

NOVI METOD ZA DETEKCIJU DOGAĐAJA U NEINVAZIVNOM MONITORINGU POTROŠNJE

Srđan Đorđević, Marko Dimitrijević, *Elektronski fakultet u Nišu*
Dejan Stevanović, *Inovacioni centar naprednih tehnologija, Niš*
Slobodan Bojanić, *Universidad Politécnica de Madrid, Španija*

Sadržaj – *Neinvazivni monitoring potrošnje električnih uređaja (NILM) evidentira potrošnju pojedinih uređaja u stambenom objektu na osnovu merenja dobijenih sa jednog senzora. U ovom radu predlaže se novi metod za detekciju događaja u NILM sistemima. Značajna osobina predloženog metoda je da se zasniva isključivo na podacima dobijenim od strane naprednog brojila. Navedeni su eksperimentalni rezultati koji demonstriraju efikasnost predloženog postupka u evidentiranju rada malih nelinearnih potrošača.*

1. UVOD

Za razliku od klasičnih brojila kod kojih se očitavnje potrošnje obavlja manuelno jedanput mesečno kod naprednih brojila se profil potrošnje potrošača obračunava i šalje u znatno kraćim vremenskim intervalima koji se mere delovima jednog sata. Dosadašnja praksa pokazuje da su tehnološke novine u naprednim brojilima u mnogo većoj meri koristile pružaocima usluga nego potrošačima. Korisnici najčešće nisu pokazivali interes za informacije kojima se može doprineti smanjenju potrošnje električne energije.

Da bi se potrošačima omogućilo efikasno upravljanje potrošnjom neophodno je pružiti im daleko više informacija od onih koje se dobijaju uz standardni račun za utrošenu električnu energiju. Rešenje ovog problema se najčešće traži u primeni postupaka za monitoring potrošnje električnih uređaja od kojih su najzastupljeniji metodi za neinvazivni monitoring potrošnje (Non-Intrusive Load Monitoring - NILM). Za realizaciju ovih metoda dovoljan je samo jedan merni uređaj na nivou domaćinstva. Ukoliko se informacije koje pruža NILM prezentuju na adekvatan način one mogu značajno da doprinesu aktivnom učešću korisnika u uštedi električne energije. Koristeći informacije koje daje ovaj sistem i napredno brojilo može se kreirati vizuelni prikaz utroška energije po pojedinim uređajima u domaćinstvu kao i prikaz utrošene električne energije po danima. Prema nekim istraživanjima ušteda koje se može ostvariti ukoliko se korisnicima dostavi ovakav vizuelni prikaz potrošnje je u opsegu od 5 do 15% po domaćinstvu.

NILM sistemi se pored svoje osnovne namene mogu koristiti i za kontrolu ispravnosti električnih uređaja koristeći činjenicu da se vrednosti elektroenergetskih parametara u pojedinim vremenskim intervalima mogu dovesti u vezu sa određenim potrošačima.

Predmet ovog rada su dva ključna koraka u svakom NILM sistemu, ekstrakcija parametara i klasifikacija uređaja. Predložen je novi metod za detekciju događaja uključnja ili isključenja uređaja koji se zasniva na istovremenom merenju tri veličine: aktivne, reaktivne i distorzion snage. Poznato je da metodi za detekciju događaja, koji primenjuju više različitih merenja istovremeno, takozvane klasterne, daju dobre rezultate [1-3].

Prilikom razmatranja efikasnosti predloženog postupka poseban akcenat je stavljen na detekciji malih nelinearnih potrošača iz dva razloga. Prvi razlog je činjenica da se potrošači iz ove kategorije najteže registruju postojećim NILM metodama. Drugi razlog je sve veća zastupljenost malih nelinearnih potrošača u domaćinstvima. Iako svaki od ovih uređaja ima zanemaru potrošnju električne energije njihov udeo u ukupnoj potrošnji nije više zanemaru imajući u vidu njihovu brojnost i raznovrsnost.

Rad je organizovan na sledeći način. Drugo poglavlje daje opis NILM sistema sa akcentom na statičkim NILM metodama. U trećem poglavlju je dat kratak opis predloženog metoda za detekciju događaja u NILM sistemu. Rezultati merenja prikazani su u četvrtom poglavlju.

