

Обједињена анализа електроенергетске и мреже даљинског система грејања

Дарко Шошић, Александар Савић, Горан Добрић

Електроенергетски системи
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
Београд, Србија
sosic@etf.rs, savic@etf.rs, dobric@etf.rs

Тамара Бајц

Термотехника
Универзитет у Београду – Машински факултет
Београд, Србија
tbajc@mas.bg.ac.rs

Сажетак—Енергетски систем на нивоу града са временом постаје све сложенији и разноликији. Различити носиоци енергије међусобно су повезани ради испуњавања различитих енергетских потреба. Уобичајени начин распрегнуте анализе енергетских мрежа не одсликава праву природу заједничког рада енергетског система. Као пример повезаних система може да послужи систем даљинског грејања и електро дистрибутивне мреже. Везу између ова два система могу да представљају СНР јединице, топлотне пумпе и електрични бојлери. У овом раду је приказан декомпоновани електро хидро–термални прорачун.

Кључне речи-прорачун токова снага; хидраулично-термички прорачун.

I. UVOD

Постојећи конвенционални електроенергетски систем се састоји од три главна дела: производног, преносног и дистрибутивног. Иако се у свакој од ових група посебно уводе нека побољшања, још увек постоје ограничења попут: лоше ефикасности приликом конверзије хемијске енергије у електричну, значајних губитака енергије у преносном и дистрибутивном систему, као и у великој количини потребне обртне резерве ради покривања ретких вршних оптерећења [1]. Да би се избегли неки недостаци конвенционалних електроенергетских система може се приступити концепту паметних мрежа који са новим информационом и комуникационим технологијама могу да управљају потрошњом, дистрибуираном производњом као и енергетским складиштима [2].

На нивоу града постоје разнолике потребе за енергијом као и разне технике производње потребне врсте енергије. Под производном технологијом се мисли на соларно термичке изворе, соларне панеле, ветротурбине, топлотне пумпе, гориве ћелије итд. Скоро сваки захтев за енергијом је могуће остварити дистрибуцијом истог енергента или коришћењем неке технологије која претвара један вид енергије у други. На пример, потреба за грејањем објеката се може задовољити путем различитих система, односно извора енергије: гасног котла, електричног бојлера, или на неки други начин.

Дистрибуирана производња игра веома важну улогу у елиминисању емисије CO₂, смањивању губитака активне снаге, поправку напонских прилика, и у неким случајевима

повећању поузданости [3]. Комбинована производња топлоте и електричне енергије (СНР) се може користити у ту сврху. Код ове јединице се поред електричне енергије генерише корисна термичка енергија из отпадне топлоте која би се иначе испустила у околни простор и представљала би чист губитак. Различита примарна горива (гас, биомаса, геотермална енергија, ...) могу да се користе у СНР јединицама. Генерисана топлота из таквих јединица може да се користи у процесу даљинског грејања. Мрежа система даљинског грејања се састоји од цеви које формирају петљасту структуру и користе топлу воду као медијум за преношење топлоте. У [4] су описани топлотни генератори који се користе код система даљинског грејања.

Системи за снабдевање енергијом обично се појединачно разматрају са засебним енергетским векторима, нпр. електрична енергија, даљински систем грејања, гас или водоник. У присуству паметних мрежа улога електричне енергије је најистакнутија с ограниченом употребом осталих енергетских мрежа. Међутим, постоје многе предности ако се енергетски сектор посматра као интегрисана целина. Токови енергије који долазе из алтернативних извора могу се контролисати; стога је могуће обезбедити повећану сигурност снабдевања потребним видом енергије. Могуће је пронаћи најефикаснији режим рада и смањити губитке, трошкове и емисију штетних гасова. Независно планирање и рад засебних енергетских мрежа највероватније неће дати глобални оптимум, пошто се не могу искористити све предности које нуде различити видови енергије. Стога је интеграција енергетских система веома пожељна [5].

