

Branko Posedel, dipl.ing.el.
HEP-ODS d.o.o., Elektroistra Pula, Pogon Buje
branko.posedel@hep.hr

dr.sc. Petra Posedel
Zagrebačka škola ekonomije i managementa
pposedel@zsem.hr

TEHNO-EKONOMSKA KOMPENZACIJA JALOVE SNAGE DISTRIBUTIVNIH TRANSFORMATORA SN/NN

SAŽETAK

U ovom radu prikazan je način temeljne kompenzacije jalove energije distributivnih transformatora SN/NN. Zbog malog učešća jalovog opterećenja u ukupnim gubicima radne snage i energije u transformatorima, potrebno je izvršiti detaljne analize ekonomske isplativosti svakog ulaganja u kompenzaciju. Ovaj rad upravo slijedi tu ideju. Razvijeni matematički model omogućuje određivanje optimalne snage kondenzatorske baterije i godine isplativosti, uvažavajući i godišnje troškove održavanja. Za valorizaciju prihoda zbog smanjenja gubitaka snage i energije, troškova investicije i održavanja u periodu radnog vijeka baterije, korištena je aktualizacijska metoda. U modelu su predviđene dvije aktualizacijske stope kako bi se vidio njihov utjecaj na izbor optimalne snage baterije i vrijeme povrata investicije. Analiza je provedena za transformatore koji se ugrađuju u zračne i samostojeće betonske trafostanice gradskog tipa. Na kraju je predložena optimalna snaga kondenzatorske baterije i tipske snage transformatora SN/NN kod kojih je ekonomski isplativa temeljna kompenzacija.

ključne riječi: kondenzatorska baterija, smanjenje vršne snage i energije, aktualizacijska stopa, godišnji prihod, godišnji trošak

TEHNO-ECONOMIC REACTIVE POWER COMPENSATION OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS MV/LV

SUMMARY

The paper presents the method of reactive power compensation of distribution MV/LV transformers. Given the small participation of reactive load in total peak power and energy losses in transformers, it is necessary to analyze in detail the economic profitability of each investment in compensation. This work follows exactly this idea. A developed mathematical model allows the determination of optimal power of shunt capacitor and years of profitability, taking in consideration annual maintenance costs. For the valuation of revenue due to power loss reduction, investment and maintenance costs in the battery lifetime period, the actualization (net present value) method is used. Two discount rates are imposed in the model in order to illustrate their influence on the optimal power shunt capacitor choice and the investment payback period. The analysis is performed for transformers that are embedded in air and freestanding cement substations of city type. The paper also proposes an optimal shunt capacitor's power and typical power of MV/LV transformers, where the basic compensation is economically profitable.

Keywords: shunt capacitor, the reduction of peak power, energy reduction, discount rate, annual revenue, annual costs

1. UVOD

«Pisati danas o nekim elementarnim postavkama vezanih uz jalovu snagu i njene posljedice u elektroenergetskom sistemu izgleda u najmanju ruku suvišno jer na tom području nema revolucionarnih promjena. U našem konkretnom slučaju nije tako». To je citat jednog referata iz 1989 god. koji je aktualan i danas.

Zbog znanih posljedica koje uzrokuje protok jalove snage kroz elemente mreže vrijedi energetska pravilo da se ograniči, odnosno minimizira protok jalove snage između naponskih razina. Time se želi postići da se u regionalnim i lokalnim elektroenergetskim mrežama proizvodi potrebna jalova snaga. Ugradnja kondenzatorskih baterija na niskonaponsku stranu distributivnih transformatora snage SN/NN je jedan od način proizvodnje jalove snage u mrežama naponske razine 0,4 kV.

Dosadašnja praksa kompenzacije transformatora SN/NN, koja je počela 80-tih godina svodila se na ugradnju kondenzatorskih baterija snage od 5 do 7,5% nazivne snage transformatora. Kompenzirali su se svi transformatori počevši od 25 do 1000 kVA. Ekonomska opravdanost tih kompenzacija temeljila se na ondašnjem tarifnom sustavu. Neki stručni članci [5] upotrebljavali su općeniti ekonomski ekvivalent 'ek' koji je pokazivao da se smanjenjem jalove snage za 1 kVAr na naponu 0,4 kV godišnje smanje gubici radne energije u elektroenergetskom sustavu za 200 do 250 kWh. U današnjoj eri slobodnog tržišta električne energije, ne može se na takav način ekonomski valorizirati investiciju u kompenzaciju i potrebno je kritičnije pristupiti tom problemu.

Obzirom da je ODS po Zakonu o tržištu električne energije dužan na europskom tržištu nabavljati električnu energiju za pokriće gubitaka, potrebno je smanjenje gubitaka električne energije zbog ugradnje kompenzacije valorizirati sa cijenom tako nabavljene energije. Upravo je cijena gubitaka jedan od ključnih faktora optimizacijskog modela. Rezultati tehno-ekonomskog optimizacijskog modela pokazali su da je ekonomski isplativo kompenzirati samo transformatore većih snaga.

2. GUBICI SNAGE I ENERGIJE U TRANSFORMATORU SN/NN

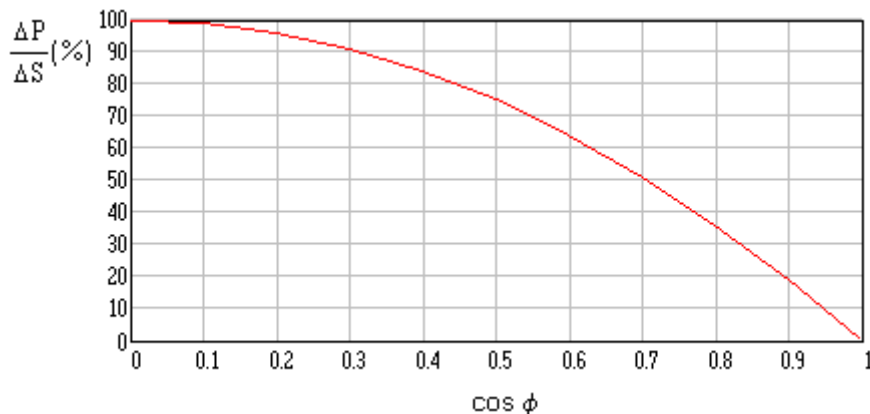
Svaki element elektroenergetske mreže, koji ima omski otpor R u svakoj fazi i po kojem se prenosi radna snaga P i jalova snaga Q ima džulske gubitke radne snage i energije. Ugradnjom kondenzatorske baterije snage Q_c na NN sabirnice transformatora, mijenjamo dijagram jalovog opterećenja dok vremenski dijagram radnog opterećenja ostaje nepromijenjen. Iz tog razloga kod proračuna gubitaka potrebno je poznavati samo veličinu jalovog opterećenja transformatora prije ugradnje baterije. Smanjenjem jalove komponente struje opterećenja smanjuju se i radni gubici snage i energije.

