

TEHNIČKI ASPEKTI INSTALACIJA INDUSTRIJSKIH POGONA

TECHNICAL ASPECTS OF INDUSTRIAL INSTALLATION

Mladen Vuković, Dejan Jerkan, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – *Osnovni cilj ovog rada je planiranje izvodjenja elektroenergetske instalacije pogonskih postrojenja, sa sagledavanjem svih tehničkih aspekata neophodnih za efikasnu i nesmetanu funkciju postrojenja.*

Ključne reči: *Električne instalacije, elektromotorni pogoni.*

Abstract–*The main objective of this paper is design of the electrical installation, with consideration of all technical aspects necessary for the efficient and undisturbed function of the plant.*

Keywords: *Electrical installations, electrical drives.*

1. UVOD

Pod pojmom projektovanja električne instalacije u pogonu podrazumeva se pre svega odabir parametara opreme koja se instalira unutar postrojenja. Pod ovom opremom smatraju se: vodovi, rastavljači, prekidači, pogonski elementi, itd.

Izradom ovog rada težilo se planiranju električne instalacije industrijskog postrojenja sa planiranom kompenzacijom reaktivne energije. Kroz ovaj rad ispraćeni su svi propisani normativi za izvodjene električne instalacije, sagledan je proces kompenzacije i ispraćena moguća neželjena pojava rezonancije u instalaciji, kao i neželjene posledice do kojih ona može dovesti.

2. OBRAČUN ELEKTRIČNE ENERGIJE

Pod terminom tarifnog sistema podrazumeva se sistem obračuna isporučene električne energije kao i skup stručnih usluga sprovedenih od strane elektrodistributivnog preduzeća ka potrošaču. Tarifnim sistemom za odračun električne energije određuju se tarifni elementi i tarifni stavovi čijom se primenom dolazi do formiranja cene isporučene energije ka kupcu. Formiranje tarifnog sistema na području republike Srbije sprovodi preduzeće „Elektroprivreda Srbije“ i odeljenje za distribuciju električne energije. Tarifnim sistemom i njegovim pravnicima elektrodistribucija teži podsticaju potrošača na što manju potrošnju reaktivne energije.

Sagledavanjem najvažnijih karakteristika potrošačkog konzuma i praćenjem njihovog uticaja na ukupne troškove unutar tarifnog sistema, elektrodistribucija sprovodi niz mera i olakšica kojima potrošače podstiče na racionalno trošenje energije.

NAPOMENA:

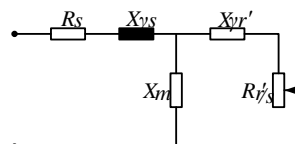
Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji je mentor bio dr Dejan Jerkan.

Sa gledišta reaktivne energije tarifni sistem u Srbiji je takav da potrošači plaćaju svu reaktivnu energiju preuzetu iz distributivne mreže, dok količinu prekomerne reaktivne energije plaćaju po višestruko većim cenama. Upravo u ovome vidi se težnja distribucije i podsticaj potrošača na instalisanju kompenzacionih sklopova reaktivne energije.

3. ASINHRONI MOTORI

Asinhroni motori kao najčešće korišćeni elementi elektromotornih pogona poznati su i pod nazivom indukcioni. Ovaj naziv baziran je na činjenici da se energija sa statora na rotor prenosi isključivo elektromagnetnom indukcijom. Asinhroni motori kao izrazito induktivni potrošači smatraju se istaknutim potrošačima reaktivne energije. Procentualno gledano asinhroni motori veći su potorošači reaktivne energije od transformatora, budući da je pored magnećenja magnetnog jezgra jedan deo ove energije potrebno izdvojiti za magnećenje vazdušnog zazora između statora i rotora.

Na sledećoj slici prikazana je pofazna šema asinhronog motora pomoću koje će biti izveden izraz potrošnje reaktivne energije :



Slika 1. Pofazna ekvivalentna šema asinhronog motora

R_s - Statorska otpornost

X_{ys} - Reaktansa rasipanja statora,

X_m - Reaktansa magnećenja,

X_{yr}' - reaktansa rasipanja rotora svedena na stator,

R_r'/s - Rotorska otpornost zavisna od klizanja mašine svedena na stator.