2. SISTEM ZA NEINVAZIVNI MONITORING POTROŠNJE UREĐAJA

Realizacija NILM sistema se sastoji iz tri faze: akvizicije podataka, ekstrakcije parametara i klasifikacije uređaja. Prvi korak u realizaciji je akvizicija podataka koja se obavlja u naprednim brojilima ili specijalizovanim meračima ukoliko je neophodno obezbediti veću brzinu odmeravanja podataka. U sledećoj fazi se na osnovu prikupljenih podataka obavlja izdvajanje odgovarajućih veličina koje služe za karakterizaciju potrošača. Sastavni deo ovog stepena NILM sistema je detekcija događaja kojom se evidentira da je neki od uređaja priključen ili isključen sa električne mreže. Tokom poslednje faze u realizaciji NILM sistema obavlja se klasifikacija uređaja pri čemu se najčešće primenjuju neuronske mreže sa nadgledanim obučavanjem.

Da bi se realizovala klasifikacija uređaja neophodno je unapred definisati skup veličina koje služe za karakterizaciju električnih aparata. Termin koji se koristi za ove veličine u NILM metodama je potpis uređaja (signature). Postoje dve osnovne kategorije potpisa uređaja: stacionarni i tranzijentni.

Stacionarni potpisi su karakteristike stacionarnih stanja u radu uređaja priključenih na električnu mrežu. Neke od veličina koje su korišćene kao stacionarni potpisi su: aktivna i reaktivna snaga, amplituda i srednja vrednost struje ili napona, harmonici struje, šum napona. Najšire korišćeni elektroenergetski parametar u NILM sistemima su aktivna i reaktivna snaga. Osnovni razlog ove činjenice je jednostavna hardverska realizacija sistema s obzirom da je za merne podatke iz kojih se sračunava srednja vrednost snage dovoljna niska frekvencija odmeravanja.

Tranzijentni potpisi predstavljaju karakteristike kratkotrajnih fluktuacija struja ili napona prouzrokovanih uključnjem uređaja. Primena tranzijentnih potpisa u monitoringu potrošnje uređaja zasniva se na činjenici da skup komponenata od koji je sastavljen bilo koji uređaj direktno određuje vremensku zavisnost struje u prelaznom režimu. Tranzijentni metodi imaju veću tačnost u odnosu na

stacionarne metode jer je količina informacija koja se dobija iz tranzijenata daleko veća od one koju daju stacionarni elektroenergetski parametri. Kompromis koji se pravi prilikom opredeljenja za metode zasnovane na analizi prelaznih stanja je cena jer podaci koje daje napredno brojiilo nisu dovoljni za realizaciju ovih postupaka već je neophodna ugradnja dodatnih uređaja. Jedan od značajnih problema ovih metoda predstavlja pouzdanost detekcije isključenja uređaja koja je nezadovoljavajuća za razliku od detekcije uključenja potrošača.

Određeni parametri elektroenergetske mreže (potpisi uređaja) mogu imati približno jednake vrednosti za više različitih uređaja što može značajno da oteža klasifikaciju uređaja. Sledi da efikasnost određenog NILM metoda u velikoj meri zavisi od tipa uređaja čiji se rad nadzire. Rešenje ovog problema se najčešće traži u istovremenoj primeni više različitih potpisa uređaja [4]. Ovaj pristup zahteva uvođenje dodatne procedure kojom se iz skupa mernih podataka izdvaja parametar na osnovu čije će se vrednosti realizovati klasifikacija uređaja. Cena uvođenja dodatnih procedura je povećanje složenosti metoda što posebno može doći do izražaja kada je broj potpisa uređaja koji se istovremeno prate veliki.

Najstariji metod za neinvazivni monitoring potrošnje električnih uređaja, koji je publikovao Hart u svom pionirskom radu [5], zasniva se na praćenju srednjih vrednosti aktivne i reaktivne snage. Prema proceduri koja je predložena u ovom radu najpre se evidentiraju skokovite promene aktivne i reaktivne snage uz primenu algoritama za detekciju ivica. Klasifikacija uređaja se obavlja mapiranjem priraštaja snaga u dvodimenzionalnu P-Q ravan gde se obavlja poređenje sa dvodimenzionalnim potpisima pojedinih uređaja.