Један пример интегрисане енергетске мреже је систем даљинског грејања са СНР јединицама. СНР јединице, електрични бојлери и топлотне пумпе које су повезане на систем даљинског грејања представљају спону између електро дистрибутивне мреже и мреже даљинског система грејања. Такав интегрисани енергетски систем уз додатну могућност складиштења енергије, како електричне тако и топлотне, може знатно допринети бољој употреби примарних ресурса [6], [7]. Компоненте које повезују ова два система (СНР јединице, топлотне пумпе, електрични бојлери и циркулационе пумпе) повећавају флексибилност приликом уравнотежавања производње електричне

енергије у присуству обновљивих извора енергије. Са повећањем удела обновљивих извора енергије у дистрибутивној мрежи, интеракција између електро и топлотне мреже постаје све неопходнија и моделовање њиховог заједничког рада постаје све важније.

Рад је организован на следећи начин: у другој секцији је описан начин моделовања мреже даљинског система грејања у хидрауличком и термичком смислу. У трећој секцији су моделоване компоненте које повезују електродистрибутивну и мрежу даљинског система грејања. Четврта секција даје приказ алгоритама, док су у петој приказани резултати спроведене анализе. На крају у шестој секцији је дат закључак рада.

II. ДАЉИНСКИ СИСТЕМ ГРЕЈАЊА

Мрежа даљинског система грејања се обично састоји од разводног и повратног цевовода који испоручује топлотну енергију, у форми топле воде или паре, од топлотног генератора до крајњих корисника. Да би се спровела анализа и одредили неопходни параметри (притисак, проток по цевима, напојна и повратна температура флуида, као и потребна термичка снага) потребно је извршити хидраулични и термички прорачун. Обично се прво врши хидраулична анализа па тек онда термичка [8], [9]. Усвојена је претпоставка да су напојна температура свих извора, као и повратна температура потрошача познате. Такође позната је и захтевана топлотна снага свих потрошача и извора (осим референтног).

A. Хидраулички модел

Моделовање мреже даљинског грејања је слично моделовању електроенергетске мреже. Пошто су напојна и повратна мрежа идентичне довољно је разматрати само једну у хидрауличком моделу. Континуалност тока (Први Кирхофов Закон) каже да масени проток који улази у чвор је једнак масеном протоку који излази из чвора, односно:

$$\left(\sum \dot{m}\right)_u - \left(\sum \dot{m}\right)_{iz} = \dot{m}_q, \quad (1)$$

где је \dot{m} (kg/s) масени проток кроз сваку деоницу, \dot{m}_q (kg/s) масени проток кроз чвор (инјектирање од стране извора или потрошња од стране корисника). Да би се континуалност тока приказала у матричној форми неопходно је увести матрицу инциденције, \mathbf{A} , чије су димензије $n_c \% n_g$, где је n_c број чворова, а n_g број грана посматране топлотне мреже. Сваки елемент матрице \mathbf{A} може да узме једну од три вредности: 0 ако не постоји веза између чвора и деонице, 1 ако ток у деоници улази у чвор и -1 ако ток у деоници излази из чвора [10]. У матричној форми континуалност тока се може изразити помоћу следећег израза:

$$\mathbf{A} \times \dot{\mathbf{m}} = \dot{\mathbf{m}}_q. \quad (2)$$

Континуалност тока се примењује на све чворове топловодне мреже, али једна једначина је редувантна пошто је такав систем линеарно зависан. Да би се овакав систем успешно решио потребно је избацити један ред, при чему то може да буде било који, али се најчешће избацује онај који одговара референтном чвору.

Губитак притиска је последица трења и локалних отпора у мрежи. Промена притиска унутар затворене

контуре је једнака нули (Други Кирхофов Закон), $\sum h_f = 0$, где је h_f губитак притиска унутар деонице који представља разлику притиска на почетку и на крају деонице. Да би се губитак притиска приказао у матричној форми потребно је увести инциденту матрицу петљи, \mathbf{B} чије су димензије $n_p \% n_g$, где је n_p број петљи. Сваки елемент матрице \mathbf{B} може да узме једну од три вредности: 0 ако деоница није део петљи, 1 ако се смер тока у деоници поклапа са усвојеним смером контуре и -1 ако се смер тока у деоници разликује од усвојеног смера контуре [10]. У матричној форми ово се може приказати на следећи начин:

$$\mathbf{B} \times \mathbf{h}_f = 0. \quad (3)$$

Зависност губитка притиска од масеног протока се може описати следећим изразом:

$$\mathbf{h}_f = \mathbf{K} \times \dot{\mathbf{m}} \times |\dot{\mathbf{m}}|, \quad (4)$$

