

KVANTITATIVNA ANALIZA REAKTIVNE SNAGE ZA NELINEARNA OPTEREĆENJA

Marko Dimitrijević, Miona Andrejević-Stošović, *Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet*
Vančo Litovski, *Klaster naprednih tehnologija Niš*

Sadržaj – U ovom radu će biti predstavljena kvantitativna analiza reaktivne snage izračunate prema alternativnim definicijama. Rezultati će biti analizirani na nelinearnim potrošačima, LED i CFL sijalicama. Merenja i izračunavanja vrednosti parametara su ostvarena primenom virtuelnog instrumenta za analizu nelinearnih potrošača.

1. UVOD

U linearnim kolima, sa sinusnim pobudama, prividna, aktivna i reaktivna snaga su povezane kvadratnom formulom $S^2 = P^2 + Q^2$. Ukoliko se u kolu nalaze nelinearna opterećenja, moraju se definisati nove veličine koje kvantitativno opisuju harmonijska izobličenja [1]. U tom slučaju, prividna snaga uključuje i treću komponentu – snagu izobličenja. Ova analiza je značajna prilikom analize i realizacije nelinearnih sistema napajanja, kao što su prekidački izvori napajanja (*switched-mode power supplies, SMPS*) [2].

Elektronske uređaje je važno analizirati sa stanovišta kvaliteta električne energije, imajući u vidu činjenicu da koriste prekidačke izvore napajanja. Njihova struja je složenoperiodičnog talasnog oblika, čime se stvaraju harmonijska izobličenja, pri čemu je napon približno prostoperiodičan [3]. Odnos struje i napona je nelinearan, pa se prema tome ovakvi potrošači karakterišu kao nelinearna opterećenja. Harmonici u elektroenergetskoj mreži negativno utiču na druge uređaje koji se napajaju iz istog izvora. Imajući u vidu veliki broj nelinearnih potrošača, i kumulativni efekat koji imaju na mrežu, problem postaje ozbiljan.

U literaturi postoji veliki broj definicija reaktivne snage za režime sa složenoperiodičnim strujama i naponima, kako bi se ocenili nelinearni potrošači i odredili parametri koji kvantitativno karakterišu njihovu nelinearnost. Kao opštiji pojam je uvedena neaktivna snaga. Sve definicije imaju određene prednosti i mane. Iako su sve definicije opšte, ne postoji opšte prihvaćena definicija.

Ideja kvantitativne analize reaktivne snage i dekompozicije snage je prisutna u literaturi [4]. U [4] su metodom simulacije analizirane reaktivne snage prema Budeanu-ovoj, Fryze-ovoj, Kimbark-ovoj, Shepherd i Zakikhani-jevoj, Sharon-ovoj, Depenbrock-ovoj, Kusters i Moore-ovoj, and Czarnecki-jevoj definicijii.

U ovom radu će biti analizirane različite definicije reaktivne snage merene na malim potrošačima, kao što su CFL i LED lampe.

2. DEFINICIJE REAKTIVNE SNAGE

Definicija reaktivne snage u nelinearnim električnim kolima sa složenoperiodičnim režimom je kompleksniji zadatak [5]. Viši harmonici doprinose povećanju efektivnih vrednosti struje i napona, što dovodi do povećanja prividne snage. U ovakvom režimu, jednačina $S^2 = P^2 + Q^2$ ne važi, te

se kao opštiji pojam uvodi neaktivna snaga N , koja obuhvata sve oblike neaktivne snage potrošača:

$$S = \sqrt{P^2 + N^2}. \quad (1)$$

Neaktivna snaga se dalje može razložiti na reaktivnu snagu i snagu izobličenja. Reaktivna snage u nelinearnim kolima se odnosi na reaktivne elemente. Ukoliko nije poznata struktura opterećenja, reaktivna snaga opterećenja se može odrediti na osnovu reaktivnog linearnog ekvivalenta opterećenja. Snaga izobličenja se odnosi na uticaj viših harmonika struje ili napona. Postoji veliki broj definicija reaktivne snage u nelinearnim i nestacionarnim kolima. Sve definicije imaju za cilj da budu generalne i praktične za primenu, ali ne postoji opšteprihvaćena definicija za reaktivnu snagu.