Najveći problem u realizaciji ovog postupak predstavljaju moguća preklapanja dvodimenzionalnih potpisa uređaja u PQ ravni odnosno situacija kada su vrednosti aktivne i reaktivne snage za dva različita potrošača približno iste. Ovaj problem posebno dolazi do izražaja kod monitoringa potrošnje industrijskih postrojenja ili objekata sa velikim brojem različitih uređaja. Drugi značajan problem ovog metoda je definisanje vremenskog intervala u toku kojeg traje prelazni režim prouzrokovan priključenjem nekog od potrošača na mrežu. Otežavajuća okolnost je činjenica da vreme potrebno da se uspostavi stacionarno stanje nakon nekog događaja značajno varira zavisno od tipa uređaja koji je uključen ili isključen. Ukoliko je vreme potrebno da se uspostavi stacionarno stanje pogrešno procenjeno dobiće se netačne vrednosti za stacionarnu vrednost aktivne i reaktivne snage.

Polazeći od Hart-ovog algoritma zasnovanog na stepenastim priraštajima stacionarnih snaga razvijeno je više metoda koje uz dva postojeća elektroenergetska parametra, aktivne i reaktivne snage, uvode dodatne parametre radi prevazilaženja problema sa preklapanjem potpisa uređaja [1],[6],[7].

2.1. Detekcija događaja

Trenutak uključenja ili isključenja uređaja ili u opštem slučaju promena režima rada uređaja naziva se događaj. Ukoliko merenja na elektroenergetskoj mreži ukazuju na promene stacionarnih vrednosti parametara to nedvosmisleno

pokazuje da je određeni potrošač priključen na mrežu. Detekcija događaja nije obavezan korak u realizaciji NILM sistema. Procedura klasifikacije uređaja u NILM metodima koji nisu zasnovani na detekciji događaja realizuje se analizom svih dostupnih odmeraka snage. Posledica ove činjenice je manja efikasnost ovih NILM metoda u odnosu na metode koji su zasnovani na detekciji događaja.

Efikasnost procedura za detekciju događaja zavisi od vremenske zavisnosti snage prilikom korišćenja električnog uređaja. Električni uređaji se prema ovom kriterijumu mogu klasifikovati u sledeće četiri kategorije [5]: uređaje koji mogu biti u stanju uključeno-isključeno, uređaje koji su stalno uključeni, uređaje čiji se rad može modelirati konačnim automatom, uređaje kod kojih se snaga kontinualno menja.

Postoje dva pristupa u detekciji događaja, detekcija ivica i probabilistički pristup. Probabilistički pristup tretira događaj uključanja ili isključenja električnih uređaja kao statističku veličinu. Evidentiranje ovih događaja obavlja se na osnovu vrednosti odnosa uslovnih verovatnoća (Generalized likelihood ratio).

Metodi za detekciju događaja se zavisno od veličina koje se analiziraju mogu klasifikovati u stacionarne i tranzijentne. Realizacija metoda zasnovanih na analizi prelaznih stanja je znatno kompleksnija u odnosu na metode koji analiziraju stacionarna stanja. Pri izboru metoda za detekciju događaja neophodno je razmotriti da li bi cena NILM uređaja prevazišla ostvarenu dugoročnu uštedu u potrošnji električne energije.

Radi poboljšanja efikasnosti postupaka za detekciju događaja često se primenjuje više merenja različitih vreličina istovremeno. Rezultati ovih merenja se uobičajeno nazivaju klasteri. Metod koji su predložili Laughman i ostali [1, 2] primenjuje trodimenzionalni potpis uređaja u trodimenzionalnom prostoru čije su ose: priraštaj aktivne snage, priraštaj reaktivne snage i viši harmonik struje. Viši harmonici struje se dobijaju primenom kratkotrajne Furijeove transformacije (Short-Time Fourier Transform) koja se koristi za harmonijsku analizu nestacionarnih signala. Jedan od postupaka koji takođe primenjuje klaster u detekciji događaja predložio Leeb [3]. Ovaj metod zasniva se na analizi tranzijenata.