Reaktivna snaga praznog hoda asinhronog motora sa zanemarenim gubicima:

$$Q_m = \sqrt{S_0^2 - P_{fe}^2} \tag{1}$$

Kako je potrošnja snage asinhronog motora u direktnoj vezi sa njegovim opterećenjem, neophodno je u izraz za snagu uvesti K_{opt} faktor kojim će se dosledno predstaviti opterećenje:

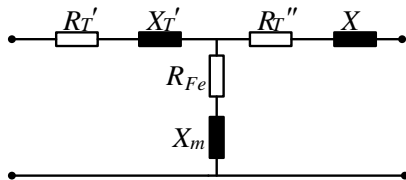
$$S_m = 3 \cdot (K_{opt} \cdot I_{nf})^2 \cdot |Z_{mot}| = 3 \cdot K_{opt}^2 \cdot I_{nf}^2 \cdot \frac{U_n}{I_{nf}} = K_{opt}^2 \cdot S_n \tag{2}$$

Izraz za proračunavanje kompenzacione baterije asinhronog motora izvodi se sledeći izraz:

$$Q_{baterije} = \sqrt{\left(S_n \cdot \frac{i_0[\%]}{100}\right)^2 - P_{fe}^2} + K_{opt} \sqrt{S_n^2 - P_{cu}^2} \approx S_n \cdot \frac{i_0[\%]}{100} + K_{opt}^2 \cdot S_n \tag{3}$$

4. TRANSFORMATORI

Prevedshodna uloga transformatora u elektroenergetskim sistemima je da posredstvom elektromagnetne indukcije vrše pretvaranje vrednosti napona i struje definisane prenosnim odnosom transformatora, pri nepromenjenoj frekvenciji. Upravo njihov princip rada zasnovan na magnetnoj indukciji, uz asinhronne motore, svrstava ih u najznačajnije potrošače reaktivne snage. Potrošnja reaktivne snage transformatora praćena je prikazom pofazne ekvivalentne šeme na slici 2.



Slika 2. Pofazna ekvivalentna šema transformatora

Kao polazna tačka za izvedbu potrošnje reaktivne snage transformatora uzima se uključanje neopterećenog transformatora na mrežu opisano izrazom za prividnu snagu:

$$S_{ph} = \sqrt{3} \cdot U_0 \cdot I_0 = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot \left(I_n \cdot \frac{i_0[\%]}{100} \right) = S_n \cdot \frac{i_0[\%]}{100} \quad (4)$$

Prateći prethodni izraz i poznavajući gubitke praznog hoda moguće je izračunati potraživanu reaktivnu snagu transformatora:

$$Q_m = \sqrt{S_{ph}^2 - P_{fe}^2} = \sqrt{\left(S_n \cdot \frac{i_0[\%]}{100} \right)^2 - P_{fe}^2} \quad (5)$$

Na pofaznoj šemi transformatora X_T' i X_T'' modeluju redne reaktanse rasipanja magnetnog fluksa u namotajima. Njima je opisan deo reaktivne energije potreban za zatvaranje fluksa između pojedinih namotaja i neferomagnetne sredine. Uzimajući u obzir da se ovim reaktansama opisuje priroda samih namotaja lako se zaključuje da je potrošnja reaktivne energije ovih elemenata zavisn od struje kroz ovaj namotaj tj. od opterećenja transformatora. Kako bi se opterećenje transformatora dosledno iskazalo u izrazu za potrošnju reaktivne energije ovih reaktansi uvodi se faktor opterećenja K_{opt} , iskazan kao relativna vrednost opterećenja u odnosu na naznačenu.

Kako je vrednost struje otočne grane u odnosu na struju redne grane relativno mala, moguće je smatrati da je struja kroz obe redne grane iste vrednosti.