Definicije reaktivne snage se mogu podeliti u dve grupe, definicije u frekvencijskom i definicije u vremenskom domenu. Neke od teorija su postulirane u cilju kompenzacije neaktivne snage, pružajući praktične rezultate koji se mogu primeniti pri projektovanju sistema za kompenzaciju. Druge su usmerene ka fizičkoj interpretaciji prenosa energije u električnom kolu i uglavnom imaju teorijsku primenu [6].

2.1. Budeanu-ova definicija reaktivne i snage izobličenja

Najčešće korištena definicija za reaktivnu snagu pri složenoperiodičnim talasnim oblicima signala je Budeanu-ova definicija [7]. Budeanu-ova definicija spada u dekompozicije u frekvencijskom domenu.

Prividna snaga se sastoji od dve ortogonalne komponente, aktivne i neaktivne snage, jednačina (1). Aktivna snaga predstavlja srednju vrednost trenutne snage. Neaktivna snaga, podeljena na dve ortogonalne komponente, reaktivnu snagu i snagu izobličenja. Reaktivna snaga predstavlja sumu reaktivnih snaga svih harmonika:

$$Q_b = \sum_{k=1}^{+\infty} I_{k,RMS} \cdot V_{k,RMS} \cdot \sin(\theta_k - \psi_k). \quad (2)$$

Snaga izobličenja predstavlja sumu proizvoda različitih harmonika napona i struje [35]

$$D_b^2 = \sum_{j=1}^{+\infty} \sum_{k=j+1}^{+\infty} I_{j,RMS}^2 V_{k,RMS}^2 + I_{k,RMS}^2 V_{j,RMS}^2 - 2I_{j,RMS} V_{k,RMS} I_{k,RMS} V_{j,RMS} \cos(\varphi_j - \varphi_k) \quad (3)$$

gde φ_j predstavlja faznu razliku napona i struje j -tog harmonika, i može se izraziti kao:

$$D_b = \sqrt{U^2 - P^2 - Q_b^2}. \quad (4)$$

Reaktivna snaga, definisana na ovakav način, može biti potpuno kompenzovana odgovarajućim reaktivnim elementom. Snaga izobličenja se, međutim, ne može kompenzovati na ovaj način.

IEEE definicija je izvedena iz Budeanu-ove definicije, i data je izrazom:

$$Q_{\text{IEEE}} = \sqrt{\sum_{k=1}^{+\infty} I_{k,\text{RMS}} \cdot V_{k,\text{RMS}} \cdot \sin(\theta_k - \psi_k)} \quad (5)$$

2.2. Fryze-ova dekompozicija snage

Za razliku od Budeanu-ove definicije koja zahteva određivanje komponenti spektra napona i struje, Fryze-ova definicija je bazirana na ortogonalnoj dekompoziciji struje u vremenskom domenu [8]. Ortogonalna dekompozicija trenutne struje $i(t)$ na $M \geq 2$ ortogonalnih komponenti $i_1(t), i_2(t), \dots, i_M(t)$ mora zadovoljiti uslov:

$$\|i(t)\|^2 = \sum_{m=1}^M \|i_m(t)\|^2. \quad (6)$$

Struja je razložena na dve ortogonalne komponente: aktivnu i reaktivnu struju. Aktivna struja je

$$i_a(t) = \frac{P}{V_{\text{RMS}}^2} v(t) \quad (7)$$

a reaktivna

$$i_r(t) = i(t) - i_a(t). \quad (8)$$

Fryze-ova aktivna i reaktivna snaga su

$$P = V_{\text{RMS}} \cdot \|i_a(t)\| \quad (9)$$

$$Q_f = V_{\text{RMS}} \cdot \|i_r(t)\| \quad (10)$$

Aktivna snaga prema Fryze-ovoj dekompoziciji jednaka je srednjoj vrednosti trenutne snage, a reaktivna snaga odgovara prethodno definisanoj neaktivnoj snazi.