3. NOVI METOD ZA DETEKCIJU DOGAĐAJA U NILM SISTEMIMA

Uporedo sa razvojem tehnologija energetske elektronike značajno je povećan broj nelinearnih potrošača električne energije. Struja koja protiče kroz nelinearne potrošače nema sinusoidalni talasni oblik što praktično znači da pored osnovnog harmonika sadrži i više harmonijske komponente. Usled uvođenja viših harmonijskih komponenata struje u elektroenergetsku mrežu mogu se javiti i izobličenja napona.

Nastale promene u strukturi potrošača nameću potrebu da se preispita efikasnost NILM metoda koji su predloženi u vreme kada je profil potrošača u elektroenergetskoj mreži bio drugačiji. Imajući u vidu sve veće prisustvo nelinearnih potrošača u domaćinstvima logično se nameće potreba da se harmonijska izobličenja u većoj meri iskoriste za monitoringa potrošnje uređaja.

Nadovezujući se na istraživanja koja imaju za cilj usavršavanje stacionarnog neinvazivnog monitoringa potrošnje uređaja mi smo u ovom radu razmotrili jedan novi

pristup. Predloženi metod predstavlja jedan u nizu NILM metoda koji polaze od Hart-ovog rešenja da se za monitoring potrošnje uređaja koriste priraštaji aktivne i reaktivne snage. Osnovna ideja predloženog NILM metoda je da se za detekciju rada uređaja primenjuju tri elektroenergetska parametra: aktivna, reaktivna i distorziona snaga. Ovo praktično znači da su pojedini potrošači okarakterisani u trodimenzionalnom prostoru čije su ose priraštaji aktivne, reaktivne i distorzionne snage. Ideja da se primeni trodimenzionalni potpis uređaja u NILM sistemu nije nova, ali je očekivana prednost predloženog postupka u odnosu na metode koji su do sada publikovani jednostavnost realizacije. Ova tvrdnja se zasniva na činjenici da se snaga izobličenja može odrediti bez dodatne merne opreme.

Usled prisustva nelinearnih potrošača proračun aktivne i reaktivne snage se komplikuje jer je neophodno uzeti u obzir više harmonijske komponente struja i napona. Aktivna i reaktivna snaga se u slučaju harmonijskih izobličenja mogu izraziti u funkciji snaga odnosno fazora pojedinih harmonika na sledeći način:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \approx \sum_{h=1}^M V_{RMS h} I_{RMS h} \cos(\theta_h) \quad (1)$$

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h \approx \sum_{h=1}^M V_{RMS h} I_{RMS h} \sin(\theta_h) \quad (2)$$

Gde su: P_h i Q_h aktivna i reaktivna snaga h -tog harmonika, $V_{RMS h}$ i $I_{RMS h}$ efektivna vrednost napona i struje h -tog harmonika, θ_h fazna razlika napona i struje h -tog harmonika.

Prividna snaga koja predstavlja proizvod efektivnih vrednosti napona i struje se takođe može izraziti u funkciji od efektivnih vrednosti pojedinih harmonika na sledeći način:

$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \approx \sqrt{\left(\sum_{h=1}^M V_{RMS h}^2 \right) \cdot \left(\sum_{h=1}^M I_{RMS h}^2 \right)} \quad (3)$$

Za razliku od linearnih sistema kod kojih je kvadrat prividne snage jednak zbiru kvadrata aktivne i reaktivne snage u nelinearnim sistemima nije moguće uspostaviti relaciju koja bi sadržala samo ove tri veličine. Da bi rešio ovaj problem Baudeanu je polazeći od definicija aktivne, reaktivne i prividne snage uveo pojam distorzionne snage [7] koja je prouzrokovana harmonijskim izobličenjima:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (4)$$

Očigledno je da se snaga izobličenja može jednostavno izračunati na osnovu podataka koje daje bilo koji savremeni merač potrošnje električne energije. Harmonijska izobličenja napona se najčešće mogu zanemariti ukoliko se razmatra rad uređaja u domaćinstvu. Snaga izobličenja se u tom slučaju svodi na takozvanu strujnu distorzionu snagu:

$$D = V_{RMS1} \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{RMS h}^2} \quad (5)$$

