

Hrvatska zaklada za znanost
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb
Zavod za visoki napon i energetiku

ANIMATION

Reports 2020

Vedran Bobanac, PhD
Assoc. Prof. Hrvoje Pandžić, PhD



Prosinac 2020.

Contents

1	M1.7 Model električnog bojlera	1
2	M1.8 Model hladnjaka/zamrzivača	2
3	M1.10 Model perilice/sušilice rublja i perilice posuđa	3
4	M1.11 Model rashladnog klima uređaja	5
5	M1.12 Model ostale kućne potrošnje s potencijalom za odziv potrošnje	7
6	M1.13 Model kućnog punjača električnih vozila	8

1. M1.7 Model električnog bojlera

Kućanski uređaji, poput električnog bojlera, klima uređaja ili hladnjaka/zamrzivača, predstavljaju potencijal pri pružanju usluga fleksibilnosti elektroenergetskom sustavu. Električni bojler modeliran je sljedećim jednadžbama [1]:

$$Q_{v,t} = P_{b,t}, \quad \forall t \quad (1.1)$$

$$T_{v,t} = A_v \cdot T_{v,t-1} + B_v \cdot Q_{v,t}, \quad \forall t \quad (1.2)$$

Omjer prenesene topline potrebne za zagrijavanje i uložene električne energije jednak je 1, što je prikazano jednadžbom (1.1). Termalno ponašanje i prijenos topline, odnosno promjena temperature medija (vode) predstavljena je linearnim modelom prostor-stanja (engl. *state-space model*). Temperatura vode u trenutku t ovisi o parametrima navedenog modela, matricama A_v i B_v , temperaturi u prethodnom trenutku $t - 1$ te dovedenoj toplini $Q_{v,t}$.

$$T_{v,t}^{min} \leq T_{v,t} \leq T_{v,t}^{max}, \quad \forall t \quad (1.3)$$

Jednadžba (1.3) definira ograničenje temperature medija (vode) na minimalnu i maksimalnu razinu, u ovisnosti o željama korisnika.

2. M1.8 Model hladnjaka/zamrzivača

Kućanski uređaji, poput električnog bojlera, klima uređaja ili hladnjaka/zamrzivača, predstavlja potencijal pri pružanju uloga fleksibilnosti elektroenergetskom sustavu. Hladnjak/zamrzivač modeliran je sljedećim jednadžbama [1]:

$$Q_{m,t} = P_{h,t}, \quad \forall t \quad (2.1)$$

$$T_{m,t} = A_m \cdot T_{m,t-1} - B_m \cdot Q_{m,t}, \quad \forall t \quad (2.2)$$

$$T_{m,t}^{min} \leq T_{m,t} \leq T_{m,t}^{max}, \quad \forall t \quad (2.3)$$

Navedeni su parametri i varijable korišteni u prethodnim jednadžbama:

$Q_{m,t}$ Odvedena toplina (kW).

$P_{m,t}$ Električna snaga hladnjaka (kW).

$T_{m,t}$ Temperatura medija (°C).

$T_{m,t}^{min}$, $T_{m,t}^{max}$ Najniža i najviša temperatura medija (°C).

A_m , B_m Matrice modela prostor-stanja.

Promjena temperature medija u hladnjaku definirana je linearnim modelom prostor-stanja (engl. *state-space model*), jdb.(2.2). Ona ovisi o temperaturi u prethodnom trenutku $t - 1$, kao i o odvedenoj toplini. Temperatura medija, $T_{m,t}$, kreće se u predodređenom intervalu od $T_{m,t}^{min}$ do $T_{m,t}^{max}$.

3. M1.10 Model perilice/sušilice rublja i perilice posuđa

Perilice posuđa te perilice i sušilice rublja sudjeluju u potrošnji kućanstva zamjetnom snagom i stoga imaju i zamjetan potencijal za odziv potrošnje. Spadaju u neprekidive uređaje koji nakon paljenja moraju dovršiti ciklus do kraja i nemoguće ih je zaustaviti. U ovu kategoriju spadaju i neki kuhinjski uređaji, poput pećnica, no zbog velikog utjecaja na zadovoljstvo korisnika njih se uglavnom uzima kao uređaje bez potencijala za odziv potrošnje.