Gubitke radne snage zbog protoka jalove snage kroz transformator u odnosu na ukupne gubitke zbog prividnog opterećenja transformatora prikazuje nam relacija:

$$\frac{\Delta P}{\Delta S} = (1 - \cos^2 \varphi) \cdot 100 \quad (1)$$

gdje je:

- ΔP - gubici radne snage zbog jalovog opterećenja transformatora
- ΔS - ukupni gubici radne snage zbog prividnog opterećenja transformatora
- $\cos \varphi$ - faktor snage transformatora



Slika 1. Relativni gubici radne snage u ovisnosti o $\cos \varphi$

Iz slike 1. vidimo da nam za uobičajene faktore snage transformatora (0,9 - 0,95) koji napajaju pretežno domaćinstva i ostalu potrošnju (uredi, trgovine, razni lokali) gubici radne snage zbog jalovog opterećenja transformatora u odnosu na ukupne gubitke iznose od 10 do 20%. Zbog tako malog udjela jalovog opterećenja u ukupnim gubicima snage i energije potrebno je detaljnije analizirati tehno-ekonomsku opravdanost investicije u kompenzaciju jalove energije transformatora.

2.1. Smanjenje gubitaka radne snage i energije

Za izračun gubitaka snage i energije, dvonamotne transformatore modeliramo uzdužnom impedancijom. Radnu komponentu uzdužne impedancije prikazanu na slici 2. računamo iz podataka o gubicima kratkog spoja transformatora:

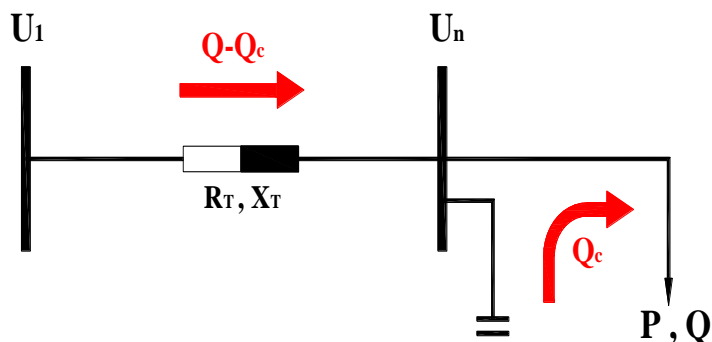
$$R_T = \frac{p_k \cdot U_n^2 \cdot 10^3}{S_N^2} \quad (2)$$

R_T - omski otpor uzdužne impedancije transformatora (Ω)

p_k - gubici kratkog spoja (kW)

U_n - nazivni napon sekundarne strane transformatora (kV)

S_N - nazivna snaga transformatora (kVA)



Slika 2. Nadomjesna shema transformatora za proračun gubitaka

Gubitak radne snage zbog prolaza prividne struje kroz jedan namotaj transformatora iznosi:

$$I^2 \cdot R_T = (I \cdot \cos(\varphi))^2 \cdot R_T + (I \cdot \sin(\varphi))^2 \cdot R_T \quad (2a)$$

Ugradnjom kondenzatorske baterije snage Q_C na NN sabirnice transformatora kao što je prikazano na slici 2. smanji se jalova komponenta struje kroz namotaje transformatora za iznos I_C (Q_C) dok radna komponenta ostaje nepromijenjena. Zbog smanjenja jalove komponente struje smanje se i gubici radne snage koji sada iznose:

$$I_1^2 \cdot R_T = (I \cdot \cos(\varphi))^2 \cdot R_T + (I \cdot \sin(\varphi) - I_C)^2 \cdot R_T \quad (3)$$

Vršno smanjenje gubitaka radne snage dobijemo razlikom gubitaka prije (2a) i nakon ugradnje kondenzatorske baterije (3):

$$\Delta P = (2 \cdot I \cdot \sin(\varphi) \cdot I_C - I_C^2) \cdot R_T \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

Uvrštenjem (2) u jednadžbu (4), te zamjenom struja sa trofaznim opterećenjem transformatora i snagom baterije dobijemo:

$$\Delta P = \frac{P_k}{S_N^2} \cdot (2 \cdot Q_{\max} \cdot Q_C - Q_C^2) \quad (5)$$

Godišnje smanjenje gubitaka radne energije dobijemo uvrštavanjem u (5) vrijeme « T » i uvođenjem faktora jalovog opterećenja « m », dobivenog iz uređenog godišnjeg dijagrama jalovog opterećenja transformatora.

$$\Delta W = \frac{p_k \cdot T}{S_N^2} \cdot (2 \cdot m \cdot Q_{\max} \cdot Q_c - Q_c^2) \quad (6)$$

Podijelimo li jednadžbu (6) sa optimalnom snagom ugrađene kondenzatorske baterije Q_c dobijemo ekonomski ekvivalent koji nam pokazuje koliko se smanje gubici radne energije u transformatoru kod smanjenja protoka jalove snage kroz uzdužnu impedanciju transformatora za 1 kVAr.

$$ek = \frac{p_k \cdot T}{S_N^2} \cdot (2 \cdot m \cdot Q_{\max} - Q_c) \quad (6a)$$

gdje je:

- ek - ekonomski ekvivalent (kWh/kVAr)
- ΔP - vršno smanjenje gubitaka radne snage (kW)
- ΔW - godišnje smanjenje gubitaka radne energije (kWh)
- I_c - nazivna struja kondenzatorske baterije (A)
- I - prividna struja opterećenja transformatora (A)
- I_1 - prividna struja opterećenja transformatora nakon ugradnje kondenzatorske baterije (A)
- Q_c - nazivna snaga kondenzatorske baterije (kVAr)
- Q_{\max} - najveće godišnje jalovo opterećenje transformatora (kVAr)
- m - faktor godišnjeg jalovog opterećenja
- T - vremenski period od jedne godine (8760 h)

Iz relacije (6) vidimo da na smanjenje gubitaka radne energije utječe pored zadanih parametara samo srednje godišnje jalovo opterećenje transformatora i snaga ugrađene kondenzatorske baterije. Gubici radne energije zbog protoka radne komponente struje ostaju nepromijenjeni obzirom da se vremenski dijagram radnog opterećenja ne mijenja ugradnjom baterije na NN sabirnice transformatora.

