u paralelnoj vezi sa kapacitivnošću kondenzatorske baterije za kompenzaciju reaktivne snage motora. Uslov za nastanak paralelne rezonanse je:

$$\frac{1}{\omega C} = \omega(L_s + L_\mu) \quad (9.22)$$

Uzrok nastanka paralelne rezonanse je prekomerna kompenzacija kondenzatorom prevelike kapacitivnosti, što dovodi do povećanja napona koji može ugroziti motor i kondenzatorsku bateriju. Da bi se sprečilo povećanje napona usled paralelne rezonanse, nazivna snaga kondenzatorske baterije ne sme da pređe 90% prividne snage potrošača (elektromotora) u praznom hodu. Ovaj uslov se svodi na praktični uslov da naznačena snaga kondenzatorske baterije ne sme da pređe 35% naznačene aktivne snage motora za trajno opterećenje.

Do pojave paralelne rezonanse i opasnih napona može doći i usled prevelike kapacitivnosti kondenzatora za kompenzaciju reaktivne snage slabo opterećenog transformatora, kao što je prikazano na slici 12.



Slika 12: Ekvivalentna šema sistema u kome je zbog prekompenzacije reaktivne snage slabo opterećenog transformatora nastala paralelna rezonanse

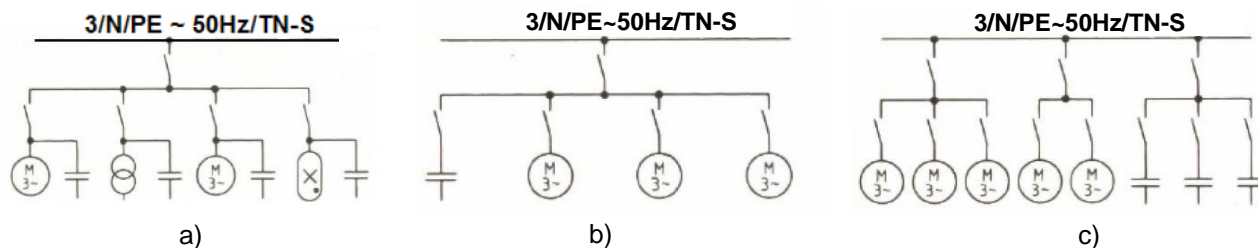
Na slici 12 sa E_m i L_m su označene elektromotorna sila i induktivnost mreže, R_v , L_v i C_v su otpornost, induktivnost i kapacitivnost voda, a sa L_1 , L_2' i L_μ su označene induktivnosti rasipanja i magnećenja transformatora. Rezonantno kolo na slici 12 čini redna veza induktivnosti rasipanja primarnog namotaja i induktivnosti magnećenja transformatora u paralelnoj vezi sa kapacitivnošću kondenzatorske baterije za kompenzaciju reaktivne snage transformatora. Uslov za nastanak paralelne rezonanse je:

$$\frac{1}{\omega C} = \omega(L_1 + L_\mu) \quad (9.23)$$

Prekomerna kompenzacija kondenzatorom prevelike kapacitivnosti i u ovom slučaju dovodi do povećanja napona koji može ugroziti transformator i kondenzatorsku bateriju.

9.2.4 Tipovi kompenzacije reaktivne snage (energije)

Da bi se postigla što racionalnija kompenzacija reaktivne snage (energije) koriste se tri vrste kompenzacije: pojedinačna, grupna i centralna (na slici 13).



Slika 13: Kompenzacija reaktivne snage potrošača: a) pojedinačna, b) grupna, c) centralna

Pojedinačna kompenzacija reaktivne snage je ekonomična kod elektromotora koji su u stalnom pogonu i imaju približno konstantno opterećenje i konstantan faktor snage. Primjenjuje se kod pumpi, ventilatora, kompresora, raznih mlinova i sl. Primena pojedinačne kompenzacije reaktivne snage nije dozvoljena kod elektromotora koji pogone transportne mašine, kranove, dizalice i sl. jer postoji opasnost da nakon njihovog isključenja dođe do nastavka njihovog rada usled akumulirane energije u kondenzatoru za kompenzaciju. Prednosti pojedinačne kompenzacije su što se kondenzatori ugrađuju neposredno uz potrošač i što su zaštitni i prekidačni elementi zajednički za bateriju i potrošač.

Pored opisane metodologije u potpoglavlju 9.1.1, za određivanje snage kondenzatora za kompenzaciju reaktivne snage trofaznog motora može se koristiti i iskustveni izraz prema reaktivnoj snazi praznog hoda motora:

$$Q_c = 0,9 I_0 U \sqrt{3} \cdot 10^{-3} \text{ kvar} \quad (9.24)$$

gde je I_0 struja praznog hoda motora u amperima, a U linijski napon mreže u voltima. Snaga kondenzatora za manje asinhronne motore iznosi oko 50% naznačene snage motora, a za veće motore oko 30% naznačene snage motora.