Događaj uključenja ili isključenja uređaja praćen je skokovitim promenama snage izobličenja kao i u slučaju aktivne i reaktivne snage. Za razliku od izmerenih priraštaja aktivne i reaktivne snage koje se mogu direktno dovesti u vezu sa promenom režima rada određenog potrošača vrednosti priraštaja snage izobličenja se moraju dodatno obraditi. Polazeći od pojednostavljenog izraza za snagu izobličenja (5) može se izvesti relacija koja povezuje nastali priraštaj snage sa određenim potrošačem:

$$D_P^2 = \left| D_2^2 - D_1^2 \right| \quad (6)$$

Gde su: D_2 i D_1 izmerene vrednosti ukupne snage izobličenja pre i nakon uključenja uređaja respektivno, D_P snaga izobličenja pojedinačnog potrošača koji je promenio režim rada.

4. REZULTATI MERENJA

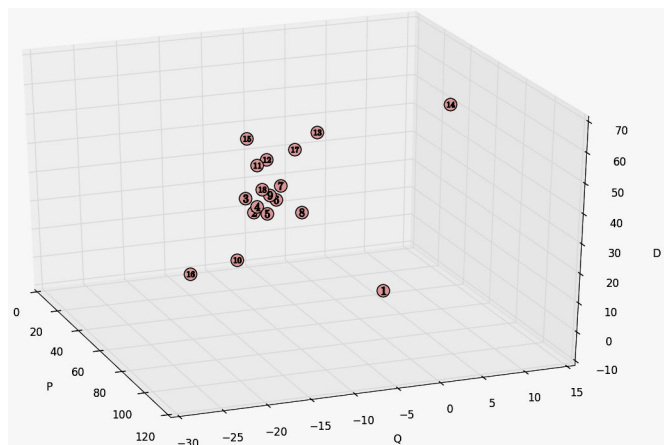
Merenja elektroenergetskih parametara sprovedena su na mernoj grupi koja ispunjava standarde IEC 62052-22 (proizvod firme EWG iz Niša). Ova merna grupa meri aktivnu i reaktivnu snagu kao i efektivne vrednosti struja i napona. Snaga izobličenja se mora sračunati.

Tabela I prikazuje skup uređaja koji su korišćeni za potrebe merenja. Vrednosti aktivne, reaktivne i distorzionne snage kada se određeni uređaj priključi na napajanje navedene su uz naziv uređaja [8,9]. Na osnovu prikazanih vrednosti snaga jasno se vidi da su za potrebe merenja odabrani mali nelinearni potrošači čija aktivna snaga ne prelazi 100 W.

Tabela 1: Rezultati merenja

	Load	P (W)	Q (VAR)	D (VAR)
1	Philips75W monitor	73,48	0,69	2,64
2	CFL lamp 18W	11,33	-5,80	11,99
3	EL 20W CFL tube	13,86	-7,15	18,34
4	ES 15W CFL bulb	12,10	-5,51	14,34
5	ES 9W CFL bulb	7,58	-3,64	9,58
6	LED Bulb 8W	9,70	-2,84	15,01
7	LED lamp 10W	12,89	-2,74	21,00
8	LED Bulb 6W	5,10	0,96	7,78
9	REF 10W	10,81	-3,75	17,30
10	CRT HM903 monitor	77,84	-17,11	20,94
11	Dell E2310H monitor	23,33	-7,06	32,86
12	BENQ G2220 monitor	20,13	-5,46	33,32
13	SAMSUNG 943N monitor	32,75	-1,24	45,22
14	DELL-Optiplex360 PC	61,09	10,24	59,37
15	LED32 Arielli ON	27,36	-8,87	43,77
16	LG 32LE5300 monitor	95,61	-24,86	24,82
17	CRT TV set	31,44	-3,73	39,56

Slika 1 prikazuje raspored odabarane grupe potrošača u trodimenzionalnom prostoru čije su ose aktivna, reaktivna i snaga izobličenja. Sa slike se jasno može uočiti da su trodimenzionalni potpisi grupe uređaja, koji su navdeni u tabeli 1, u dovoljnoj meri razdvojeni čime su stvoreni uslovi da se efikasno obavi klasifikacija uređaja. Ova procedura daje značajna poboljšanja u odnosu na Hart-ijev metod koji koristi dvodimenzionalni potpis uređaja u PQ ravni [10].