3. EKONOMSKA VALORIZACIJA INVESTICIJE, TROŠKOVA ODRŽAVANJA I ENERGETSKIH GUBITAKA

Za procjenu isplativosti investicije u kondenzatorsku bateriju, troškova održavanja i prihoda zbog smanjena gubitaka snage i energije, korištena je aktualizacijska metoda koja se najčešće koristi u elektroenergetici. Aktualizacijska metoda oslanja se na aktualizacijske stope pomoću kojih se vrednuje investicija, troškovi održavanja i prihodi u budućnosti tj. u vremenskom periodu do kraja radnog vijeka baterije.

3.1. Cijena investicije u godini ugradnje

Za određivanje cijene investicije kondenzatorske baterije u godini ugradnje koristimo linearnu funkciju:

$$c_b = b_0 + b \cdot Q_c \quad (7)$$

pri čemu su:

- c_b - cijena investicije u kondenzatorsku bateriju u godini ugradnje (kn)
- b_0 - fiksni trošak koji ne ovisi o snazi baterije (kn)
- b - specifična cijena baterije (kn/kVAr)
- Q_c - snaga ugrađene baterije (kVAr)

3.1.1. Troškovi koji ne ovise o snazi baterije

Trošak koji ne ovisi o snazi baterije je onaj trošak koji je potreban da se baterija priključi na niskonaponsku stranu transformatora. Zbog različitih izvedbi NN razvoda zračnih i gradskih trafostanica, različiti su i stalni troškovi b_0 koji ne ovise o snazi baterije. Proizvođači niskonaponskih razvodnih ormarića

koji se ugrađuju na zračne transformatorske stanice snage od 50 do 250 kVA, pored standardne opreme ugrađuju i elemente za priključak kondenzatorske baterije. Ukupni trošak po podacima proizvođača za priključak kondenzatorske baterije sa opremom (NV rastavljač s osiguračima veličine OO (160 A), vodičima za spajanje, stopice i osigurači) i radnom snagom za montažu i ispitivanje, iznosi:

$$b_{01} = 650 \text{ kn}$$

U gradske trafostanice sa transformatorima snage od 400 do 630 kVA obično se postavlja NN ploča sa rastavnom sklopkom u dovodu i 9+2 NN izlaza. NN ploča dimenzionirana je za strujno opterećenje od 1250 A. Cijena te ploče po obavljenoj javnoj nabavi iznosi 24.320,00 kn, tako da specifična cijena po jednom NN izlazu iznosi 2.432,00 kn. Obzirom da se za priključak baterije koristi jedan od dva NN izlaza od 160 A, tada je trošak priključka baterije jednak polovici specifične cijene i iznosi:

$$b_{02} = 1216 \text{ kn}$$

Za gradske trafostanice sa transformatorima snage od 1000 kVA postavlja se također NN ploča sa rastavnom sklopkom u dovodu i 9+2 NN izlaza ali dimenzionirana za strujno opterećenje od 1600 A. Cijena te ploče po obavljenoj javnoj nabavi iznosi 29.420,00 kn, tako da specifična cijena po jednom NN izlazu iznosi 2.942,00 kn. Po istom postupku trošak priključka baterije jednak je polovici specifične cijene i iznosi:

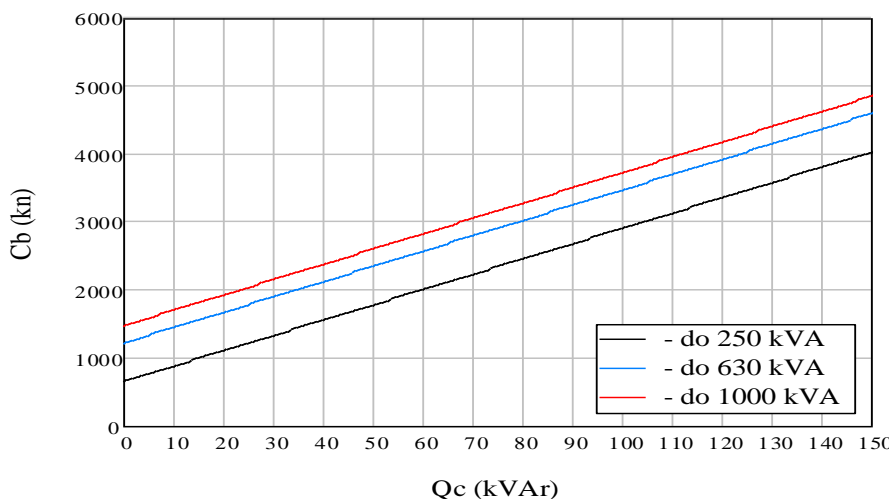
$$b_{03} = 1471 \text{ kn}$$

3.1.2. Troškovi koji ovise o snazi baterije

Specifični troškovi baterije ne ovise o tipovima NN razvoda u trafostanicama, već ovise samo o cijenama kondenzatora na tržištu. Hrvatski proizvođači NN ormarića i NN ploča većinom ugrađuju kondenzatore češke proizvodnje tipa CSDG 1- 0.4/xx čija je prosječna cijena između 3 i 4 EUR/kVAr. Za matematički model odabrali smo cijenu od 3 EUR/kVAr. Po tečaju od 7,5 HRK/EUR specifična cijena baterije iznosi:

$$b = 22,5 \text{ kn/kVAr}$$

Na slici 3. prikazane su krivulje troškova investicije u godini ugradnje kondenzatorskih baterija iz (7) za navedene trafostanice u ovisnosti o njihovoj snazi.