Kod pojedinačne kompenzacije reaktivne snage transformatora, kondenzator se priključuje na sekundarni namotaj i može se iskustveno dimenzionisati na osnovu snage praznog hoda transformatora. Ako je transformator trajno opterećen, na taj način se može kompenzovati i deo reaktivne snage opterećenja na sekundaru.

Fluorescentne sijalice imaju zbog ugrađene prigušnice vrlo loš faktor snage, tako da je kompenzacija obavezna. Na primer, ako se želi popraviti faktor snage sijalica od 40 W na $\cos\varphi=0.96\div 1$, treba ugraditi kondenzator od približno 70 var.

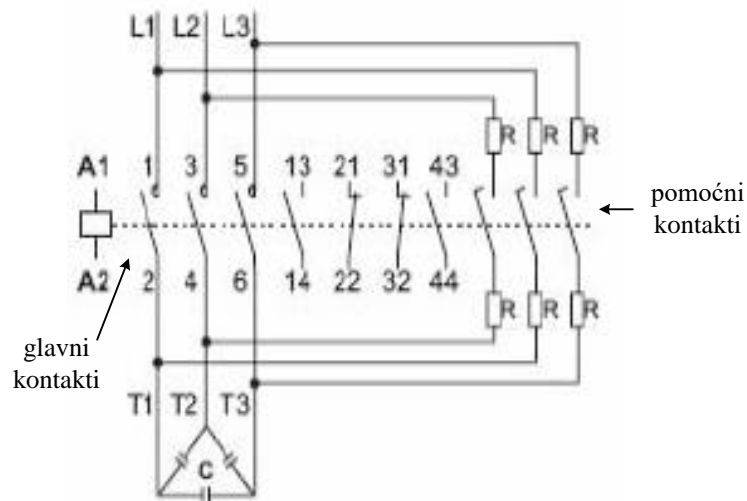
Na slici 13 je prikazana pojedinačna kompenzacija trofaznih motora, transformatora i fluorescentne svetiljke.

Grupna kompenzacija se izvodi kada se želi kompenzovati reaktivna snaga više sličnih potrošača (na primer, grupe motora ili grupe fluorescentnih sijalica). Ako se potrošači ne uključuju grupno nego pojedinačno, treba paziti da ne dođe do prekompenzacije. U slučaju da postoji takva mogućnost, kondenzator treba opremiti posebnom sklopkom i automatikom za njegovo isključenje. Za pravilno dimenzionisanje kondenzatorskih baterija potrebno je poznavati dnevni dijagram snage potrošnje potrošača.

Centralna kompenzacija reaktivne snage se izvodi za potrošače nekog pogona na jednom mestu. Svrha centralne kompenzacije je rasterećenje napojne mreže i ušteda na troškovima za prekomernu potrošnju reaktivne snage ili energije. U unutrašnjoj mreži pogona se ništa ne menja i nema nikakvih poboljšanja. Centralna kompenzacija obično zahteva manje instalisane snage kondenzatorskim baterijama nego pojedinačna kompenzacija iz razloga što svi potrošači obično ne rade istovremeno. Da bi se snaga kompenzacije mogla prilagoditi trenutnom opterećenju potrošača, neophodno je uključivanje i isključivanje grupa kondenzatorskih baterija. U tu svrhu je neophodan i regulator reaktivne energije koji na mestu napajanja meri reaktivnu energiju. U slučaju odstupanja faktora snage od zadate vrednosti, regulator vrši uključivanje ili isključivanje grupe kondenzatora stepenasto, tako da se reaktivna snaga koja potrebna za kompenzaciju menja stepenasto.

9.2.5 Uključenje kondenzatorskih baterija kontaktorima

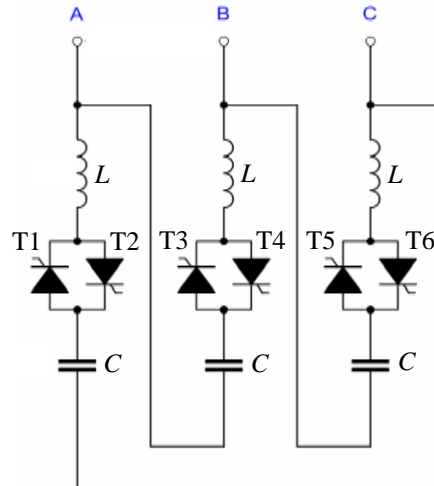
Prilikom direktnog uključivanja i isključivanja kondenzatorskih baterija pod opterećenjem nastaju kratkotrajni strujni tranzijenti reda veličine struje kratkog spoja. Oscilatorno kolo čini kapacitivnost kondenzatorske baterije sa induktivnostima i kapacitivnostima u kolu. Poseban problem predstavlja stepenasto uključivanje kondenzatora jer u kompenzacionom uređaju već postoje napunjeni kondenzatori, što dovodi do velikih tranzijentnih struja. Velike vrednosti struja uključivanja mogu dovesti do topljenja kontakata kontaktora, a štetne su i za kondenzatorske baterije. Zbog toga se, radi zaštite osoblja i instalacije, koriste posebni kontaktori namenjeni za uključivanje kondenzatorskih baterija. Upotrebom standardnih kontaktora dovodi se u opasnost osoblje i kompletna instalacija. Ako ne mogu da se koriste posebni kondenzatorski kontaktori, neophodno je ugraditi otpornike i prigušnice za ograničenje struje uključivanja. Na slici 14 je prikazana tipična šema uključivanja kondenzatorske baterije pomoću kontaktora sa pomoćnim predkontaktima koji uključuju kondenzatorske baterije preko otpornika za ograničenje struje. Nakon 5-10 ms se uključuju glavni kontakti, a zatim se isključuju pomoćni.