Neprekidivi uređaji modeliraju se pomoću binarnih varijabli kao indikatora stanja upaljenosti. Sljedeći skup ograničenja koristi se za opisivanje ovih uređaja u optimizacijskim modelima [2]:

$$\sum_{t=1}^{T-L^u} x_t^u = 1 \quad (3.1)$$

$$p_t^u = \sum_{l=0}^{L^u-1} L^u - 1 x_{t-l}^u \cdot \bar{P}^u, \quad \forall t \in T \quad (3.2)$$

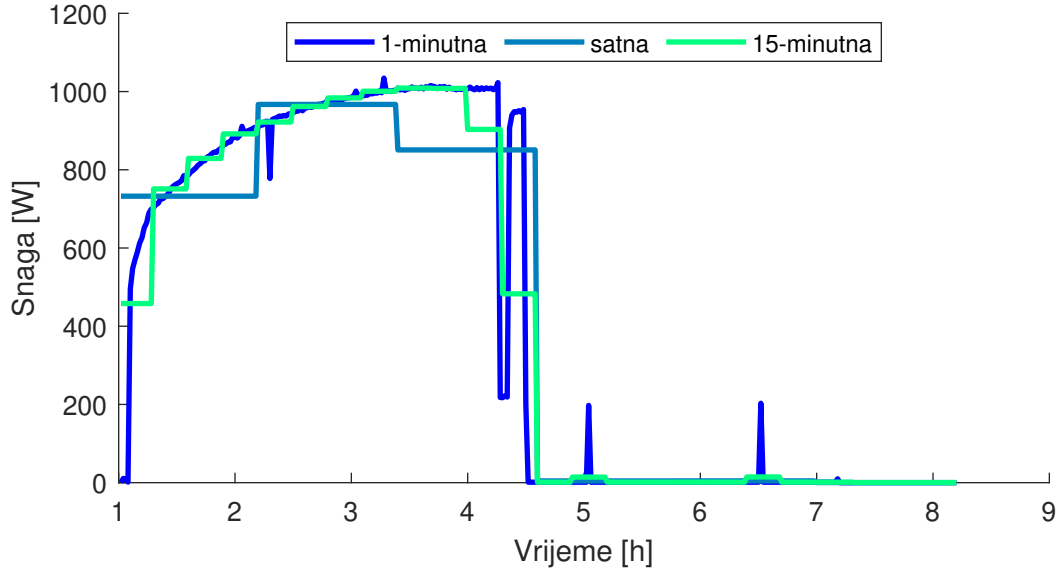
Gdje je x_t^u binarna varijabla koja ima vrijednost 1 u trenutku kad se uređaj pali i 0 u svim ostalim trenucima. Parametar L^u je trajanje ciklusa uređaja i ovisi o vrsti i načinu korištenja uređaja. Varijabla p_t^u je varijabla koja označava snagu koju uređaj vuče iz mreže u svakom trenutku, a \bar{P}^u je parametar koji opisuje njegovu potrošnju snage.

Jednadžba (3.1) ograničava broj paljenja uređaja tijekom optimizacijskog perioda na jedan. Jednadžba (3.2) osigurava da se uređaj ne gasi tijekom trajanja ciklusa i da troši ispravan iznos snage u svakom trenutku.

Trajanje ciklusa i potrošnja snage tijekom ciklusa određuju se mjerenjem potrošnje uređaja. Podatci dobiveni mjerenjem preoblikuju se u odgovarajući oblik u ovisnosti o koraku optimizacije (satno, petnaest minutno, minutno, itd.). Potrošnja uređaja za podatke s vremenom uzorkovanja Δt se računa kako slijedi:

$$\bar{P}_c^u = \sum_s^{N_S} P_{cs}^{\text{uzorak}} \cdot \frac{\Delta t}{T} \quad (3.3)$$

Gdje je $C = \{c_1, \dots, c_L\}$ skup koji označava korake optimizacije unutar ciklusa, N_S broj uzoraka u koraku optimizacije, T je trajanje koraka optimizacije, a P_{cs}^{uzorak} izmjerena potrošnja snage



Slika 3.1: Jednominutni, petnaestminutni i satni podatci potrošnje snage za jedan ciklus sušilice rublja

tijekom svakog perioda uzorkovanja. Izrazom (3.3) osigurava se da je očuvana ukupna potrošnja energije tijekom ciklusa uz konstantnu snagu u svakom koraku optimizacije. Kao primjer, slika 3.1 prikazuje rezultate ovog procesa za mjerenja ciklusa sušilice rublja s periodom uzorkovanja od jedne minute za različita trajanja koraka optimizacije, petnaest minuta i jedan sat.

4. M1.11 Model rashladnog klima uređaja

Zajedno s grijanjem, grijanjem tople vode i ventilacijom, klima uređaji čine preko 50% potrošnje u kućanstvu [3]. Klima uređaj nastoji zadržati temperaturu prostorije u zadanim granicama temperature.

Model prijenosa topline prikazuje prijenos topline kroz zidove, prijenos s jedne površine na drugu, kao i s medija na površinu (i obrnuto). U jednadžbi (4.1) vidljivo je da promjena temperature prostorije ovisi o odvedenoj toplini, vanjskoj (okolnoj) temperaturi i ostalim parametrima zgrade/kuće.