Slika 3. Troškovi kondenzatorske baterije u godini ugradnje

3.2. Godišnji troškovi kondenzatorske baterije

Novac za investiciju dobiven po tržišnim uvjetima uz određenu kamatnu stopu, potrebno je vratiti u 'n' godina. Niz jednakih periodičnih plaćanja do n-te godine nazivamo obični anuitet. Obični anuitet određujemo pomoću takozvanog koeficijenta investicije α koji nam pokazuje koliki dio cijene investicije u godini ugradnje, moramo svake godine prihodovati od smanjenja gubitaka energije kako bi do n-te godine isplatili bateriju. Godišnja cijena baterije izražena pomoću koeficijenta investicije α iznosi:

$$C_b = \alpha \cdot (b_0 + b \cdot Q_c) \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{K^n \cdot (K - 1)}{K^n - 1} \quad (8a)$$

$$K = (1 + p_a) \quad (8b)$$

Godišnja cijena baterije C_b zbog aktualizacijske stope iz godine u godinu raste. Buduća ili akumulirana vrijednost kondenzatorske baterije u n -toj godini iznosi:

$$C_{b,n} = \alpha \cdot (b_0 + b \cdot Q_c) \cdot \frac{K^n - 1}{K - 1} \quad (8c)$$

gdje je:

- $C_{b,n}$ - buduća ili akumulirana godišnja cijena baterije u n -toj godini (kn)
- C_b - godišnja cijena baterije (kn)
- α - koeficijent investicije
- p_a - aktualizacijska stopa (%)
- K - faktor rasta
- n - godina u kojoj računamo buduću vrijednost kondenzatorske baterije (god.)

Aktualizacijskom stopom valoriziramo buduću vrijednost investicije u periodu eksploatacije baterije. Aktualizacijska stopa je formalno jednaka kamatnoj stopi cijene kapitala na tržištu iako u energetici ima dublji smisao. Da bi utvrdili kako ona utječe na izbor optimalne snage baterije i period od 'n' godina u kojem smo isplatili investiciju, predvidjeti ćemo dva scenarija sa različitim aktualizacijskim stopama i to:

- a) $p_a = 4\%$
- b) $p_a = 8\%$

3.3. Godišnji troškovi održavanja baterije

Godišnji troškovi održavanja baterije koji se pojavljuju u svakoj godini, a nastaju zbog mjerenja struje opterećenja baterije, ocjene kapaciteta, vođenja tehničke dokumentacije i procijenjenih prosječnih troškova prijevoza iznose:

$$t_o = 200 \text{ kn/god.}$$

Troškovi održavanja u budućnosti povećavaju se svake godine za iznos stope inflacije. Godišnja inflacija predviđena je sa minimalnom stopom od 2%. Akumulirani godišnji troškovi održavanja baterije do n -te godine iznose:

$$T_o = t_o \cdot \frac{K_1^n - 1}{K_1 - 1} \quad (9)$$

$$K_1 = (1 + p_i) \quad (9a)$$

gdje je:

- T_o - akumulirani godišnji troškovi održavanja do n -te godine (kn)
- p_i - godišnja stopa inflacije (2%)
- K_1 - faktor rasta

3.4. Ukupni troškovi investicije i održavanja kondenzatorske baterije do n-te godine

Budući ukupni troškovi kondenzatorske baterije do n-te godine sastoje se od akumuliranih godišnjih troškova baterije $C_{b,n}$ i akumuliranih troškova održavanja T_o i iznose:

$$C_n = (b_0 + b \cdot Q_c) \cdot K^n + t_o \cdot \frac{K_1^n - 1}{K_1 - 1} \quad (10)$$

gdje je:

$$(b_0 + b \cdot Q_c) \cdot K^n = \alpha \cdot (b_0 + b \cdot Q_c) \cdot \frac{K^n - 1}{K - 1} \quad (10b)$$

3.5. Cijena gubitaka snage i energije

Izračun gubitaka snage i energije odnosno njihovo smanjenje zbog ugradnje temeljne kondenzatorske baterije na NN sabirnice transformatora je relativno lagan zadatak. Nešto teže je odrediti cijenu snage i energije za ekonomsku valorizaciju smanjenja gubitaka. Nerealnost u cijeni za smanjenje gubitaka snage i energije može dovesti do toga da se ulaganja u smanjenje gubitaka ne isplati.

U današnje doba slobodnog tržišta električne energije, ODS je po Zakonu o tržištu električne energije (čl.38) dužan na tržištu nabavljati električnu energiju za pokriće gubitaka u svojoj mreži.

U HEP-u se koristi jedinstvena cijena za valorizaciju gubitaka električne energije koja je usklađena sa Hrvatskom regulatornom agencijom i u 2012 god. iznosila je:

$$c = 0,44 \text{ kn/kWh}$$

U toj cijeni sadržani su gubici snage i energije koji približno odražavaju cijenu nabavne energije na tržištu od:

$$50 \text{ do } 60 \text{ EUR/MWh.}$$

3.6. Godišnji prihod od smanjenja gubitaka radne energije

Godišnji prihod od smanjenja gubitaka radne energije u transformatoru zbog ugradnje kondenzatorske baterije iznosi:

$$R = \Delta W \cdot c \quad (11)$$

gdje je:

- R - godišnji prihod zbog smanjenja gubitaka radne energije (kn)
- c - cijena gubitaka radne energije (kn/kWh)

Akumulirani godišnji prihod zbog smanjenja gubitaka radne energije do n-te godine iznosi:

$$R_n = c \cdot \Delta W \cdot \frac{K^n - 1}{K - 1} \quad (12)$$

4. OPTIMALNA SNAGA KONDENZATORSKE BATERIJE

Godišnji prihod zbog smanjenja radne energije definiran u (11) ovisi o smanjenju gubitaka radne energije (6) i cijeni gubitaka radne energije c i iznosi:

$$R(Q_c) = c \cdot \frac{p_k \cdot T}{S_N^2} \cdot (2 \cdot m \cdot Q_{\max} \cdot Q_c - Q_c^2) \quad (13)$$