Prednosti Fryze-ove definicije su jednostavno merenje i izračunavanje, bez potrebe za određivanjem amplituda i faza harmonika. Osnovni nedostatak je nemogućnost kompenzacije reaktivne komponente reaktivnim elementom.

2.3. Kimbark-ova dekompozicija snage

Kimbark-ova dekompozicija snage [9] je slična Budeanu-ovoj. Aktivna snaga je definisana na identičan način, kao srednja vrednost trenutne snage. Neaktivna snaga se prema ovoj dekompoziciji sastoji od dve komponente, reaktivne snage i snage izobličenja. Reaktivna snaga uzima u obzir samo osnovni harmonik:

$$Q_k = I_{1,\text{RMS}} \cdot V_{1,\text{RMS}} \cdot \sin(\theta_1 - \psi_1) \quad (11)$$

pri čemu snaga izobličenja uzima u obzir reaktivne snage viših harmonika, kao i međuproizvode različitih harmonika struje i napona:

$$D_k = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_k^2}. \quad (12)$$

Reaktivna snaga definisana prema navedenoj dekompoziciji jasno karakteriše impedansu opterećenja.

2.4. Shepard-Zakikhani-jeva dekompozicija snage

Shepard-Zakikhani-jeva dekompozicija snage [10] se bazira na dekompoziciji struje na tri komponente: aktivnu, reaktivnu i struju izobličenja:

$$I_a = \sqrt{\sum_{k \in \text{I} \cap \text{V}} I_{k,\text{RMS}} \cdot \cos^2(\theta_k - \psi_k)} \quad (13)$$

$$I_r = \sqrt{\sum_{k \in \text{I} \cap \text{V}} I_{k,\text{RMS}} \cdot \sin^2(\theta_k - \psi_k)} \quad (14)$$

$$I_d = \sqrt{I_{\text{RMS}}^2 - I_a^2 - I_r^2} \quad (15)$$

pri čemu se sumiranje po indeksu k vrši samo za harmonike koji istovremeno postoje u spektrima napona i struje. Prividna snaga je razložena na tri komponente, prividnu aktivnu snagu:

$$S_a = \sqrt{\sum_{k \in \text{I} \cup \text{V}} V_{k,\text{RMS}}^2 \cdot I_a^2} \quad (16)$$

prividnu reaktivnu snagu:

$$S_r = \sqrt{\sum_{k \in \text{I} \cup \text{V}} V_{k,\text{RMS}}^2 \cdot I_r^2} \quad (17)$$

i prividnu snagu izobličenja

$$S_d = \sqrt{\sum_{k \in \text{I} \cap \text{V}} V_{k,\text{RMS}}^2 \cdot \left(\sum_{k \in \text{I} \cap \text{V}} I_{k,\text{RMS}}^2 + \sum_{k \in \text{I} \cup \text{V}} I_{k,\text{RMS}}^2 \right)} \quad (18)$$

Sumiranje se vrši po indeksu k , pri čemu I i V predstavljaju skupove indeksa koji odgovaraju redu harmonika u spektru struje, odnosno napona. Kvadrat prividne snage je jednaka sumi kvadrata

$$S^2 = S_a^2 + S_r^2 + S_d^2. \quad (19)$$

Shepard-Zakikhani-jeva dekompozicija omogućava određivanje optimalne kompenzacione kapacitivnosti, kojom se potpuno kompenzuje reaktivna snaga S_r . Ovom definicijom se postiže minimalna prividna snaga pri pasivnoj kompenzaciji. Nedostaci dekompozicije su komplikovan algoritam za izračunavanje, koji zahteva određivanje spektralnih komponenti napona i struje, kao i činjenica da prividna aktivna snaga nije jednaka aktivnoj, tako da se njenom primenom ne može odrediti faktor snage. Pored toga, ovom dekompozicijom nije moguće direktno odrediti snagu kondenzatora za kompenzaciju.