где је \mathbf{K} вектор коефицијената отпора сваке цеви. Коефицијент отпора сваке цеви се рачуна помоћу следећег израза:

$$K = (8Lf) / (D^5 \rho^2 \pi^2 g), \quad (5)$$

где је L (m) дужина цеви, D (m) пречник цеви, ρ (kg/m³) густина воде, g (m/s²) је убрзање земљине теже. Коефицијент трења f зависи од Рејнолдовог броја ($Re = 4\dot{m}/(\rho\pi\mu D)$), при чему за ламинарно струјање флуида ($Re < 2320$) важи $f = 64/Re$, а за турбулентно струјање ($Re > 4000$) се рачуна помоћу следећег израза:

$$\frac{1}{f} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right), \quad (6)$$

где су са ε (m) и μ (m²/s) означене храпавост цеви и вискозност воде. Колбрукова једначина (6) се решава помоћу методе која је изложена у [11]. За вредности Рејнолдовог броја у опсегу (2300, 4000) користи се линеарна интерполација.

За упетљану мрежу број непознатих токова по гранама је већи од броја независних једначина континуалности тока. Због тога је неопходно овим једначинама придружити једначине које одговарају промени притиска за сваку петљу. Овај нелинарни систем се може решити применом Њутнове методе на следећи начин:

$$\begin{aligned} \Delta m &= -J^{-1} \Delta F, \\ J &= \begin{bmatrix} \mathbf{A} \times \dot{\mathbf{m}} - \dot{\mathbf{m}}_q \\ \mathbf{B} \times \mathbf{K} \times \dot{\mathbf{m}} \times |\dot{\mathbf{m}}| \end{bmatrix}, \\ \Delta F &= \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ 2\mathbf{B} \times \mathbf{K} \times |\dot{\mathbf{m}}| \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

B. Термички модел

Термички модел се користи за одређивање температуре у сваком чвору. За сваки чвор се посматрају три различите температуре: напојна (T_s), излазна (T_o) и повратна (T_r) температура. Излазна температура представља температуру на излазу из сваког чвора, али пре мешања у повратној мрежи. Усвојена је претпоставка да су познате напојне температуре свих топлотних извора и излазне температуре свих потрошача. Топлотна снага, Φ , која се предаје сваком чвору се рачуна помоћу следећег израза:

$$\Phi = C_p \dot{m}_q (T_s - T_o). \quad (8)$$

где је C_p (J/(kg·K)) специфични топлотни коефицијент воде.

Температура на пријемном крају цеви се може израчунати на следећи начин:

$$T_{kraj} = (T_{pocetak} - T_a) \exp\left(-\frac{\lambda L}{C_p \dot{m}}\right) + T_a \Rightarrow T'_{kraj} = T'_{pocetak} \Psi, \quad (9)$$

где су $T_{pocetak}$, T_{kraj} , T_a (°C) температуре на почетку и на крају цеви и амбијентална температура, респективно, L (m) дужина цеви, λ (W/(m·K)) топлотна проводност. Температура воде на излазу из чвора у коме долази до мешања токова различитих температура се рачуна помоћу следећег израза:

$$\left(\sum \dot{m}_i\right) T_{iz} = \sum (\dot{m}_u T_u), \quad (10)$$

где је T_{iz} и T_u (°C) температура измешане воде и температура на улазу у чвор, \dot{m}_i и \dot{m}_u (kg/s) су протоци у деоницама које излазе из и улазе у посматрани чвор. Да би се израчунала температура напојне воде за сваки чвор може се користити следећа матрична једначина:

$$\mathbf{C}_s \mathbf{T}'_s = \mathbf{b}_s, \quad (11)$$

где се матрице \mathbf{C}_s и \mathbf{b}_s одређују помоћу следећег алгорита.