Slika 14: Tipična šema uključivanja kondenzatorske baterije pomoću kontaktora sa pomoćnim predkontaktima

9.2.6 Tiristorsko uključenje i isključenje kondenzatorske baterije (TSC)

Za uključenje kondenzatorskih baterija umesto kontaktora mogu da se koriste tiristorski prekidači sa antiparalelnom vezom tiristora. Tiristori tada rade u režimu nulte sklopke (uključenje i isključenje pri nultim vrednostima napona ili vrednostima bliskim nuli). Postrojenje sadrži i prigušnicu za ograničenje struje. Na slici 15 je prikazano kolo za tiristorsko uključnja i isključenje kondenzatorske baterije.



Slika 15: Kolo za tiristorsko uključenje i isključenje kondenzatorske baterije

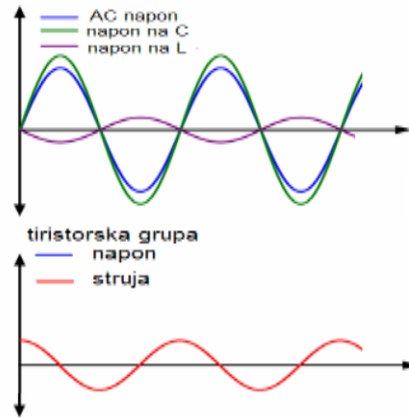
Struja kroz kondenzator sadrži komponentu industrijske učestanosti ω i dve komponente koje imaju sopstvenu (rezonantnu) učestanost ω_r kola koje se uključuje:

$$i = \frac{U_m}{X_C - X_L} \cos(\omega t + \alpha) - \frac{U_m}{X_C - X_L} \cos \alpha \cos \omega_r t + \left(\frac{X_C U_m \sin \alpha}{\omega_s L (X_C - X_L)} - \frac{U_{c0}}{\omega_s L} \right) \sin \omega_r t \quad (9.25)$$

gde je U_m maksimalna vrednost međufaznog napona, X_C i X_L reaktanse kondenzatora i prigušnice, L induktivnost prigušnice, U_{c0} je početna vrednost napona na kondenzatoru, $\omega_r = 1/\sqrt{LC}$ je sopstvena (rezonantna) učestanost LC kola i α fazni ugao napona u trenutku uključnja tiristora.

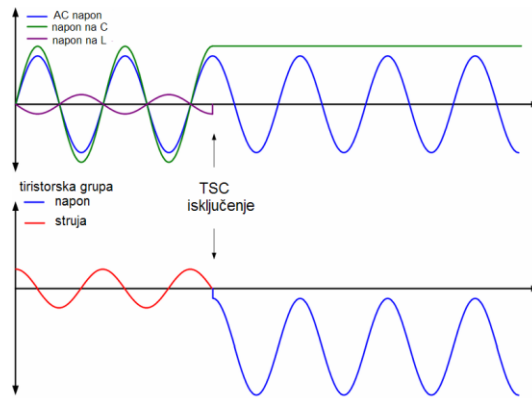
Razlikuju se tri karakteristična radna režima TSC postrojenja: ustaljeni režim, isključenje i uključnje.

Na slici 16 su prikazani talasni oblici napona i struja u ustaljenom radnom režimu TSC postrojenja. Pri tome je tiristorska sklopka uključnja, naponi na induktivnosti i kondenzatoru su u kontra fazi. Struja u kolu je pretežno kapacitivna.