2.5. Sharon-ova dekompozicija snage

Sharon-ova dekompozicija snage predstavlja modifikaciju Shepard-Zakikhani-jeve dekompozicije [11]. Prividna aktivna snaga je zamenjena aktivnom snagom, tako da je

$$S^2 = P^2 + S_q^2 + S_c^2. \quad (20)$$

pri čemu S_q predstavlja reaktivnu prividnu snagu, koja se izračunava prema

$$S_q = V_{\text{RMS}} \cdot \sqrt{\sum_{k \in \text{I} \cap \text{V}} I_{k,\text{RMS}}^2 \cdot \sin^2(\theta_k - \psi_k)} \quad (21)$$

a S_c komplementarnu reaktivnu snagu, koja se može izračunati prema

$$S_c = \sqrt{S^2 - P^2 - S_q^2}. \quad (22)$$

Sharon-ova definicija omogućava određivanje optimalne kapacitivnosti za kompenzaciju i izračunavanje faktora snage, ali ne rešava problem nemogućnosti direktnog određivanja snage kondenzatora za kompenzaciju.

2.6 Kusters-Moor-ova dekompozicija snage

Kusters-Moor-ova dekompozicija omogućava kompenzaciju reaktivne snage povezivanjem odgovarajućih kapacitivnosti ili induktivnosti [12]. Struja je predstavljena kao zbir tri komponente: aktivne struje, kapacitivne ili induktivne reaktivne struje i rezidualne struje.

Aktivna struja definisana je na isti način kao u Fryze-ovoj dekompoziciji, jednačinom (7), pri čemu su reaktivna kapacitivna i induktivna struja date sa

$$i_{qC}(t) = \frac{v_C(t)}{\|v_C(t)\|^2} \cdot \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} v_C(t) \cdot i(t) dt$$

$$i_{qL}(t) = \frac{v_L(t)}{\|v_L(t)\|^2} \cdot \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} v_L(t) \cdot i(t) dt.$$
(23)

Odgovarajuće rezidualne struje su:

$$i_{rC}(t) = i(t) - i_a(t) - i_{qC}(t)$$

$$i_{rL}(t) = i(t) - i_a(t) - i_{qL}(t)$$
(24)

gde $v_C(t)$ predstavlja prvi izvod, $v_L(t)$ integral trenutne vrednosti napona u vremenu.

Dekompozicija snage je oblika

$$S^2 = P^2 + Q_C^2 + Q_{rC}^2$$

$$S^2 = P^2 + Q_L^2 + Q_{rL}^2$$
(25)

gde su

$$Q_C = V_{RMS} \cdot \|i_{qC}(t)\|$$

$$Q_L = V_{RMS} \cdot \|i_{qL}(t)\|$$
(26)

kapacitivna i induktivna reaktivna snaga i

$$Q_{rC} = V_{RMS} \cdot \|i_{rC}(t)\|$$

$$Q_{rL} = V_{RMS} \cdot \|i_{rL}(t)\|$$
(27)

odgovarajuće rezidualne snage. Izbor reaktivne i odgovarajuće rezidualne snage u dekompoziciji (25) zavisi od strukture opterećenja. Kapacitivna i induktivna reaktivna snaga se u frekvencijskom domenu mogu izraziti formulama

$$Q_C = V_{RMS} \cdot \frac{\sum_{k=1}^{+\infty} k \cdot V_{k,RMS} \cdot I_{k,RMS} \cdot \sin(\theta_k - \psi_k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{+\infty} k^2 \cdot V_{k,RMS}^2}}$$
(28)

i

$$Q_L = V_{RMS} \cdot \frac{\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k} \cdot V_{k,RMS} \cdot I_{k,RMS} \cdot \sin(\theta_k - \psi_k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{V_{k,RMS}^2}{k^2}}}$$
(29)

Kusters-Moor-ova dekompozicija predstavlja modifikaciju Fryze-ove dekompozicije u vremenskom domenu. Aktivna struja je definisana na identičan način, pri čemu reaktivna struja u Fryze-ovoj dekompoziciji odgovara zbiru kapacitivne, odnosno induktivne reaktivne i odgovarajuće rezidualne struje. Fryze-ova reaktivna snaga je razložena na dve ortogonalne komponente, reaktivnu i rezidualnu snagu.