1. Сваки чвор који у матрици \mathbf{A} има више од једног броја 1 представља чвор мешања у напојној мрежи централног грејања.
2. За сваки чвор i пронаћи напојни чвор j који је на другом крају цеви k .
3. Ако у посматраном чвору не долази до мешања воде елементи матрице \mathbf{C}_s и вектора \mathbf{b}_s су:

$$\begin{aligned} C_{sii} &= 1, \\ b_{si} &= T'_{sj} \Psi_k. \end{aligned} \quad (12)$$

4. Ако у посматраном чвору долази до мешања потребно је испитати све гране које се сустичу у том чвору. Елемент на главној дијагонали матрице \mathbf{C}_s је

$$C_{sii} = \sum_k \dot{m}_k. \quad (13)$$

Ако су напојни чворови посматраног чвора i потрошачки, тада важи:

$$C_{sij} = -\dot{m}_k \Psi_k. \quad (14)$$

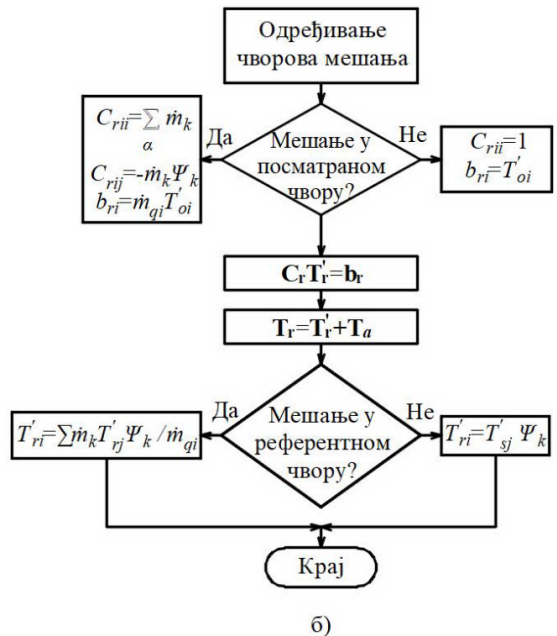
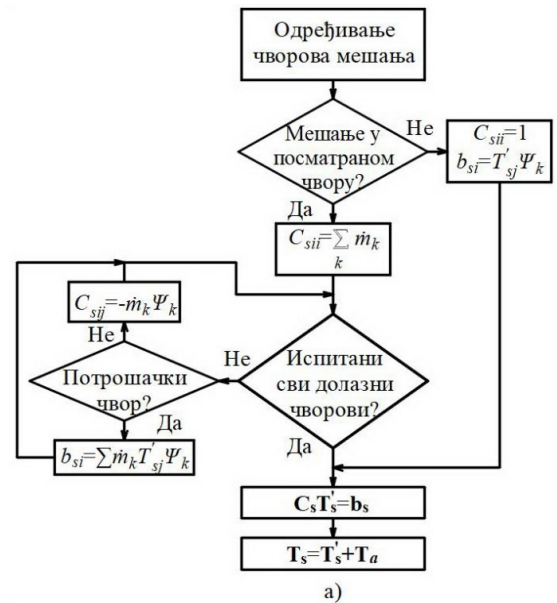
У супротном, ако се у напојном чвору налази извор топлоте тада важи:

$$b_{si} = \sum_k \dot{m}_k T'_{sj} \Psi_k. \quad (15)$$

5. Када се реши једначина (11) потребно је одредити температуру напојне воде у сваком чвору, $\mathbf{T}_s = \mathbf{T}'_s + T_a$.

Ток алгорита за креирање матрице \mathbf{C}_s и вектора \mathbf{b}_s је приказан на Сл. 1 а).

Код повратне топлотне мреже потребно је одредити повратну температуру, T_r , за све чворове (како потрошачке



Слика 1. Алгоритам одређивања матрице \mathbf{C} и вектора \mathbf{b} у: а) напојној мрежи, б) повратној мрежи.

тако и производне). И за повратну топлотну мрежу важе иста правила, једначине (9) и (10). Израчунавање повратних температура се врши помоћу следећег израза:

$$\mathbf{C}_r \mathbf{T}'_r = \mathbf{b}_r, \quad (16)$$

где се матрице \mathbf{C}_r и \mathbf{b}_r одређују помоћу следећег алгорита.