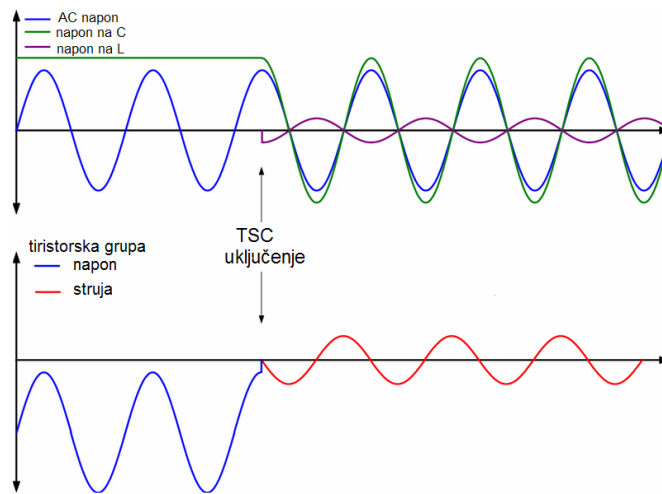
Slika 16: Talasni oblici napona i struja u ustaljenom radnom režimu TSC postrojenja

Na slici 17 su prikazani talasni oblici napona i struja pri isključenju TSC postrojenja. Isključenje postrojenja se ostvaruje pri prolasku struje kroz nulu, tako da napon na kondenzatoru zadržava maksimalnu vrednost koja je nešto veća od amplitude mrežnog napona. Ipak, napon na kondenzatoru se smanjuje tokom vremena dok je kondenzator isključen zbog samopražnjenja kondenzatora.



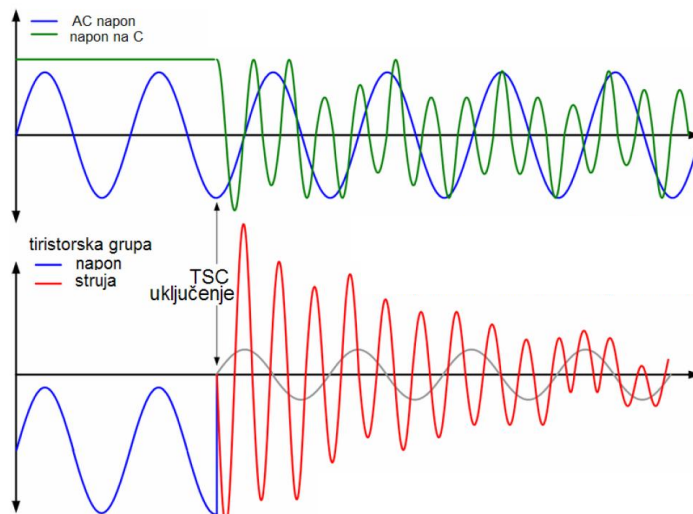
Slika 17: Talasni oblici napona i struja pri isključenju TSC postrojenja

Na slici 19 su prikazani talasni oblici napona i struja pri uključenju TSC postrojenja. Optimalno uključenje postrojenja se ostvaruje pri maksimalnoj vrednostima mrežnog napona, tada je napon na tiristorima približno jednak nuli ako je kondenzatorska baterija prethodno napunjena na vrednost napona koja je približno jednaka amplitudi mrežnog napona. Pošto postoji pražnjenje kondenzatorske baterije, posebno ako je ona duže vremena isključena, napon na kondenzatoru može biti manji od amplitude mrežnog napona, tako da se mogu pojaviti izvesni tranzijenti pri uključenju.



Slika 19: Talasni oblici napona i struja pri uključenju TSC postrojenja

U slučaju kada se uključenje kondenzatorske baterije ne vrši pri maksimalnoj vrednosti mrežnog napona javljaju se tranzijenti u naponu i struji kondenzatora, kao što je prikazano na slici 20, tako da se takva vrsta uključenja izbegava.



Slika 20: Tranzijenti napona i struja kada se uključenje TSC postrojenja ne vrši pri maksimalnoj vrednosti mrežnog napona

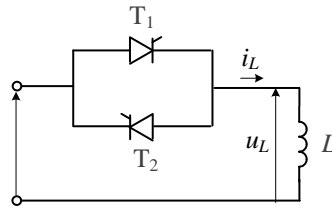
Pri većim naponima se koristi tiristorska sklopka koja je sastavljena od redne veze više antiparalelnih grupa tiristora. Prethodne funkcije optimalnog uključenja i isključenja kondenzatorskih baterija se mogu ostvariti i pomoću antiparalelne veze tiristora i diode.

9.2.7 Tiristorski regulisana prigušnica (TCR)

Tiristorski regulisanom prigušnicom se može postići kontinualna regulacija reaktivne energije. U slučaju kada su promene reaktivne snage u sistemu velike, paralelno opterećenju se može priključiti kondenzatorska baterija dovoljno velike kapacitivnosti, tako da potrošač sa baterijom predstavlja

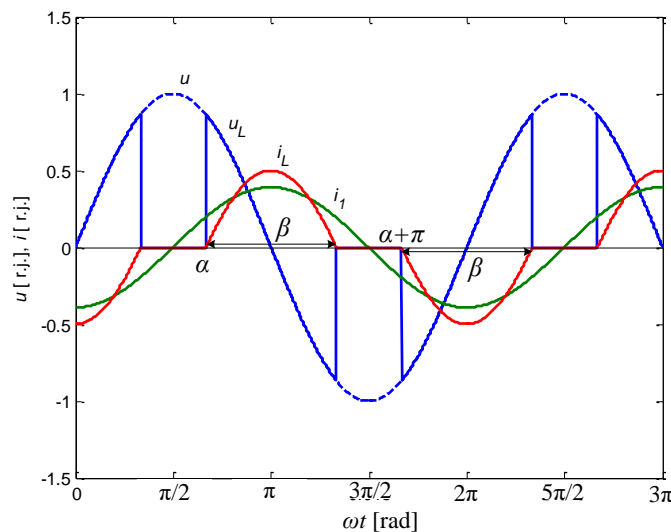
kapacitivno opterećenje. Paralelno sa kondenzatorskom baterijom se priključuje tiristorski regulisana prigušnica kojom se podešava faktor snage na željenu vrednost.