U jednadžbama (4.1)-(4.4) pojavljuju se sljedeće varijable i parametri [4]:

C_p Toplinski kapacitet prostorije (kWh/°C)

T_p Temperatura prostorije (°C)

T_o Temperatura okoline (°C)

R_p Termički otpor prostorije (°C/kW)

p_u Odvedena toplina (kW)

COP Koeficijent učinka klima uređaja (%)

p_{hvac} Električna snaga klima uređaja (kW)

T_p^{min} , T_p^{max} Minimalna i maksimalna dozvoljena temperatura prostorije (°C)

τ Vremenski period (h)

$$C_p \cdot \frac{dT_p}{dt} = \frac{T_o - T_p}{R_p} - p_u \quad (4.1)$$

Diskretizacija jednadžbe 4.1 rezultira sljedećom jednadžbom 4.2:

$$T_{p,t+1} = \left(1 - \frac{\tau}{R_p \cdot C_p}\right) \cdot T_{p,t} + \frac{\tau}{R_p \cdot C_p} \cdot T_{o,t} - \frac{\tau}{C_p} \cdot p_{u,t}, \quad \forall t \quad (4.2)$$

Da bi se prenijela željena toplina $p_{u,t}$, potrebno je uložiti električnu snagu iznosa p_{hvac} , koja se dobije na sljedeći način (jdb. (4.3)):

$$p_{u,t} = COP \cdot p_{hvac}, \quad \forall t \quad (4.3)$$

Glavni cilj klima uređaja je održati temperaturu u zadanim granicama, odnosno:

$$T_p^{min} \leq T_{p,t} \leq T_p^{max}, \quad \forall t \quad (4.4)$$

5. M1.12 Model ostale kućne potrošnje s potencijalom za odziv potrošnje

Ostalu potrošnju s potencijalom za odziv potrošnje čine uređaji čiju potrošnju je moguće pomicati u vremenu, a nemaju unaprijed određen ciklus, nego ih je moguće upaliti i ugaziti u bilo kojem trenutku. U ovu skupinu uređaja spada rasvjeta, punjenje elektroničkih uređaja i slično. Iako pomicanje potrošnje ovih uređaja u vremenu može negativno utjecati na zadovoljstvo korisnika, koristi od takvih postupaka često prevaguju pa ih se ipak uzima u obzir.

Unatoč različitim karakteristikama, uređaji iz ove skupine mogu se opisati sljedećim jedinstvenim skupom ograničenja [5]:

$$0 \leq s_t^u \leq \bar{S}_t^u \cdot x_t, \quad \forall t \in T \quad (5.1)$$

$$0 \leq o_t^u \leq \bar{O}_t^u \cdot (1 - x_t), \quad \forall t \in T \quad (5.2)$$

$$k^u \cdot \sum_{t \in T} s_t^u = \sum_{t \in T} o_t^u \quad (5.3)$$

Gdje varijabla s_t^u predstavlja smanjenje potrošnje, a varijabla o_t^u oporavak potrošnje modeliranog uređaja u svim optimizacijskim koracima, parametri \bar{S}_t^u i \bar{O}_t^u maksimalnu snagu na raspolaganju za smanjenje i povećanje, a parametar k^u je koeficijent oporavka koji predstavlja gubitke uzrokovane pomicanjem potrošnje u vremenu.

Nejednakosti (5.1) ograničavaju smanjenje potrošnje u svakom trenutku perioda optimizacije između nule i maksimalno dostupne snage, a nejednakosti (5.2) rade isto za oporavak potrošnje. Binarne varijable x_t u ovim ograničenjima onemogućuju istovremeno smanjenje i povećanje potrošnje. Jednadžba (5.3) osigurava da sva smanjena potrošnja bude oporavljena tijekom perioda optimizacije, uzimajući u obzir koeficijent oporavka svojstven pojedinim vrstama trošila. Primjerice, ovaj koeficijent iznosi 0 za rasvjetu, a veći je od 1 za punjive uređaje s elektrokemijskim baterijama.