Gubici prividne snage na rednoj grani usled opterećenja transformatora sa predstavljenim faktorom K_{opt} износи:

$$S_k = 3 \cdot \left(K_{opt} \cdot I_{nf} \right)^2 \cdot |Z_t| = 3 \cdot K_{opt}^2 \cdot I_{nf}^2 \cdot \frac{u_k \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} = K_{opt}^2 \cdot \frac{u_k}{100} \cdot S_n \quad (6)$$

Kvadratni stepen struje u izrazu za Džulove gubitke prenosi se i na sledeći izraz:

$$Q_k = \sqrt{S_t^2 - P_{cu}^2} = \sqrt{\left(K_{opt}^2 \cdot \frac{u_k[\%]}{100} \cdot S_n \right)^2 - \left(K_{opt}^2 \cdot P_{cu} \right)^2} \\ = K_{opt}^2 \sqrt{\left(\frac{u_k[\%]}{100} \cdot S_n \right)^2 - P_{cu}^2} \quad (7)$$

Kao veoma tačan izraz za izračunavanje ukupne reaktivne energije transformatora pokazao se zbir izraza reaktivnih energija rednih i otočne grane transformatora, spram koga je moguće odrediti vrednost kondenzatorskih baterija za kompenzaciju:

$$Q_{kB} \approx S_n \cdot \frac{i_0[\%]}{100} + K_{opt}^2 \cdot \frac{u_k[\%]}{100} \cdot S_n \quad (8)$$

5. KOMPENZACIJA REAKTIVNE ENERGIJE

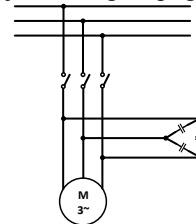
Trend razvoja elektroenergetike i privrede u svetu, ogleda se u što konkurentnijem i efikasnijem načinu poslovanja industrijskih postrojenja.

U cilju što pouzdanijeg i ekonomičnijeg snabdevanja, kao i u cilju popravke kvaliteta električne energije, poslednjih godina sve prisutnija su ulaganja u osavremenjavanje, odnosno automatizaciju procesa proizvodnje, kao i popravku njihovih tehničko-ekonomskih karakteristika.

Industrijski potrošači ostvaruju značajan uticaj u potrošačkom konzumu reaktivne energije elektrodistributivnog sistema, te je kompenzaciju reaktivne energije potrebno koncentrisati unutar postrojenja. Unutar postrojenja bez primenjene kompenzacije, faktor snage pokazuje tendenciju pogoršanja što rezultira ukupnim pogoršanjem stanja u distributivnoj mreži.

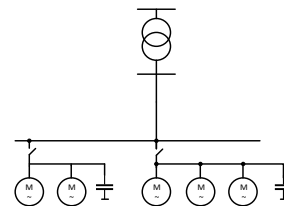
U praksi se kompenzacija reaktivne energije izvodi kroz četiri načina vezivanja kondenzatorskih baterija:

Pojedinačna kompenzacija podrazumeva da se kondenzatorske baterije priključuju direktno na priključke potrošača i da se njihovo uključivanje/isključivanje odvija vremenski istovetno sa radom potrošača. Prema empirijskim zaključcima pojedinačna kompenzacija izvodi se kod potrošača najveće snage u pogonu.



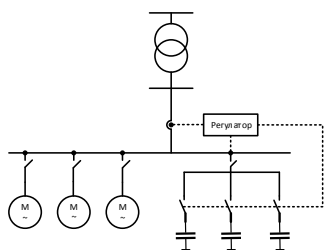
Slika 3. Šematski prikaz pojedinačne kompenzacije

Način **grupne kompenzacije** primenjuje se na mestima gde se istim vodom iz kondenzatorskih jedinica reaktivnom energijom napaja grupa induktivnih potrošača.