1. Сваки чвор који у матрици $-\mathbf{A}$ има макар један позитиван број представља чвор мешања у повратној мрежи централног грејања.
2. За сваки чвор i пронаћи напојни чвор j који је на другом крају цеви k .
3. Ако у посматраном чвору не долази до мешања воде елементи матрице \mathbf{C}_r и вектора \mathbf{b}_r су:

$$\begin{aligned} C_{rii} &= 1, \\ b_{ri} &= T_{oi}'. \end{aligned} \quad (17)$$

4. Ако у посматраном чвору долази до мешања тада се елементи матрице \mathbf{C}_r и вектора \mathbf{b}_r одређују на следећи начин:

$$\begin{aligned} C_{rii} &= \sum_{\alpha} \dot{m}_{\alpha}, \\ C_{rij} &= -\dot{m}_{\alpha} \Psi'_{\alpha}, \\ b_{ri} &= \dot{m}_{\alpha} T_{oi}', \end{aligned} \quad (18)$$

где α представља скуп свих цеви које излазе из чвора i .

5. Када се реши једначина (15) потребно је одредити температуру повратне воде у сваком чвору, $\mathbf{T}_r = \mathbf{T}_r' + \mathbf{T}_a$.
6. Ако не долази до мешања воде у референтном чвору повратна температура извора се рачуна помоћу следећег израза:

$$T_{ri}' = T_{sj}' \Psi'_{\alpha}, \quad (19)$$

у супротном, ако долази до мешања воде повратна температура се рачуна помоћу следећег израза:

$$T_{ri}' = \frac{\sum \dot{m}_{\alpha} T_{sj}' \Psi'_{\alpha}}{\dot{m}_{\alpha}}. \quad (20)$$

Ток алгоритма за креирање матрице \mathbf{C}_s и вектора \mathbf{b}_s је приказан на Сл. 1 б).

III. ТОПЛОТНИ ИЗВОРИ

Електроенергетска и топловодна мрежа су повезана преко спојних компоненти (СНР, топлотне пумпе, бојлери и циркулационе пумпе). За потребе моделовања у даљем тексту ће бити наведене само најпотребнији подаци за сваку од поменутих компоненти.

A. СНР јединице

Разматраће се два типа СНР јединица: гасна турбина и парна турбина. Код гасне турбине произведена електрична снага, $P_{СНР}$ (MWe), и корисна топлотна снага, $\Phi_{СНР}$ (MWt), су повезане помоћу следећег израза:

$$c_m = \Phi_{СНР} / P_{СНР}. \quad (21)$$

За задату потрошњу горива однос између испоручене топлотне и електричне снаге, Z U (3.8, 8.1), код екстракционих парних турбина је дат следећим изразом:

$$Z = \Phi_{СНР} / (\eta_e F_{in} - P_{СНР}), \quad (22)$$

где је η_e ефикасност екстракционе јединице у погледу потрошње горива, F_{in} (MW) количина утрошеног горива.

B. Топлотне пумпе

Топлотне пумпе користе мањи део електричне енергије да би преузету топлотну енергију из околног простора подигле на виши температурни ниво, уз утрошени механички рад. Ефикасност топлотне пумпе, COP , се изражава као однос испоручене топлотне снаге Φ_{tp} (MWt) и утрошене електричне снаге P_{tp} (MWe), односно $COP =$

Φ_{tp} / P_{tp} . Ова вредност варира током године и зависи од тренутне спољашње температуре ваздуха, односно воде или тла, у зависности од извора који користи топлотна пумпа.

C. Циркулационе пумпе

Циркулационе пумпе омогућавају принудно струјање флуида у даљинском систему грејања, односно савлађивање свих отпора у систему и дистрибуцију флуида до потрошача и назад до извора топлоте. Потребна електрична снага, P_p (MW), пумпе се рачуна помоћу следећег израза:

$$P_p = \dot{m}_p g H_p / (10^6 \eta_p), \quad (23)$$

где је \dot{m}_p (kg/s) масени проток воде кроз пумпу, η_p степен корисности пумпе. H_p (m) представља висинску разлику, у метрима воденог стуба, коју пумпа треба да савлада и она се рачуна помоћу следећег израза:

$$H_p = 2 \sum_{i \in \beta} h_{fi} + H_c, \quad (24)$$

где је H_c (m) минимална дозвољена висинска разлика, а β скуп деоница на путањи са највећим падом притиска.