Sl. 1. Trodimenzionalni potpisi grupe nelinearnih potrošača male snage

5. ZAKLJUČAK

Značajna karakteristika predloženog NILM metoda za detekciju događaja je da koristi merenja tri veličine, takozvani trodimenzionalni klastering. Za razliku od svih do sada publikovanih klastering postupaka za detekciju događaja postupak koji je opisan u radu ne koristi tranzijentne parametre.

Rezultati merenja na grupi malih nelinearnih potrošača pokazuju da je relativno jednostavno razdvojiti pojedinačne potrošače u trodimenzionalnom prostoru čije su ose aktivna, reaktivna i distorziona snaga. Hardverski zahtevi za realizaciju predloženog NILM metoda su minimalni s obzirom da se svi potrebni podaci mogu dobiti od naprednog brojila i nije potrebno ulaganje u dodatnu opremu za akviziciju podataka.

6. LITERATURA

- [1] C. Laughman, D. Lee, R. Cox, S. Shaw, S. Leeb, L. Norford, and P. Armstrong, „Advanced Nonintrusive Monitoring of Electric Loads,“ IEEE Power and Energy, pp. 56-63, 2003.
- [2] C. Laughman, D. Lee, R. Cox, S. Shaw, S. Leeb, L. Norford, and P. Armstrong, „Power signature analysis,“ Power and Energy Magazine, IEEE, vol. 1, no. 2, pp. 56 - 63, 2003.

- [3] S. Leeb, S. Shaw, J. Kirtley, „Transient event detection in spectral envelope estimates for nonintrusive load monitoring,“ Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 10, no. 3, pp. 1200 -1210, Jul 1995.
- [4] J. Liang, S. Kendall, J. Cheng, „Load Signature Study Part II: Disaggregation Framework, Simulation, and Applications,“ IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, pp. 561-569, April 2010.
- [5] G. Hart, „Nonintrusive appliance load monitoring,“ IEEE Proc., vol 80, pp. 1870-1891, 1992.
- [6] H.-h. Chang, C.-l. Lin, and J.-k. Lee, „Load identification in nonintrusive load monitoring using steady-state and turn-on transient energy algorithms,“ 14th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, pp. 27-32, April 2010.
- [7] F. Sultanem, „Using appliance signatures for monitoring residential loads at meter panel level,“ IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 4, pp. 1380-1385, 1991.
- [8] C. I. Budeanu, „Reactive and Fictitious Powers,“ Rumanian National Institute, No. 2, 1927.
- [9] D. Stevanović, P. Petković, „Sistem za detekciju monofaznih potrošača koji unose harmonijska izobličenja,“ Zbornik LVIII konferencije ETRAN, jun 2014.
- [10] D. Stevanović, P. Petković, „Unapređenje sistema za registrovanje potrošnje električne energije,“ Zbornik LVII konferencije ETRAN, jun 2013.
- [11] S. Djordjević, S. Bojanić, M. Dimitrijević, „Smart Meter Privacy by Suppression of Low Power Frequency Components,“ X Symposium on Industrial Electronics INDEL 2014, Banja Luka, pp. 285-289, novembar 2014.
- [12] S. Djordjević, S. Bojanić, M. Dimitrijević, D. Stevanović, „Monitoring potrošnje električne energije zasnovan na kontinualnom praćenju aktivne i snage izobličenja,“ Zbornik LIX konferencije ETRAN, EL 2.3, jun 2015.

Abstract – Non-intrusive load monitoring (NILM) determines the status of electrical loads inside residential buildings from measurements made at the utility service entry. In this paper, we propose the novel event detection method for nonintrusive load monitoring systems based on the capabilities of current smart meters. The experimental results demonstrate the efficiency of the proposed procedure with respect to the small non-linear loads.

THE NOVEL EVENT DETECTION METHOD FOR NONINTRUSIVE LOAD MONITORING

Srdan Đorđević, Slobodan Bojanić,
Marko Dimitrijević, Dejan Stevanović