Tiristorski regulisana prigušnica je prikazan na slici 21.



Slika 21: Tiristorski regulisana prigušnica

Na slici 22 su prikazani mrežni napon u , napon u_L na prigušnici, struja i_L kroz prigušnicu i osnovni harmonik i_1 struje i_L kroz prigušnicu. Ugao uključenja tiristora je označen sa α , a ugao vođenja tiristora sa β . Na slici 22 ugao vođenja tiristora je simetričan u odnosu na fazne uglove π i 2π , što znači da je $\beta=2\pi-2\alpha$. Napon u_L na prigušnici je jednak mrežnom naponu u u periodu vođenja tiristora i jednak je nuli kada tiristori nisu uključeni. U periodu vođenja tiristora postoji struja kroz prigušnicu koja najpre raste, a zatim opada zbog promene polariteta napona na prigušnici.



Slika 22: Mrežni napon u , napon u_L na prigušnici, struja i_L kroz prigušnicu i osnovni harmonik i_1 struje i_L kroz prigušnicu

Ako je ugao uključenja tiristora veći od 90° , struja kroz prigušnicu je:

$$i_L = \frac{1}{L} \int_{\alpha/\omega}^t \sqrt{2} U \sin(\omega t) dt = \sqrt{2} \frac{U}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \omega t), \quad \text{za } \alpha < \omega t < \alpha + \beta \quad (9.26)$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int_{(\alpha+\pi)/\omega}^t \sqrt{2} U \sin(\omega t) dt = \sqrt{2} \frac{U}{\omega L} (-\cos \alpha - \cos \omega t), \quad \text{za } \alpha + \pi < \omega t < \alpha + \pi + \beta \quad (9.27)$$

$$i_L = 0, \text{ za } \frac{\beta}{2} < \omega t < \alpha \quad \text{i} \quad \alpha + \beta < \omega t < \alpha + \pi \quad (9.28)$$

gde je U efektivna vrednost napona, α je ugao uključenja tiristora, a β je ugao provođenja tiristora.

Amplituda osnovnog harmonika struje i_L kroz prigušnicu je:

$$a_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_L(x) \cos x dx = \frac{4}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{\sqrt{2}U}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \omega t) \cos x dx = -\frac{2\sqrt{2}U}{\omega L} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right) \quad (9.29)$$

Efektivna vrednost osnovnog harmonika struje kroz prigušnicu je:

$$I_1 = \frac{|a_1|}{\sqrt{2}} = \frac{2U}{\omega L} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right) \quad (9.30)$$

U slučaju kada je ugao vođenja simetričan u odnosu na 180° , struja sadrži samo neparne harmonike čije su efektivne vrednosti:

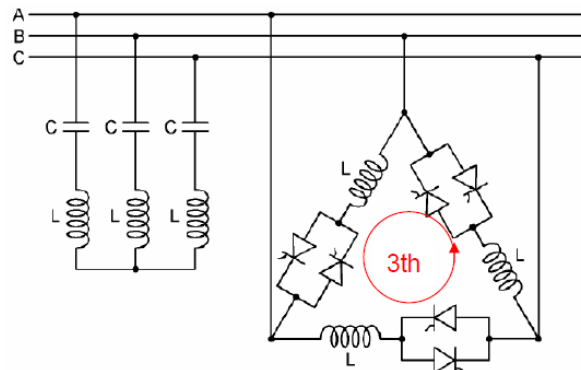
$$I_k = \frac{4U}{\pi\omega L} \left(\frac{\sin(k+1)\alpha}{2(k+1)} + \frac{\sin(k-1)\alpha}{2(k-1)} - \cos \alpha \frac{\sin k\alpha}{k} \right) \quad (9.31)$$

Pri uglu paljenja tiristora $\alpha=120^\circ$ dominantni viši harmonici u struji tiristorski regulisane prigušnice su treći i peti harmonik:

$$I_3 = \frac{U}{\omega L} \cdot \frac{\sqrt{3}}{4\pi} = 0,138 \frac{U}{\omega L} \quad (9.32)$$

$$I_5 = \frac{4U}{\omega L} \cdot \left(\frac{1}{8} - 0,1 \right) \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,0866 \frac{U}{\omega L} \quad (9.33)$$

U slučaju trofaznog sistema, prenošenje u mrežu trećeg harmonika struje tiristorski regulisane prigušnice se može sprečiti spregom tiristorski regulisanih prigušnica u trougao, kao što je prikazano na slici 23.