Ukupni godišnji trošak baterije i njenog održavanja također ovisni o snazi ugrađene baterije Q_c i iznosi:

$$C_t(Q_c) = \alpha \cdot (b_0 + b \cdot Q_c) + t_o \quad (13a)$$

Optimalnu snagu kondenzatorske baterije dobijemo kada je granični prihod jednak graničnom trošku. Granični prihod i granični trošak su prve derivacije funkcija godišnjeg prihoda i godišnjeg troška.

$$\frac{\partial R(Q_c)}{\partial Q_c} = \frac{\partial C_t(Q_c)}{\partial Q_c} \quad (14)$$

Deriviranjem jednadžbe (14) i rješenjem po Q_c dobijemo optimalnu snagu kondenzatorske baterije:

$$2 \cdot c \cdot \frac{p_k \cdot T}{S_n^2} \cdot m \cdot Q_{\max} - 2 \cdot c \cdot \frac{p_k \cdot T}{S_n^2} \cdot Q_c = \alpha \cdot b$$

$$Q_c = m \cdot Q_{\max} - \frac{\alpha \cdot b \cdot S_n^2}{2 \cdot p_k \cdot c \cdot T} \quad (15)$$

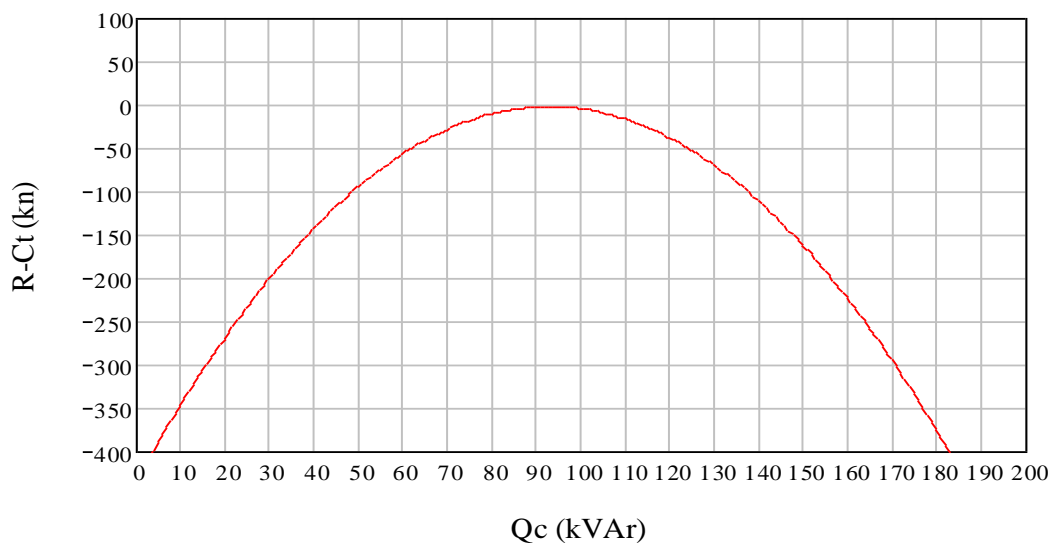
Prvi član u jednadžbi (15) nam daje «tehničku optimalnu snagu baterije» bez utjecaja ekonomskih faktora (α , b i c) i ona je jednaka srednjoj godišnjoj jalovoj snazi kojom je transformator opterećen. U drugom „ ekonomskom članu „ najveći težinski faktor ima cijena kojom valoriziramo gubitke. Niska cijena smanjuje optimalnu snagu baterije i pozitivne efekte kompenzacije a time po (13) i godišnji prihod. U krajnjem slučaju kada bi cijena bila jednaka:

$$c = \frac{\alpha \cdot b \cdot S_n^2}{m \cdot Q_{\max} \cdot 2 \cdot p_k \cdot T} \quad (16)$$

tada se nikakvo smanjenje gubitaka ne bi ekonomski isplatilo jer bi po (15) snaga baterije Q_c bila jednaka nuli. Ugradnjom baterije optimalne snage Q_c postigli smo da u svakoj godini do godine isplativosti, godišnji prihod pokriva godišnje troškove investicije i godišnje troškove održavanja što znači da mora biti zadovoljena jednadžba:

$$\Delta W(Q_c) \cdot c = \alpha \cdot (b_0 + b \cdot Q_c) + t_o \quad (17)$$

Desna strana jednadžba (17) predstavlja godišnji anuitet kojeg moramo svake godine prihodovati od smanjenja gubitaka radne energije uz ugradnju optimalne snage baterije Q_c , da bi do n-te godine isplatili investiciju u kompenzaciju.



Slika 4. Razlika godišnjeg prihoda i troška za transformator od 1000 kVA

Na slici 4. prikazana je funkcija razlike godišnjeg prihoda i godišnjeg troška iz (17) u ovisnosti o odabranoj snazi kondenzatorske baterije za transformator snage 1000 kVA. Iz dijagrama se vidi da samo uz optimalnu snagu odabrane baterije Q_C , godišnji prihod od smanjenja gubitaka radne energije do n-te godine isplativosti baterije pokriva godišnje troškove baterije i troškove održavanja. Za odstupanje od optimalne snage baterije razlika ima negativan predznak, što znači da nam je prihod manji od ukupnih godišnji troškova a time se zbog smanjenja godišnjeg prihoda produžuje vrijeme njezine otplate.