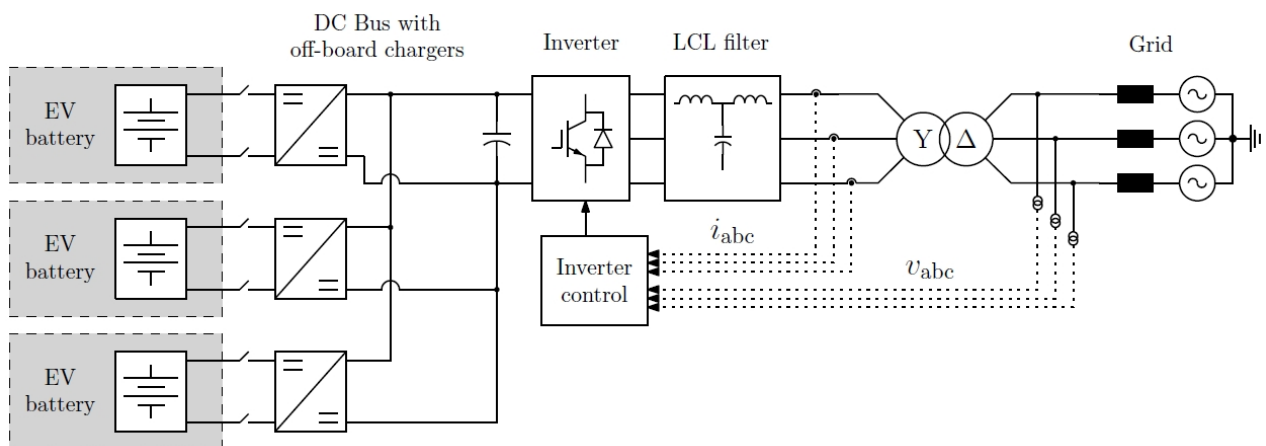
6. M1.13 Model kućnog punjača električnih vozila

Razvoj tehnologije, kao i općeniti svjetski trend razvoja ekologije i smanjivanja emisije stakleničkih plinova, doveo je do toga da se po cestama kreće sve više baterijskih električnih vozila (BEV) i „plug-in“ hibridnih električnih vozila (PHEV). Ove dvije vrste vozila (u daljnjem se tekstu zajednički nazivaju električnim vozilima – EV) zahtijevaju infrastrukturu za punjenje, tj. punionice EV-a. Budući da se baterije koje rade na istosmjernoj struji (engl. direct current – DC) napajaju iz mreže koja radi na izmjeničnoj struji (engl. alternating current – AC), između njih mora biti smješten AC/DC pretvarač. U skladu s tim postoje dva osnovna tipa punjenja EV-ova: (i) AC punjenje i (ii) DC punjenje.

U slučaju (i) AC struja ulazi u vozilo, pri čemu se koristi ugrađeni (engl. on-board) punjač tipičnih snaga 3.3-6.6 kW. U slučaju (ii) DC struja ulazi u vozilo, pri čemu se koristi vanjski (engl. off-board) punjač tipičnih snaga 20-100 kW. DC punjači tipično imaju veće snage od AC punjača zato što njihov smještaj izvan vozila dozvoljava veće dimenzije i težinu pretvarača i energetske elektronike, međutim DC punjači su zbog toga i dosta skuplji od AC punjača. DC punjači često nazivaju i „brzim“ punjačima, budući da mogu isporučiti veću snagu i tako brže napuniti baterije u usporedbi sa „sporim“ AC punjačima.

Model jedne brze (DC) punionice električnih vozila (EV) prikazan je na Sl. 6.1. Ova punionica sastoji se od jednog invertera (pretvarača) spojenog na mrežu preko LCL filtera i transformatora. S druge strane invertera nalazi se DC sabirnica na koju je spojeno više punjača (DC-DC pretvarača) preko kojih se istovremeno mogu puniti baterije više EV-ova. Upravljanje ovim punjačima je decentralizirano. Centralni upravljački sustav (prikazan na Sl. 1) odgovoran je za prijenos energije između mreže i DC sabirnice, te za održavanje napona DC sabirnice.

Referenca: A. Arancibia and K. Strunz, "Modeling of an electric vehicle charging station for fast DC charging," 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, Greenville, SC, 2012, pp. 1-6, doi: 10.1109/IEVC.2012.6183232.



Slika 6.1: DC punionica električnih vozila za brzo punjenje

Bibliography

- [1] K. Bruninx, H. Pandžic, H. Le Cadre, and E. Delarue, “On controllability of demand response resources aggregators’ bidding strategies,” in *2018 Power Systems Computation Conference (PSCC)*, pp. 1–7, 2018.
- [2] M. Gržanić and T. Capuder, “The value of prosumers’ flexibility under different electricity market conditions: Case studies of denmark and croatia,” in *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)*, pp. 616–621, 2019.
- [3] J. Kondoh, N. Lu, and D. J. Hammerstrom, “An evaluation of the water heater load potential for providing regulation service,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 1309–1316, 2011.
- [4] H. Nguyen, D. Nguyen, and L. Le, “Energy management for households with solar assisted thermal load considering renewable energy and price uncertainty,” *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp. 301–314, 01 2015.
- [5] Y. Dvorkin, “Can merchant demand response affect investments in merchant energy storage?,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 3, pp. 2671–2683, 2018.