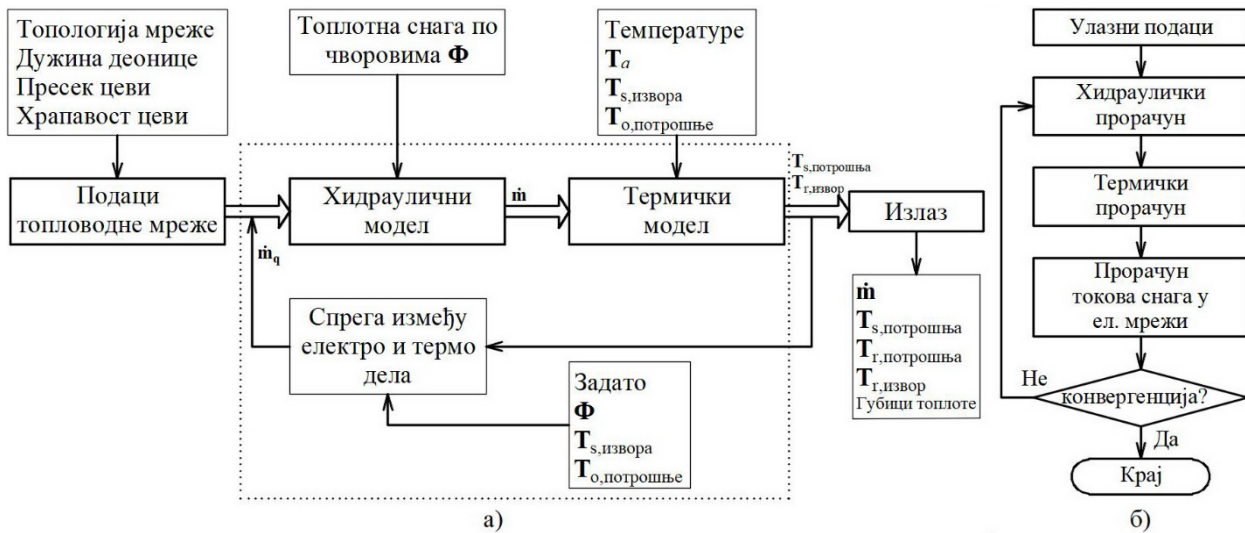
IV. МЕТОДОЛОГИЈА ПРОРАЧУНА

Прорачун за топловодну мрежу се заснива на примени једначина које су описане у другом делу. Сам прорачун је могуће извршити помоћу декомпонованог хидро-термичког прорачуна, као што је приказано на Сл. 2 а). У овом раду ће се за анализу дистрибутивне мреже користити симетричан прорачун токова снага (*forward backward sweep*) [12]. Алгоритам обједињеног прорачуна токова снага (термички и електро) је приказан на Сл. 2 б).

V. РЕЗУЛТАТИ

Описани алгоритам за прорачун у мрежи даљинског грејања је тестиран на мрежи која је приказана на Сл. 3. За електродистрибутивну мрежу коришћена је стандардна IEEE 33 тест дистрибутивна мрежа [13]. Неопходни подаци о мрежи даљинског грејања за хидраулички и термички прорачун су дати у табелама 1 и 2.

Веза између електродистрибутивне мреже и мреже даљинског грејања се остварује преко две топлане, од којих је једна гасна СНР јединица смештена у чвору 1, а друга представља комбинацију парне СНР јединице, топлотне и циркулационе пумпе (смештена у чвору 4). Са становишта производње електричне енергије обе електране су идентичних снага од по 1 MW. Усвојена је претпоставка да се током рада СНР јединице одржавају на максималној снази у погледу електричне енергије. За гасну електрану усвојен је следећи однос између топлотне и електричне енергије, $c_m = 1.3$. Потребни подаци за други топлотни генератор су: $Z = 5$, $\eta_e = 0.6$, $F_{in} = 2.4$ (MW), $\alpha = 0.4$, $COP = 4.5$, $\eta_p = 0.65$, $H_c = 100$ m. Са α је означен удео електричне снаге који се узима са излаза СНР јединице у сврху добијања додатне топлотне снаге коришћењем топлотне пумпе. Усвојена је претпоставка да су температуре напојне воде (T_s) оба извора 100 °C, а повратна температура (T_o) свих потрошачких чворова

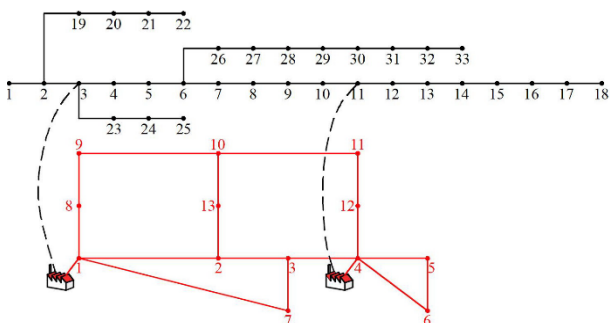


Слика 2. а) Хидро–термички прорачун, б) Обједињени прорачун токова снага.