Slika 23: Sprega tiristorski regulisanih prigušnica u trougao

Na slici 23 je prikazana tipična šema realizacije kompenzacije reaktivne snage u trofaznom sistemu korišćenjem kondenzatorskih baterija i tiristorski regulisanih prigušnica. Promenom ugla paljenja

tiristora menje se efektivna vrednost osnovnog harmonika struje kroz prigušnicu, što je ekvivalentno efektu promenljive induktivnosti. Baterija kondenzatora generiše konstantnu reaktivnu snagu (pri stalnom naponu). Reaktivna snaga koju prikazani kompenzator injektira u mrežu jednaka je razlici reaktivne snage koju proizvodi kondenzatorska baterija i reaktivne snage koju troše tiristorski regulisane prigušnice. Trofazna reaktivna snaga pri učestanosti osnovnog harmonika tiristorski regulisane prigušnice spregnute u trougao je:

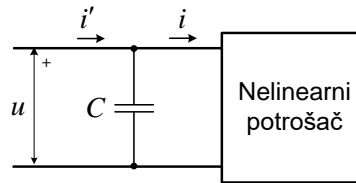
$$Q_L = 3UI_1 = \frac{6U^2}{\omega L} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right) \quad (9.34)$$

gde je U efektivna vrednost međufaznog napona. Promenom ugla α uključenja tiristora induktivna reaktivna snaga prigušnice se može kontinualno podešavati, a samim tim i reaktivna snaga koju kompenzaciono postrojenje injektira u mreži. Međutim, pri naponima koji su manji od naznačenog, promena reaktivne snage nije linearna, što je mana ovih kompenzatora reaktivne snage.

9.2.8 Popravka faktora snage potrošača uz uvažavanje uticaja viših harmonika napona i struja

Popravka faktora snage potrošača uz uvažavanje uticaja harmonika napona i struja podrazumera optimalnu kompenzaciju neaktivne snage potrošača, što znači da pored reaktivne snage Q treba optimalno kompenzovati i rasipnu snagu D_s , kao i snagu debalansa D_u u slučaju nesimetrija.

Na slici 24 je prikazana popravka faktora snage monofaznog nelinearnog potrošača pomoću kondenzatora. Struja potrošača je označena sa i , a napon na priključcima potrošača je označen sa u .



Slika 24: Popravka faktora snage monofaznog nelinearnog potrošača

Nakon priključenja kondenzatora struja u napojnom vodu potrošača i' je jednaka zbiru struje potrošača i struje kroz kondenzator:

$$i' = i + C \frac{du}{dt} \quad (9.35)$$

Optimalna kapacitivnost kondenzatora C_{opt} za kompenzaciju neaktivne snage monofaznog nelinearnog potrošača se može odrediti minimizacijom efektivne vrednosti struje u napojnom vodu potrošača (odnosno minimizacijom kvadrata efektivne vrednosti struje):

$$I'^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i'^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left(i + C \frac{du}{dt} \right)^2 dt \rightarrow \min \quad (9.36)$$

odnosno

$$\frac{\partial(I'^2)}{\partial C} = \frac{2}{T} \int_0^T \left(i + C \frac{du}{dt} \right) \frac{du}{dt} dt = 0 \quad (9.37)$$

Na osnovu prethodne jednačine, dobija se izraz za optimalnu kapacitivnost kondenzatora preko veličina u vremenskom domenu:

$$C_{\text{opt}} = -\frac{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{du}{dt} i dt}{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{du}{dt}\right)^2 dt} \quad (9.38)$$

Optimalna kapacitivnost može da se izračuna i u frekvencijskom domenu na osnovu efektivnih vrednosti i faznih uglova harmonika napona i struja:

$$C_{\text{opt}} = \frac{1}{\omega_1} \frac{\sum_{k=1}^{\infty} k U_k I_k \sin(\theta_k - \psi_k)}{\sum_{k=1}^{\infty} k^2 U_k^2} \quad (9.39)$$

gde su: ω_1 osnovna učestanost, U_k i θ_k efektivna vrednost i fazni ugao k -tog harmonika napona, I_k i ψ_k efektivna vrednost i fazni ugao k -tog harmonika struje (pre priključenja kondenzatora).