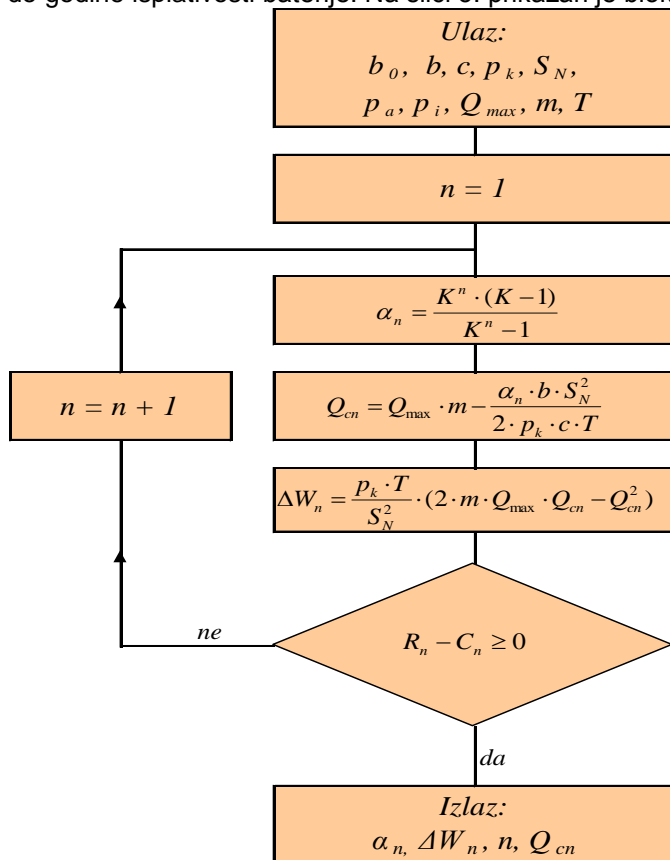
5. EKONOMSKA ISPLATIVOST UGRADNJE KONDENZATORSKE BATERIJE

5.1. Tehno-ekonomski matematički model

Za izračun optimalne snage kondenzatorske baterije, pored poznatih parametara (Q_{max} , m , p_k , c , S_N , b , b_o , T), potrebno je poznavati i koeficijent investicije α koji je ovisan o broju godina 'n' u kojim povratimo novac uloženi u investiciju baterije i pokrijemo troškove održavanja. Za izračun broja godina 'n', koristimo iteracijski postupak tako, da za svaku godinu od 1 do 'n' računamo α , optimalnu snagu baterije Q_C i smanjenje gubitaka radne energije ΔW dok nije ispunjena nejednadžba:

$$\Delta W \cdot c \cdot \frac{K^n - 1}{K - 1} - \left[(b_o + b \cdot Q_c) \cdot K^n + t_o \cdot \frac{K^n - 1}{K_1 - 1} \right] \geq 0 \quad (18)$$

U godini 'n' kada je ispunjen uvjet iz (18) tada je poznat koeficijent investicije α i optimalna snaga kondenzatorske baterije Q_C . U n-toj godini povrata investicije akumulirani prihod od smanjenja gubitaka radne energije jednak je akumuliranim troškovima investicije u kondenzatorsku bateriju i akumuliranim troškovima održavanja. Nejednadžba (18) nam također omogućava praćenje profita od početka ugradnje kompenzacije do godine isplativosti baterije. Na slici 5. prikazan je blok dijagram toka izračuna.



Slika 5. Dijagram toka izračuna

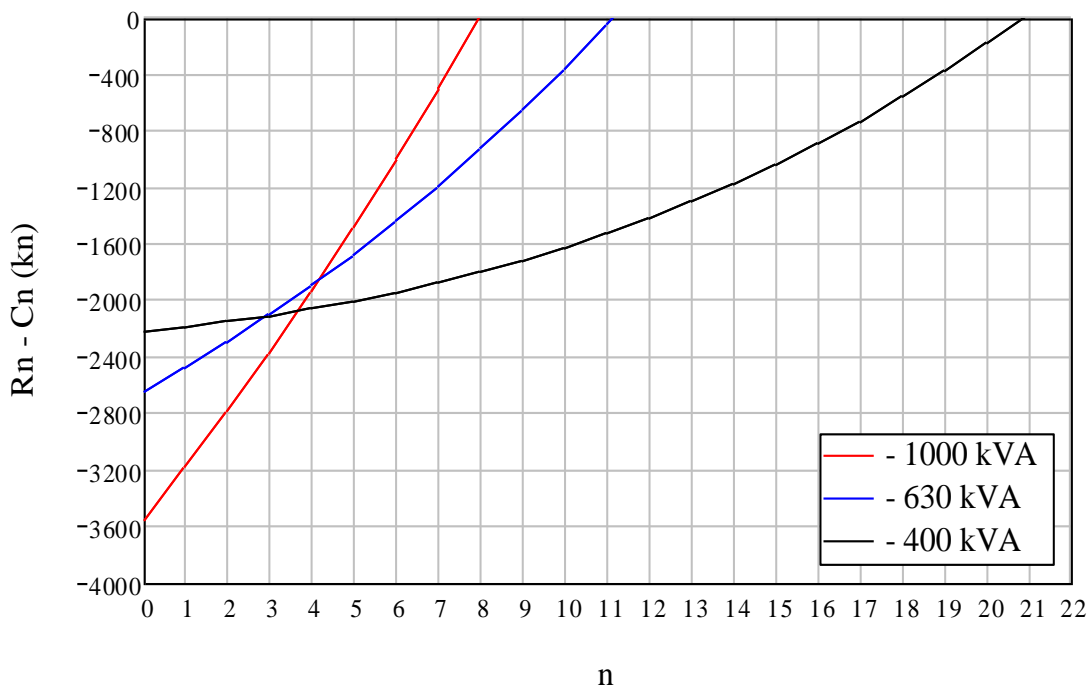
6. REZULTATI PRORAČUNA

Rezultati iteracijskog postupka su izračunate vrijednosti koeficijenta investicije α , vrijeme otplate svih troškova baterije 'n', smanjenje gubitaka radne energije ΔW i optimalna snaga kondenzatorske baterije Q_C i to zasebno za aktualizacijske stope od 4% i 8%. Električni parametri koji su korišteni u proračunu odabrani su:

- $Q_{\max} = 0,75 \cdot S_N \cdot \sin(\varphi)$; $\sin(\varphi) = 0,309$; za sve transformatore od 50 do 1000 kVA
- p_k - gubici kratkog spoja transformatora (Kaiserov elektrotehnički priručnik)
- m - za distributivna opterećenja kreće se u rasponu od 0,25 do 0,75. U proračunu je odabrana vrijednost od 0.55 koja je dobivena iz uređenog godišnjeg dijagrama jalove snage za gradsku trafostanicu snage 1000 kVA.
- $c, T, b_{01}, b_{02}, b_{03}, b, S_N$ - poznati parametri