3. VIRTUELNI INSTRUMENT ZA ANALIZU NELINEARNIH POTROŠAČA

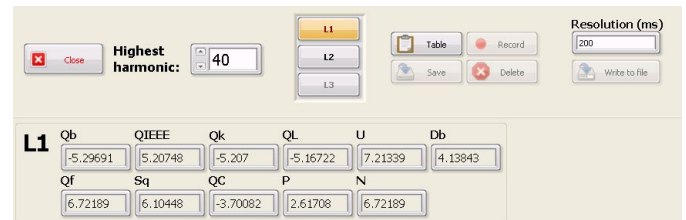
Merenja električnih signala i izračunavanje reaktivne snage prema opisanim definicijama sprovodi sistem sačinjen od akvizicionih modula i virtuelnog instrumenta.

Akviziciju i kondicioniranje napona i struje vrši sistem za akviziciju. Sistem je povezan sa električnom mrežom i potrošačem čije se karakteristike određuju. Sistem se sastoji od National Instruments cDAQ-9714 kućišta [13] sa NI9225 [14] i NI9227 [15] modulima, povezanog sa personalnim računarom putem USB interfejsa.

Virtuelni instrument za numeričko prezentovanje reaktivne snage [16] izračunate prema alternativnim definicijama izračunava vrednosti na osnovu trenutnih vrednosti signala. Izvršavanje aplikacije je realizovano kroz tri paralelna procesa.

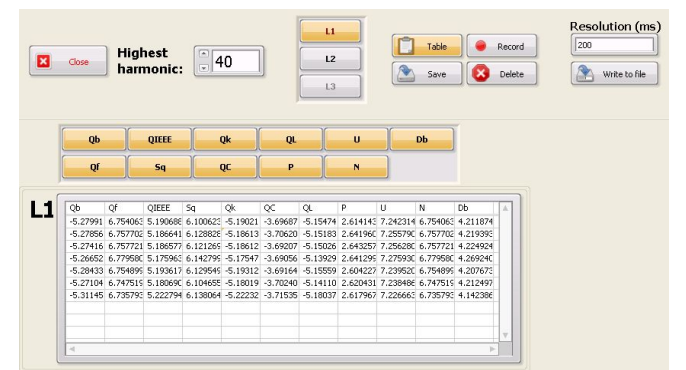
Funkcije primarnog procesa su prihvatanje podataka – trenutnih vrednosti signala, izračunavanje parametara i njihovo prikazivanje u numeričkom obliku ili tabelarno. Za svaku fazu se izračunavaju vrednosti reaktivne snage na osnovu alternativnih definicija: Budeanu-ove (QB na slici, odeljak 2.1), Fryze-ove (Qf, 2.2), IEEE (QIEEE), Sharon-ove (Sq, 2.5), Kimbark-ove (Qk, 2.3) i Kusters-Moor-ove (Qc i Ql, 2.6) definicije. Izračunavaju se i snaga izobličenja na osnovu Budeanu-ove definicije (Db), aktivna, neaktivna i prividna snaga.

Željeni parametri i faze sistema se biraju kontrolom na panelu aplikacije (slika 1). Na panelu se nalaze i kontrole za biranje reda najvišeg harmonika koji se uzima u proračun, kontrola za izbor načina prikazivanja dobijenih podataka i njihovo neprekidno snimanje.



Sl. 1 Panel aplikacije za izračunavanje reaktivne snage prema alternativnim definicijama

Aplikacija ima dva moda prikazivanja podataka. U kontinualnom modu podaci se prikazuju na numeričkim indikatorima (slika 1). U tabelarnom modu se podaci prikazuju u tabeli (slika 2), pri čemu se željene vrednosti upisuju manualno, aktiviranjem odgovarajuće kontrole na panelu. Vrednosti unete u tabelu se mogu radi dalje obrade.