Prividna snaga kondenzatora S_C je jednaka njegovoj reaktivnoj snazi Q_C , s obzirom da se radi o reaktivnom elementu. Na osnovu efektivne vrednosti napona U i efektivne vrednosti struje I_C kroz kondenzator, može se napisati izraz za prividnu snagu kondenzatora S_C :

$$S_C = Q_C = U \cdot I_C = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(C \frac{du}{dt}\right)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \cdot C \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{du}{dt}\right)^2 dt} = \sqrt{\sum_{k=1}^n U_k^2} \cdot C \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^n \omega_k^2 U_k^2} \quad (9.40)$$

Na osnovu prethodnog izraza, kapacitivnost kondenzatora može da se izrazi preko reaktivne snage kondenzatora Q_C :

$$C = \frac{Q_C}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{du}{dt}\right)^2 dt}} = \frac{Q_C}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \omega_k^2 U_k^2}} \quad (9.41)$$

Ako je poznata ukupna neaktivna snaga Q_N potrošača koju treba kompenzovati kondenzatorom, potrebna kapacitivnost kondenzatora za kompenzaciju se dobija izjednačavanjem (po modulu) reaktivne snage kondenzatora sa neaktivnom snagom potrošača:

$$C = \frac{Q_N}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{du}{dt}\right)^2 dt}} \quad (9.42)$$

Na sličan način, može se odrediti kapacitivnost kondenzatora za kompenzaciju reaktivne snage potrošača. U tom slučaju treba izjednačiti reaktivnu snagu kondenzatora (po modulu) sa reaktivnom snagom potrošača:

$$C = \frac{Q}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{du}{dt}\right)^2 dt}} \quad (9.43)$$

Na sličan način kao za monofazni potrošač, određuju se i optimalne kapacitivnosti kondenzatora za popravku faktora snage trofaznog potrošača. U slučaju kada se koriste kondenzatori vezani u zvezdu, izrazi za optimalne kapacitivnosti u granama zvezde su:

$$C_{a\text{opt}} = -\frac{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{du_a}{dt} i_a dt}{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{du_a}{dt}\right)^2 dt} = \frac{1}{\omega_1} \frac{\sum_{k=1}^{\infty} k U_{ak} I_{ak} \sin(\theta_{ak} - \psi_{ak})}{\sum_{k=1}^{\infty} k^2 U_{ak}^2} \quad (9.44)$$

$$C_{b\text{opt}} = -\frac{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{du_b}{dt} i_b dt}{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{du_b}{dt}\right)^2 dt} = \frac{1}{\omega_1} \frac{\sum_{k=1}^{\infty} k U_{bk} I_{bk} \sin(\theta_{bk} - \psi_{bk})}{\sum_{k=1}^{\infty} k^2 U_{bk}^2} \quad (9.45)$$

$$C_{c\text{opt}} = -\frac{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{du_c}{dt} i_c dt}{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{du_c}{dt}\right)^2 dt} = \frac{1}{\omega_1} \frac{\sum_{k=1}^{\infty} k U_{ck} I_{ck} \sin(\theta_{ck} - \psi_{ck})}{\sum_{k=1}^{\infty} k^2 U_{ck}^2} \quad (9.46)$$

gde su: ω_1 osnovna učestanost, U_{ak} , θ_{ak} , U_{bk} , θ_{bk} , U_{ck} , θ_{ck} su efektivne vrednosti i odgovarajući fazni uglovi k -tih harmonika faznih napona u_a , u_b i u_c na priključcima potrošača, I_{ak} , ψ_{ak} , I_{bk} , ψ_{bk} , I_{ck} , ψ_{ck} su efektivne vrednosti i odgovarajući fazni uglovi k -tih harmonika linijskih struja potrošača i_a , i_b i i_c (pre priključenja kondenzatora).

U slučaju nesimetričnih napona u trofaznom trožičnom sistemu, u izrazima za određivanje optimalnih kapacitivnosti treba koristiti napone prema virtuelnoj neutralnoj tački koja obezbeđuje da je zbir faznih napona jednak nuli, $u_a+u_b+u_c=0$, a kondenzatori se vezuju u zvezdu sa izolovanim zvezdištem (čiji potencijal može da bude različit od referentnog potencijala virtuelne neutralne tačke). Fazni naponi u ovom slučaju su:

$$u_a = u_{av} \quad (9.47)$$

$$u_b = u_{bv} \quad (9.48)$$

$$u_c = u_{cv} \quad (9.49)$$

gde je sa “v” označena virtuelna neutralna tačka koje obezbeđuje da je $u_{av}+u_{bv}+u_{cv}=0$.

U slučaju trofaznog četvorožičnog sistema treba koristiti napone prema virtuelnoj neutralnoj tački koja obezbeđuje da je zbir faznih napona jednak nuli, $u_a+u_b+u_c+u_n=0$, a kondenzatori se vezuju u zvezdu sa izolovanim zvezdištem (čiji potencijal može da bude različit od referentnog potencijala virtuelne neutralne tačke i različit od potencijala neutralnog provodnika). Fazni naponi u ovom slučaju su:

$$u_a = u_{av} \quad (9.50)$$

$$u_b = u_{bv} \quad (9.51)$$

$$u_c = u_{cv} \quad (9.52)$$

$$u_n = u_{nv} \quad (9.53)$$

gde je sa “v” označeno izolovano zvezdiše koje obezbeđuje da je $u_{av}+u_{bv}+u_{cv}+u_{nv}=0$. Sa u_n je označen napon neutralnog provodnika prema virtuelnoj neutralnoj tački.