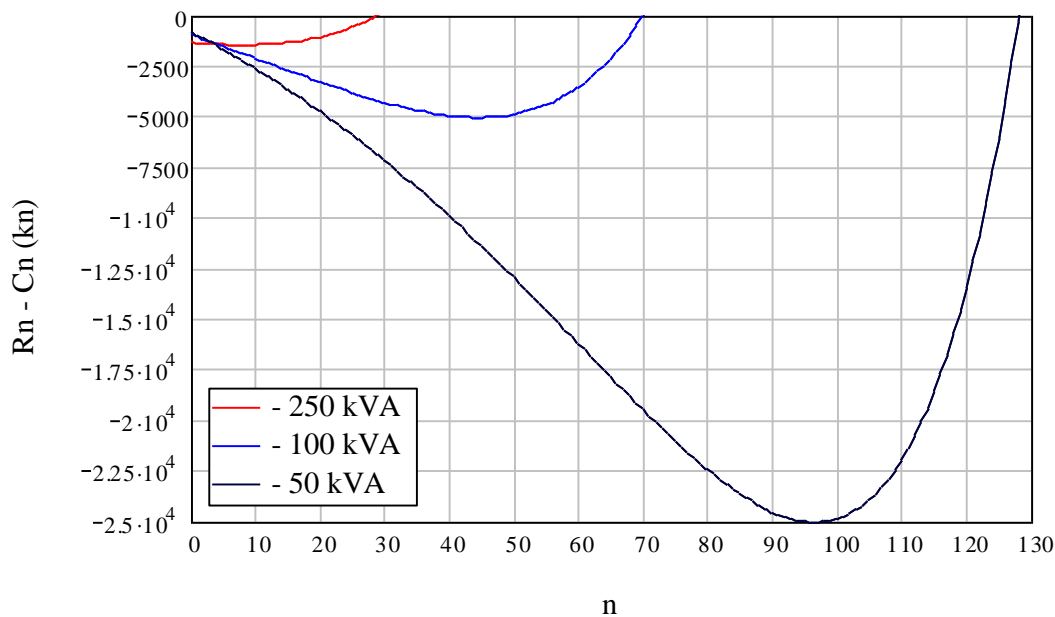
Nakon izračunate optimalne snage baterije i smanjenja gubitaka radne energije uz odabranu aktualizacijsku stopu, te uvrštenjem njihovih vrijednosti u (18), možemo prikazati krivulje godišnjih profita kao razliku akumuliranih prihoda i akumuliranih troškova kondenzatorske baterije do godine isplativosti 'n' za sve snage transformatora.

Krivulje na slici 6. nam prikazuju tako dobivene godišnje profite do godine isplativosti za gradske trafostanice sa transformatorima snage od 400, 630 i 1000 kVA. Do godine isplativosti profit je negativan, u godini isplativosti baterije ima vrijednost nula a nakon godine isplativosti poprima pozitivnu vrijednost. Iz krivulja se vidi da se u periodu radnog vijeka baterije od petnaest godina ekonomski isplati samo kompenzacija na transformatorima snage od 630 i 1000 kVA, dok nam investicija u kompenzaciju transformatora od 400 kVA nije ekonomski isplativa obzirom da bi se isplatila tek u 21 godini. Ekonomski najisplativija je kompenzacija transformatora od 1000 kVA



Slika 6. Krivulje profita za transformatore snage od 400, 630 i 1000 kVA

Krivulje na slici 7. nam prikazuju ostvarene godišnje profite za zračne trafostanice sa transformatorima snage od 50, 100 i 250 kVA. U periodu radnog vijeka baterije (15 god.) ekonomski su neisplative kompenzacije na tim transformatorima. Zbog malih prihoda od smanjena gubitaka radne energije rokovi isplativosti su daleko iznad radnog vijeka baterije (29, 70 i 128 god.).

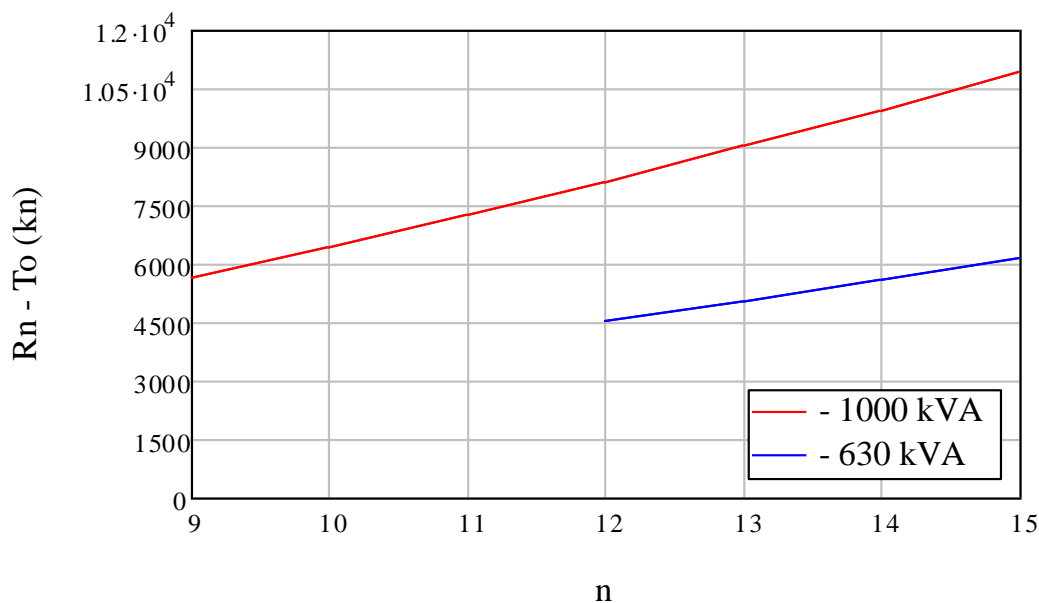


Slika 7. Krivulje profita za transformatore snage od 50,100 i 250 kVA

Nakon što smo isplatili investiciju za kompenzaciju transformatora od 630 i 1000 kVA profiti od godine isplativosti do kraja radnog vijeka baterije iznose:

$$R_n - T_o = \Delta W \cdot c \cdot \frac{K^n - 1}{K - 1} - t_o \cdot \frac{K_1^n - 1}{K_1 - 1} \quad (19)$$

Krivulje na slici 8. nam prikazuju kretanje profita za transformatore od 630 i 1000 kVA od godina isplativosti (8 i 11god.) do kraja radnog vijeka baterije.