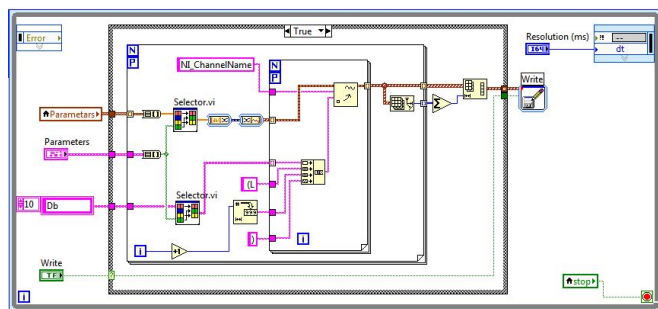


Sl. 2 Tabelarno prikazivanje vrednosti reaktivne snage

Funkcija drugog procesa je upravljanje događajima aplikacije.

Treći proces služi za kontinualno snimanje podataka dobijenih izračunavanjima u osnovnom procesu. Vremenski interval upisa zadaje kontrolom na panelu aplikacije.

Veličine parametara dobijenih izračunavanjima se smeštaju na lokalni hard-disk sistema, u obliku fajla koji se može analizirati nakon okončanog procesa merenja. Format snimljenih podataka može biti tekstualni (LVM format), binarni (TDMS format) ili XML. Proces u kome se vrši procesiranje izračunatih veličina i njihovo snimanje prikazan je na slici 3.



Sl. 3 Proces za snimanje izračunatih parametara

4. REZULTATI MERENJA

U tabeli 1 i 2 su prikazani rezultati merenja reaktivne snage, prema alternativnim definicijama. Merenja su sprovedena na CFL i LED sijalicama, nominalne snage 3 W

Tabela 1 Reaktivna snaga CFL sijalica

| merenje. | Tip | Snaga | P (W) | S (VA) | N (VAR) | Q _b (VAR) | D _b (VAR) | Q _f (VAR) | Q _{IEEE} (VAR) | S _q (VAR) | Q _k (VAR) | Q _C (VAR) | Q _L (VAR) |
|----------|--------------|-------|-------|--------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | CFL Rod | 15 | 11.56 | 17.84 | 13.58 | -6.16 | 12.10 | 13.58 | 6.16 | 10.24 | -6.16 | -4.43 | -6.11 |
| 2 | CFL bulb E27 | 20 | 17.14 | 27.72 | 21.78 | -8.43 | 20.08 | 21.78 | 8.43 | 14.48 | -8.43 | -6.46 | -8.37 |
| 3 | CFL tube E27 | 20 | 16.77 | 28.46 | 23.00 | -8.44 | 21.39 | 23.00 | 8.45 | 14.55 | -8.45 | -6.07 | -8.39 |
| 4 | CFL bulb E27 | 15 | 11.59 | 18.91 | 14.94 | -5.31 | 13.97 | 14.94 | 5.32 | 9.22 | -5.32 | -4.00 | -5.28 |
| 5 | Inc E27 | 100 | 86.77 | 86.78 | 0.80 | -0.50 | 0.63 | 0.80 | 0.50 | 0.56 | -0.50 | -0.36 | -0.49 |
| 6 | CFL spot E14 | 7 | 5.87 | 9.32 | 7.25 | -2.83 | 6.67 | 7.25 | 2.81 | 4.23 | -2.81 | -2.17 | -2.80 |
| 7 | CFL bulb E27 | 7 | 6.16 | 9.86 | 7.71 | -2.64 | 7.24 | 7.71 | 2.65 | 4.83 | -2.65 | -2.03 | -2.63 |
| 8 | CFL bulb E14 | 9 | 6.46 | 10.78 | 8.63 | -2.72 | 8.19 | 8.63 | 2.72 | 5.45 | -2.72 | -2.08 | -2.70 |
| 9 | CFL tube E14 | 11 | 9.89 | 16.11 | 12.72 | -4.71 | 11.82 | 12.72 | 4.69 | 7.89 | -4.69 | -3.61 | -4.66 |
| 10 | CFL tube E27 | 18 | 17.10 | 28.86 | 23.24 | -8.73 | 21.54 | 23.24 | 8.75 | 13.27 | -8.75 | -6.64 | -8.68 |
| 11 | CFL tube E27 | 11 | 10.63 | 17.67 | 14.12 | -5.83 | 12.85 | 14.12 | 5.83 | 8.85 | -5.83 | -4.41 | -5.79 |
| 12 | CFL h. E27 | 11 | 9.58 | 16.27 | 13.16 | -4.93 | 12.20 | 13.16 | 4.95 | 8.75 | -4.95 | -3.68 | -4.90 |
| 13 | Inc E14 | 60 | 55.06 | 55.06 | 0.61 | -0.37 | 0.49 | 0.61 | 0.37 | 0.37 | -0.37 | -0.27 | -0.37 |
| 14 | CFL h. E27 | 18 | 17.21 | 28.87 | 23.18 | -8.82 | 21.43 | 23.18 | 8.83 | 15.55 | -8.82 | -6.77 | -8.76 |
| 15 | CFL h. E27 | 20 | 18.41 | 30.68 | 24.54 | -9.95 | 22.43 | 24.54 | 9.93 | 16.14 | -9.93 | -7.56 | -9.86 |
| 16 | CFL tube E27 | 15 | 12.66 | 21.97 | 17.95 | -6.32 | 16.80 | 17.95 | 6.33 | 11.63 | -6.33 | -4.80 | -6.28 |