Za kompenzaciju reaktivne snage kod trofaznih sistema u praksi se često koristi sprega kondenzatorskih baterija u trougao. U slučaju sprege kondenzatora u trougao, može se koristiti prethodni optimizacioni postupak, pri čemu se dobijaju izrazi za optimalne kapacitivnosti u kojima treba koristiti međufazne napone U_{ab} , U_{bc} i U_{ca} i fazne struje i_{ab} , i_{bc} i i_{ca} trofaznog potrošača. Međutim, za trofazne potrošače su obično poznate linijske struje, ali ne i fazne struje. Izračunavanje faznih struja potrošača na osnovu linijskih struja nije moguće, tako da se za određivanje optimalnih kapacitivnosti kondenzatora vezanih u trougao moraju najpre odrediti kapacitivnosti kondenzatora spregnutih u izolovanu zvezdu, a onda se poznatom transformacijom zvezda-trougao mogu izračunati međufazne kapacitivnosti C_{ab} , C_{bc} i C_{ca} :

$$C_{ab} = \frac{C_a C_b}{C_a + C_b + C_c} \quad (9.54)$$

$$C_{bc} = \frac{C_b C_c}{C_a + C_b + C_c} \quad (9.55)$$

$$C_{ca} = \frac{C_c C_a}{C_a + C_b + C_c} \quad (9.56)$$

U slučaju trofaznih sistema sa simetričnim naponima ili sa relativno malim nesimetrijama napona, mogu se za spregu u zvezdu odrediti jednake kapacitivnosti kondenzatora za kompenzaciju neaktivne snage Q_N trofaznog potrošača:

$$C \approx \frac{Q_N}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (U_{ak}^2 + U_{bk}^2 + U_{ck}^2)} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \omega_k^2 (U_{ak}^2 + U_{bk}^2 + U_{ck}^2)}} \quad (9.57)$$

gde su U_{ak} , U_{bk} i U_{ck} su efektivne vrednosti harmonika faznih napona u_a , u_b i u_c .

Na sličan način, u trofaznim sistemima simetričnim naponima ili sa relativno malim nesimetrijama napona, mogu se za spregu odrediti jednake kapacitivnosti kondenzatora za kompenzaciju reaktivne snage Q trofaznog potrošača:

$$C \approx \frac{Q}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (U_{ak}^2 + U_{bk}^2 + U_{ck}^2)} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \omega_k^2 (U_{ak}^2 + U_{bk}^2 + U_{ck}^2)}} \quad (9.58)$$

Najveći deo neaktivne snage koja se kompenzije korišćenjem optimalnih kapacitivnosti je reaktivna snaga. Zbog toga, čak i ako se koriste optimalne kapacitnosti za kompenzaciju neaktivne snage, može se smatrati da će se najvećim delom kompenzovati reaktivna snaga potrošača. Priključenjem kondenzatora dolazi do povećanja harmonijskih izobličenja struja, što znači da se pri tome povećava komponenta neaktivne snage koja je posledica harmonika (rasipna snaga), tako da se ne može govoriti o kompenzaciji rasipne snage korišćenjem kondenzatorskih baterija. U slučaju korišćenja pasivnih filtera vrši i značajna kompenzacija harmonijskih izobličenja, tako da se može govoriti o kompenzaciji neaktivne snage u pravom smislu.

Faktor snage potrošača se izračunava kao odnos aktivne i prividne snage potrošača:

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad (9.59)$$

i može se odrediti pre i nakon kompenzacije, pri čemu se aktivna snaga P ne menja, dok je prividna snaga S manja nakon kompenzacije. Snage P i S treba izračunati uz uvažavanje viših harmonika.

U literaturi se može naći i sledeći približan izraz za izračunavanje maksimalno moguće korekcije faktora snage pod pretpostavkom da je THD faktor napona približno jednak nuli:

$$\lambda_2 \approx \sqrt{\frac{1}{1+THD_i^2}} \quad (9.60)$$

gde je THD_i totalno harmonijsko izobličenje struja.

Sledeća aproksimacija je pretpostavka da se faktor snage izračunava kao odnos aktivne snage i prividne snage u kojoj je reaktivna snaga jedina komponenta neaktivne snage:

$$\lambda = \frac{P}{S} \approx \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (9.61)$$

Na osnovu prethodne aproksimacije izveden je izraz za procenu reaktivne snage kondenzatorskih baterija:

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P \left(\sqrt{\frac{1}{\lambda_1^2} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\lambda_2^2} - 1} \right) \quad (9.62)$$

gde su: P aktivna snaga potrošača, Q_1 reaktivna snaga pre kompenzacije, Q_2 reaktivna snaga nakon kompenzacije, λ_1 faktor snage pre kompenzacije i λ_2 faktor snage koji treba da se postigne kompenzacijom reaktivne snage.