Slika 8. Krivulje profita od godine isplativosti za transformatore snage od 630 i 1000 kVA

Rezultati proračuna za sve transformator snage od 50 do 1000 kVA prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Rezultati proračuna

S_N	$p_a = 4\%$					$p_a = 8\%$				
	n (god)	Q_c (kVAr)	ΔW (kWh)	$Q_c/S_N \cdot 100$ (%)	α	n (god)	Q_c (kVAr)	ΔW (kWh)	$Q_c/S_N \cdot 100$ (%)	α
50	128,0	6,0	142	12,00	0,040	-	-	-	-	-
100	70,0	12,0	276	12,00	0,043	41,0	11,0	274	11,0	0,084
250	29,0	28,9	507	11,60	0,059	22,0	26,9	500	10,8	0,098
400	21,0	44,6	728	11,20	0,071	22,0	42,2	718	10,6	0,098
630	11,0	63,8	1090	10,10	0,114	13,0	62,0	1079	9,8	0,127
1000	8,0	92,5	1632	9,25	0,149	9,0	90,0	1611	9,0	0,16

Analizom rezultata proračuna možemo zaključiti sljedeće:

- $S_n = 1000$ kVA: vrijeme povrata investicije za aktualizacijsku stopu od 4% je 8 godina. Profit na kraju radnog vijeka baterije iznosi 10.920 kn i tri puta je veći od cijene početne investicije. Za baznu kompenzaciju odabiremo tipsku snagu kondenzatorske baterije od 100 kVAr čija je vrijednost najbliža izračunatoj optimalnoj snazi. Ekonomski ekvivalent iznosi 16.3 kWh/kVAr. Aktualizacijska stopa od 8% produžuje vrijeme povrata investicije za 1 godinu ali bitno ne utječe na optimalnu snagu baterije
- $S_n = 630$ kVA: vrijeme povrata investicije za aktualizacijsku stopu od 4% je 11 god. Profit u 15-toj godini iznosi 6.149 kn i veći je za nešto više od dva puta od cijene početne investicije. Za baznu kompenzaciju odabiremo tipsku snagu kondenzatorske baterije od 70 kVAr čija je vrijednost najbliža izračunatoj optimalnoj snazi. Ekonomski ekvivalent iznosi 15.6 kWh/kVAr. Aktualizacijska stopa od 8% produžuje vrijeme povrata investicije za 2 godinu ali bitno ne utječe na optimalnu snagu baterije.
- $S_n = 400$ kVA: Temeljna kompenzacija tih transformatora se ekonomski ne isplati obzirom da je vrijeme povrata investicije 21 godinu što je znatno više od radnog vijeka baterije.
- $S_n = 50$ kVA ; $S_n = 100$ kVA ; $S_n = 250$ kVA: povrat investicije je daleko iznad radnog vijeka baterije (128, 70 i 29 god.) tako da je kompenzacija tih trafostanica sa gledišta smanjenja gubitaka radne energije i sadašnje cijene gubitaka ekonomski neisplativa.

7. ZAKLJUČAK

Iz literature [1] gubici u svim distributivnim transformatorima SN/NN u odnosu na ukupne gubitke u distributivnoj mreži ODS-a iznose 29%. Gubici u jezgri koji su neovisni o opterećenju iznose 26% a gubici u namotajima 6%. Zbog malog učešća gubitaka u namotajima transformatora u ukupnim gubicima u distributivnoj mreži potrebno je kompenzirati samo one transformatore kod kojih je smanjenje gubitaka radne energije zbog ugradnje kompenzacije najveće.

Uz ovu cijenu kojom se valoriziraju gubici radne energije te utvrđenih cijena kondenzatorskih baterija i troškova održavanja, ekonomski je isplativo kompenzirati samo transformatore snage od 630 i 1000 kVA.

Koristeći podatke iz [1] i [2] o broju transformatora snage od 630 i 1000 kVA, ukupnim gubicima od 8.19% i procijenjenih tehničkih gubitaka iz [1] od 5.5%, kompenzirajući sve transformatore od 630 i 1000 kVA optimalnom snagom baterije smanjili bi godišnje gubitke radne energije za 9.627.080 kWh. Uz cijenu gubitaka od 0.44 kn/kWh iznos godišnje ušteda iznosio bi 4.235.475 kn.

Studije [1] i [4] pokazuju da u distribucijskoj mreži ODS-a ima još prostora za smanjenje tehničkih gubitaka radne snage i energije.

Ovaj rad je prikazao jedan tehno-ekonomski način smanjenja tih gubitaka ugradnjom kondenzatorskih baterija optimalne snage na sekundar distributivnih transformatora SN/NN snage 630 i 1000 kVA.

8. LITERATURA

- [1] "Tehnički gubici u distribucijskim mrežama", Energetski institut "Hrvoje Požar" d.o.o., Zagreb, rujan 1999.
- [2] "Godišnje izvješće 2011", HEP ODS d.o.o OPERATOR DISTRIBUCIJSKOG SUSTAVA.
- [3] Prof.dr. Marijan Plaper dipl.ing., "Principi optimalnosti u mrežama za prenos i distribuciju električne energije", Elektroinštitut Milan Vidmar, Ljubljana 1980.
- [4] Ante Pavić dipl.ing., Mr.sc. Kruno Trupinić, "Gubici električne energije u distribucijskoj mreži", Energija, travanj 2007.
- [5] "Racionalno korištenje energije u svrhu zaštite čovjekove okoline", Zadar-Petrčane, 17 do 19 svibnja 1990. god.
- [6] Dragutin Kaiser, "Kaiserov elektrotehnički priručnik ", Tehnička knjiga Zagreb 1971