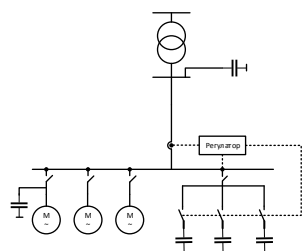
Slika 4. Šematski prikaz grupne kompenzacije

Pri **centralnoj kompenzaciji** reaktivna energija citavog postrojenja nadoknađuje se iz jednog kompenzacionog sklopa. Prednost ovog načina kompenzacije ogleda se u jednostavnom instalisanju opreme. Razvoj programabilnih komponenata automatizacije uvideo je svoju ulogu i pri procesu kompenzacije, tako da u slučaju promenljivog opterećenja postrojenja i centralne (grupne) izvedbe kompenzacije potrošnju reaktivne energije baterija mozemo kontrolisati regulatorom. Ovim uređajem postiže se ravnomerno trošenje kompenzacionog sklopa, cime se radni vek baterija značajno produžava.



Slika 5. Šematski prikaz centralne kompenzacije

Kao najčešći i najefikasniji način izvedbe izdvaja se **mešovita kompenzacija**. Pri ovoj izvedbi uviđaju se prednosti svih prethodnih načina. Kako bi se ovaj vid kompenzacije izveo što efikasnije potrebno je sagledati čitav sistem i njegovu funkcionalnost i prema tome predvideti najpogodniju topologiju kondenzatorskih baterija.



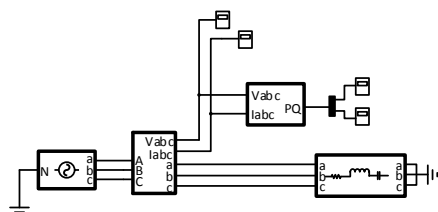
Slika 6. Šematski prikaz mešovite kompenzacije

6. HARMONIJSKA ANALIZA REZONANTNOG KOLA

Baza ovog rada bila je projektovanje električne instalacije pogona konstruisanih sa asinhronim motorima kao dominantnim potrošačima i planiranom kompenzacijom reaktivne snage, te je neophodno bilo razmotriti moguću neželjenu pojavu rezonantnog kola. Pojava rezonance prevažno je istraživana iz aspekta kvaliteta električne energije i harmonijske analize napojne mreže postrojenja. Radi sagledavanja neželjenih uticaja po postrojenje uticajem rezonantnog kola izrađeno je simulacioni Matlab model.

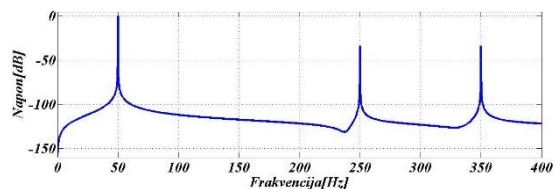
Jednostavan model izrađen od naizmeničnog izvora 400 V, 50 Hz, kojim se simulira napajanje omsko-induktivnog potrošača. Omske, odnosno induktivne vrednosti potrošača izračunate su tako da prilikom dodavanja kondenzatorske jedinice u kolo, pojava rezonance pokazuje svoje kritične uticaje na frekvenciji od 250 Hz tj. na petom harmoniku.

Kroz ovaj rad uticaj viših harmonika sagledan je kroz njihovu štetnost po kondenzatorske baterije, prikazanu kroz višestruko veće struje kroz kondenzator. Pojava visokih struja izazvala bi visoka termička naprezanja i na taj način u najkritičnijem slučaju izazvala potpuno uništenje baterije.



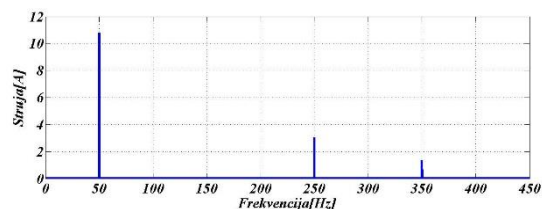
Slika 7. Matlab model simulacije rezonancije

Činjenicom da se napojnom mrežom pored razmatranih postrojenja napaja niz drugih potrošačkih područja, neminovno je bilo procentualno generisati udeo mreže u višim harmonicima sistema. Procentni udeo mreže u generisanju viših harmonika ograničio se na 2 %, koja su se spram negativnih uticaja rezonantnog kola mogla smatrati zanemarljivim.