– 15 W, i dve inkandescentne sijalice kao referentne (60 W i 100 W).

Tabela 1 prikazuje vrednosti dobijene za CFL i inkandescentne sijalice. Tabela 2 prikazuje vrednosti dobijene merenjem LED sijalica. Prikazane su sledeće veličine: aktivna snaga (P), prividna snaga (S), neaktivna snaga (N), Budeanu-ova reaktivna snaga (Q_b), Budeanu-ova snaga izobličenja (D_b), Fryze-ova reaktivna snaga (Q_f), IEEE predložena definicija reaktivne snage (Q_{IEEE}), Shanon-ova prividna snaga (S_q), Kimbark-ova reaktivna snaga (Q_k), Kusters-Moore-ova kapacitivna (Q_C) i induktivna (Q_L) reaktivna snaga.

5. ZAKLJUČAK

Upoređenjem Budeanu-ove reaktivne i snage izobličenja, može se zaključiti da su CFL i LED sijalice nelinearna opterećenja ($D_b > Q_b$). Reaktivna snaga izračunata prema Fryze-ovoj definiciji, (10) jednaka je neaktivnoj snazi,

$$N = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Kimbark-ova definicija reaktivne snage (11), koja u proračun uzima samo osnovni harmonik daje približno $\pm 3\%$ odstupanja od Budeanu-ove definicije (Q_b). Ovo ukazuje na činjenicu da je doprinos viših harmonika ukupnoj reaktivnoj snazi manji od 3%.

IEEE predložena definicija (5) daje veće vrednosti od Kimbark-ove definicije, koja uračunava samo fundamentalni harmonik.

Tabela 2 Reaktivna snaga LED sijalica

| merenje: | tip | Snaga | P (W) | S (VA) | N (VAR) | Qb (VAR) | Db (VAR) | Qf (VAR) | QIEE (VAR) | Sq (VAR) | Qk (VAR) | QC (VAR) | QL (VAR) |
|----------|------------------|-------|-------|--------|---------|----------|----------|----------|------------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | Spot White E27 | 15 | 16.92 | 34.24 | 29.77 | -3.88 | 29.52 | 29.77 | 4.14 | 20.01 | -4.13 | -1.98 | -4.06 |
| 2 | Spot White E27 | 10 | 13.23 | 26.33 | 22.76 | -2.97 | 22.56 | 22.76 | 3.17 | 15.45 | -3.17 | -1.51 | -3.12 |
| 3 | Bulb W White E27 | 8 | 10.00 | 19.53 | 16.77 | -2.81 | 16.54 | 16.77 | 2.94 | 11.52 | -2.93 | -1.74 | -2.89 |
| 4 | Bulb W White E27 | 6 | 8.51 | 9.45 | 4.11 | 0.08 | 4.11 | 4.11 | 0.07 | 3.29 | 0.07 | 0.08 | 0.07 |
| 5 | Bulb White E27 | 6 | 8.69 | 9.58 | 4.04 | 0.09 | 4.04 | 4.04 | 0.08 | 3.28 | 0.08 | 0.08 | 0.08 |
| 6 | Bulb White E27 | 3 | 4.07 | 7.70 | 6.54 | -0.84 | 6.48 | 6.54 | 0.90 | 4.35 | -0.90 | -0.45 | -0.88 |
| 7 | RGB Change E27 | 3 | 1.92 | 3.17 | 2.52 | 0.01 | 2.52 | 2.52 | 0.01 | 1.39 | 0.00 | 0.05 | 0.00 |
| 8 | Spot White E14 | 3 | 4.00 | 8.05 | 6.99 | -0.98 | 6.92 | 6.99 | 1.04 | 4.86 | -1.04 | -0.52 | -1.02 |