50 °C. За амбијенталну температуру усвојена је вредност од $T_a = 10$ °C.

За базно стање електродистрибутивне мреже, када се напајање врши само из преносне мреже преко чвора број 1, при напону референтног чвора од 12.66 kV, губици активне снаге износе 202.68 kW, док је најнижи напон у мрежи износи $V_{18} = 11.56$ kV. Када постоји веза између електродистрибутивне мреже и мреже даљинског грејања, уз усвојену претпоставку да оба извора производе по 1 MW, због постојања производње унутар саме примарне дистрибутивне мреже губици активне снаге ће се смањити за 56.04%, односно износиће 113.60 kW. Ова локална производња је позитивно утицала и на напонске прилике тако да најнижа вредност напона сада износи $V_{33} = 11.85$ kV. Треба напоменути да је излазну електричну снагу друге СНР јединице неопходно умањити за потрошњу циркулационе пумпе која одржава потребни проток воде у мрежи централног грејања.

Масени проток кроз дистрибутивну мрежу даљинског система грејања, за случај када постоји само један извор и када су електродистрибутивна мрежа и мрежа даљинског грејања распрегнуте, су приказани у табели 3 заједно са температурама напојне и повратне воде сваког чвора мреже даљинског грејања. У табели 4 приказане су промене које настају услед присуства још једног топлотног извора.



Слика 3. Тест пример електродистрибутивне и топловодне мреже

ТАБЕЛА I. ПАРАМЕТРИ МРЕЖЕ ДАЉИНСКОГ ГРЕЈАЊА

Број цев	Почетни чвор	Крајњи чвор	D (m)	L (m)	ε (mm)
1	1	2	0.250	200	0.025
2	2	3	0.200	80	0.025
3	1	7	0.050	352	0.025
4	3	7	0.050	112	0.025
5	3	4	0.500	240	0.025
6	4	6	0.050	328	0.025
7	4	5	0.150	96	0.025
8	5	6	0.125	248	0.025
9	1	8	0.080	160	0.025
10	8	9	0.050	104	0.025
11	9	10	0.050	208	0.025
12	10	13	0.150	200	0.025
13	2	13	0.300	48	0.025
14	10	11	0.100	120	0.025
15	11	12	0.080	208	0.025
16	4	12	0.100	280	0.025

ТАБЕЛА II. МАСЕНИ ПРОТОЦИ ЗА СВАКИ ЧВОР

Чвор	\dot{m}_q (kg/s)	Чвор	\dot{m}_q (kg/s)	Чвор	\dot{m}_q (kg/s)
2	2.96	6	27.03	10	28.29
3	4.37	7	1.96	11	26.67
4	7.38	8	4.65	12	7.68
5	9.16	9	5.85	13	3.37

Могућност даљег развоја се огледа у омогућавању регулације излазних снага (како топлотне тако и електричне) СНР јединица у циљу моделовања острвског рада дистрибутивног система. Даљи кораци у развоју се огледају у повезивању таквог прорачуна са прорачуном токова снага у несиметричним дистрибутивним мрежама чиме би се омогућило детаљно и прецизно моделовање микро мрежа. Додавањем прорачуна токова флуида који могу да се компресују (гас, водоник) употпунила би се енергетска слика и омогућио би се широк спектар анализа.