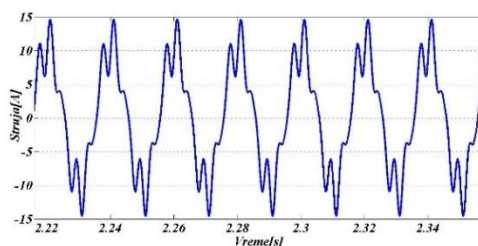
Slika 8. Harmonijski prikaz napona rezonantnog kola

Prethodna slika predstavlja grafički prikaz harmonijskog izobličenja napona izazvanog priključenjem rezonantnog kola u sistem. Procentualno posmatrano harmonijska distorzija napona iznosi 2,89 % što prema pravilnicima kvaliteta električne energije predstavlja dozvoljenu vrednost.



Slika 9. Harmonijski prikaz struje rezonantnog kola

Kritična očekivanja jasno su oslikana u prikazu harmonika struje. Posmatrajući prethodni harmonijski prikaz uviđa se kritično učešće petog harmonika u ukupnoj harmonijskoj distorziji. Procentualno ovaj harmonik prikazan je kao 30,9 % osnovnog harmonika što izlazi iz granica dozvoljenog. Iako je preciznim računom želja bila ostvariti negativan uticaj petog harmonika, u ukupnoj distorziji uviđa se uticaj i sedmog harmonika.



Slika 10. Talasni oblik struje rezonantnog kola

Kao konačni prikaz harmonijskog izobličenja dat je talasni oblik struje mreže, na kom se uviđaju značajna odstupanja od prihvatljive.

Prema svemu do sad izloženom u ovom poglavlju zaključuje se da je pri instalisanju kompenzacione opreme neophodno voditi računa o mogućoj pojavi rezonance i prema potrebi u kondenzatorska kola uključivati filtarske prigušnice. Kao opisni faktor filtarskih prigušnica usvojen je faktor **p**, iskazan odnosom osnovne(50Hz) i rezonantne frekvencije:

$$p[\%] = 100 \cdot \left(\frac{f_{50}}{f_{\text{rezonantno}}} \right)^2 \quad (9)$$

Gde je rezonantnu frekvenciju moguće odrediti poznavanjem induktivnosti i kapacitivnosti sklopa:

$$f_{\text{rezonantno}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad (10)$$

Pored prethodnih izraza pri određivanju filtarskih prigušnica neophodno je ispratiti pravne propise i standarde kvaliteta električne energije u kojima su navedene dozvoljene vrednosti pojedinih harmonika. Neretko je u praksi pri podešavanju frekvencije filtra potrebno pribegavati kompromisima po pitanju suzbijanja viših harmonika, smanjenju talasnosti upravljačkih veličina i pojavi rezonancije.

7. REALIZACIJA PRAKTIČNOG DELA

Završni deo rada predstavlja detaljan proračun vodova i prateće opreme neophodnih za bezbedno i nesmetano izvođenje elektroenergetske instalacije područja elektromotornih postrojenja. Početak projektovane trase predstavljen je distributivnom transformatorskom stanicom i proces proračuna završava se na krajnjem potrošaču.

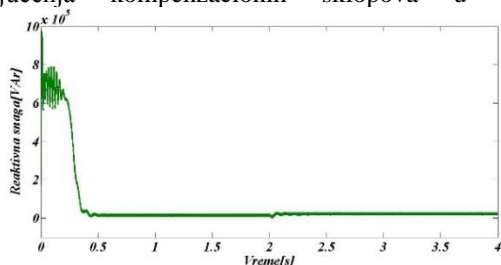
Sledeći tabelarni prikaz predstavlja konačni rezultat izvedenih proračuna sprovedenih za Pogon A. U tabelu su uvršteni strujni krugovi sa početkom od razvodne table pogona.

Kao dodatni segment praktičnog dela izrađen je simulacioni Matlab model sa identičnim potrošačima i planski proračunatom kompenzacijom reaktivne snage.