6. ZAHVALNOST

Rezultati prikazani u ovom radu ostvareni su u okviru projekta TR 32004 čiju realizaciju finansira Ministarstvo nauke Republike Srbije.

7. LITERATURA

- [1] H. W. Beaty, D. G. Fink, *Standard handbook for electrical engineers* (McGraw-Hill, New York, 2007).
- [2] John G. Webster, *The Measurement Instrumentation and Sensors Handbook* (CRC Press, 1999).
- [3] T. H. Tumiran, M. Dultudes, The Effect Of Harmonic Distortion To Power Factor, *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, 2007, pp. 834–837 Institute Teknologi Bandung, Indonesia
- [4] M. Erhan Balci, M. Hakan Hocaoglu, “Quantitative comparison of power decompositions,” *Electric Power Systems Research* 78 (2008) 318–329
- [5] Emanuel, A. E., *Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow*. J. Wiley and Sons, 2010. ISBN 978-0-470-66074-4.
- [6] Balci, M. E., Hocaoglu, M. H.: “Quantitative comparison of power decompositions.” *Electric Power Systems Research*, 2008, No. 78, pp. 318-329.
- [7] Budeanu C. I.: “Reactive and Fictitious Powers.” *Rumanian National Institute*, 1927, No. 2.
- [8] Fryze, S. i drugi: “Elektrischen Stromkreisen Mit Nichtsinusoidalformigem Verlauf von Strom und Spannung.” *Elektrotechnische Zeitschriji*, 1932, No. 53, Vol. 25, pp. 596-599.
- [9] Kimbark, E. W.: *Direct Current Transmission*. J. Wiley and Sons, 1971.
- [10] Shepard, W., Zakikhani, P.: “Power Factor Correction in Nonsinusoidal Systems by the Use of Capacitance.” *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1973, No. 6, pp. 1850–1861.
- [11] Sharon, D.: “Reactive Power Definition and Power-factor Improvement in Nonlinear Systems.” 1973. *Proc. of InsVol. Electric Engineers*. Vol. 120, pp. 704-706.
- [12] Kusters, N. L., Moore, W. J. M.: “On the Definition of Reactive Power Under Nonsinusoidal Conditions.” *IEEE Trans. Power Apparatus Systems*, 1980, No. 99, Vol. 5, pp. 1845-1854.
- [13] National instruments cDAQ-9714 Product Data Sheet, National Instruments, <http://ni.com>
- [14] National instruments NI-9225 Product Data Sheet, National Instruments, <http://ni.com>
- [15] National instruments NI-9227 Product Data Sheet, National Instruments, <http://ni.com>
- [16] M. Dimitrijević, *Elektronski sistem za analizu polifaznih sistema baziran na FPGA*, doktorska disertacija, 2012., Niš

Abstract – In this paper we will present quantitative analysis of reactive power calculated by various definitions. The analysis will be performed on small non-linear loads, such as CFL and LED lamps. All measurements and calculations are realized using virtual instrument for three-phase power factor and distortion analysis.

Quantitative Analysis of Reactive Power Calculations for Small Non-linear Loads

M. Dimitrijević, M. Andrejević-Stošović, V. Litovski