VI. ЗАКЉУЧАК

У овом раду је представљен начин моделовања компонената мреже даљинског система грејања. Извршено је повезивање електродистрибутивне мреже и мреже

ТАБЕЛА III. ЈЕДАН ТОПЛОТНИ ИЗВОР

Број цеви (чвора)	\dot{m} (kg/s)	T_s (°C)	T_r (°C)
1	119.00	100.0000	49.9560
2	62.23	99.9928	49.9652
3	1.53	99.9873	49.9536
4	0.43	99.9695	49.9614
5	57.43	99.9574	49.9860
6	2.19	99.8676	50.0000
7	34.00	98.9921	50.0000
8	24.84	99.9227	49.9775
9	8.84	99.7095	50.0000
10	4.19	99.9721	49.9876
11	1.66	99.8990	50.0000
12	50.44	99.8833	49.9713
13	53.81	99.9890	49.9813
14	20.49		
15	6.18		
16	13.86		

ТАБЕЛА IV. ДВА ТОПЛОТНА ИЗВОРА

Број цеви (чвора)	\dot{m} (kg/s)	T_s (°C)	T_r (°C)
1	111.82	100.0000	49.9533
2	55.28	99.9924	49.9630
3	1.43	99.9862	49.9478
4	0.53	100.0000	49.9560
5	50.38	99.9879	49.9860
6	2.19	99.8981	50.0000
7	34.00	98.9911	50.0000
8	24.84	99.9223	49.9774
9	8.79	99.7095	50.0000
10	4.14	99.9715	49.9875
11	1.71	99.9055	50.0000
12	50.21	99.9155	49.9719
13	53.58	99.9885	49.9812
14	20.20		
15	6.47		
16	14.15		

даљинског грејања помоћу СНР јединица у циљу сагледавања шире енергетске слике. Описани алгоритам обједињеног распрегнутог прорачуна токова снага је тестиран на стандардној симетричној IEEE тест мрежи и упростијеној мрежи даљинског система грејања.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] H. Farhangi, "The path of the smart grid," IEEE Power and Energy Magazine, vol. 8, no. 1, pp. 18–28 2010.
- [2] P. C. Del Granado, Z. Pang and S. W. Wallace, "Synergy of smart grids and hybrid distributed generation on the value of energy storage," Appl Energy, vol. 170, pp. 476–488, 2016.

- [3] J. Driesen and R. Belmans, "Distributed generation: challenges and possible solutions," 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 18–22 June 2006, Montreal Canada.
- [4] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. E. Thorsen, F. Hvelplund, "4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems," Energy, vol. 68, pp. 1–11, 2014.
- [5] M. Geidl and G. Andersson, "Optimal power flow of multiple energy carriers," IEEE Power Systems, vol. 22, no. 1, pp. 145–155, 2007.
- [6] T. Roskilly, P. C. Taylor and J. Yan, "Energy storage systems for a low carbon future – in need of an integrated approach," Appl Energy, vol. 137, pp. 463–466, 2015.
- [7] Y. Kitabayev, J. Moriarty and P. Mancarella, "Stochastic control and real options valuation of thermal storage-enabled demand response from flexible district energy systems," Appl Energy, vol. 137, pp. 823–31, 2015.
- [8] M. Fedorov, "Parallel Implementation of a Steady State Thermal and Hydraulic Analysis of Pipe Networks in OpenMP," Parallel Processing and Applied Mathematics, Wroclaw, Poland, September 13–16 2009.
- [9] B. E. Larock, R. W. Jeppson and G. Z. Watters, Hydraulics of pipeline systems, 1st ed. CRC Press, 1999.
- [10] G. P. Henze and A. G. Floss, "Evaluation of temperature degradation in hydraulic flow networks," Energy and Buildings, vol. 43, no. 8, pp. 1820–1828, 2011.
- [11] D. Clamond, "Efficient resolution of the Colebrook equation," Industrial & Engineering Chem Research, vol. 48, no. 7, pp. 3665–3671, 2009.
- [12] D. Shimohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen and G. X. Luo, "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks," IEEE Power Systems, vol. 3, no. 2, pp. 753–762, 1988.
- [13] M.E. Baran and F.F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," IEEE Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1401–1407, 1989.

ABSTRACT

Energy systems at district/urban level are getting more complex and diversified from time to time. Different energy carriers are coupled with each other to meet various types of energy demands. The conventional way of analyzing energy networks independently does not reflect the true nature of the coupled networks. One of such coupled multi-carrier energy system is the combination of district heating and electricity networks. Combined Heat and Power (CHP) units, heat pumps and electric boilers creates linkages between electricity and heat networks. In this paper decomposed electrical-hydraulic-thermal calculation techniques is presented.

INTEGRATED ANALYSIS OF ELECTRICITY AND DISTRICT HEATING NETWORK

Darko Šošić, Aleksandar Savić, Goran Dobrić, Tamara Bajc