Strujni krug	Potrošnja [kW]	Presek voda [mm ²]	Trajno dozvoljena struja [A]	Automatski osigurač [A]	Dužina strujnog kruga [m]	Kompenzione baterije [μF]
1.	75000	50	179	125	4,55	303,363
2.	15000	4	40	25	8,35	Grupna: 171,327
3.	15000	4	40	25	5,5	
4.	37000	16	96	63	10,6	
5.	7500	4	40	25	11,95	Grupa 124,506
6.	7500	4	40	25	9,98	
7.	7500	4	40	25	13,1	
8.	4000	1	17	10	17,7	
9.	4000	1	17	10	20,55	

Tabela 1. Tabelarni prikaz Pogona A.

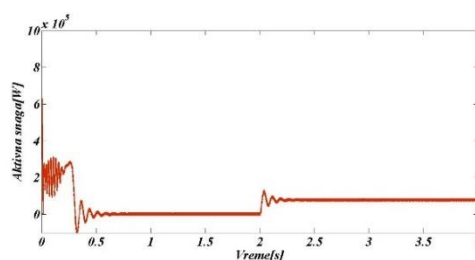
Proračun kondenzatorskih baterija izveden je prema izmerenom faktoru snage određenih segmenata pogona i baterije su izabrane kako bi ovi faktori doveli na željene vrednosti. Validnosti proračuna jednostavno je proprađena signalima reaktivne snage mreže nakon uključenja kompenzacionih sklopova u pogonu.



Slika 11. Signal reaktivne snage mreže nakon početka kompenzacije

Kompenzacioni sklop i potrošačka grupa početak svog rada započinju istovremeno sa početkom procesa simulacije. Posmatrajući signal reaktivne snage zaključuje se da na samom početku simulacije reaktivna snaga ima kratkotrajno visoku vrednost, nakon čega se signal smiruje i ustaljuje na vrednosti veoma bliskoj nuli.

Tokom daljeg toka simulacije ne uviđaju se značajnija odstupanja od ove vrednosti, sem kratkotrajni zanemarljivi pikovi u trenucima promene opterećenja. Kako bi se jasnije sagledali trenuci promene opterećenja na slici 12. priložen je i signal aktivne snage pogona.



Slika 12. Signal aktivne snage koju potrošačka grupa preuzima iz mreže

8. ZAKLJUČAK

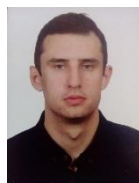
Izradom projekta elektroenergetske instalacije simuliranih motornih postrojenja i težnji za njihovim što efikasnijim funkcionisanjima neophodno je bilo ispratiti mnoge segmente energetske stabilnosti. Kao veoma važan deo električne instalacije pogonskog postrojenja smatra se deo za kompenzaciju. Pored ostvarenih benefita primenom kompenzacije reaktivne energije, neophodno je bilo sagledati i moguća neželjena stanja do kojih može doći pri instalisanju kondenzatorskih jedinica u mrežu pretežno opterećenom asinhronim motorim.

Kroz rad razmotrena je upotreba mogernih regulatora reaktivne energije i njihovo pridruživanje kompenzacionim sklopovima. Izneseni zaključak je da je njihova upotreba efikasna i ekonomski isplativa isključivo u većim pogonskim postrojenjima, sa čestom promenom opterećenja.

9. LITERATURA

- [1] Strahil J. Gušavac: Osnovni principi projektovanja u mrežama srednjeg i niskog napona, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2014.
- [2] Gojko Dotlić: Elektroenergetika kroz standarde, pravilnike i tehničke preporuke, Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije, Beograd, 2004.
- [3] Duško Bekut: Relejna zaštita, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2009.
- [4] Miomir Kostić: Teorija i praksa projektovanja električnih instalacija, Akademska misao.
- [5] Vladan Vučković: Električni pogoni, Akademska misao, Beograd.

Kratka biografija:



Mladen Vuković rođen je u Novom Sadu 1994. godine. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine odbranio 2018. godine. kontakt: mladenvukovic1994@gmail.com



Dejan Jerkan je docent na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na Katedri za Energetsku elektroniku i pretvarače. Oblast interesovanja su mu modelovanje i dijagnostika električnih mašina, kao i metoda konačnih elemenata.