

Definicija procesov in pripadajočih strategij v hladilni tehniki nakupovalnih središč za optimizacijo stroškov porabe električne energije

Špela Vidrih¹, Iztok Humar²

^{1,2} Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
E-pošta: spela.vidrih@gmail.com

Definition of processes and strategies in cooling technique of shopping centers for optimization of electric energy consumption

The increasing costs of electric energy are the main reason an efficient energy use has lately become one of the primary goals in the industrial field. Shopping centers consume 3 % of the worldwide electric energy produced, which is the reason major attention has lately been paid to their manners concerning energy use.

This paper provides classification of electric energy consumers in cooling technique of an existing shopping center in Slovenia and definition of processes as well as of the belonging strategies which can significantly reduce the electric energy consumption operating costs. Besides listing traditional strategies the focus of this paper are modern methods, especially integration of Demand Response activities in the field of industrial cooling technique.

1 Uvod

Učinkovita raba električne energije (EE) postaja v sodobni družbi zaradi njene naraščajoče porabe, ekološke ozaveščenosti ter povečanega zavedanja o omejenosti energijskih virov in posledičnih rastočih cenah energije vse pomembnejša razvojno – raziskovalna tematika. Zaradi visokih stroškov, povezanih s porabo EE, predstavlja predvsem velikim podjetjem njena pametna raba enega najpomembnejših strateških ciljev.

Z gospodarskega vidika so pomembni tako učinkovita generacija, prenos, razdeljevanje kot izraba EE, pametna raba na vseh segmentih zniža potrebo po vlaganjih v omrežno infrastrukturo, zaradi česar so lahko končno tudi odjemalci deležni nižjih cen. Težave z rastočo porabo EE v nasprotju s tradicijo aktivnosti upravljanja s porabo (ang. Demand Side Management, DSM) ter aktivnosti prilagajanja odjema (ang. Demand Response, DR) rešujejo na strani bremen in tako predstavljajo učinkovito rešitev, ki pripomore elektroenergetskemu sistemu v več pogledih: pomagajo pri oblikovanju pametnega omrežja, liberalizaciji trga z EE, ponujajo nove možnosti krmiljenja in regulacije, nižajo stroške novih vlaganj v omrežno infrastrukturo in višajo izvedljivost decentralizacije energijskih virov [1], [2]. Njihov temelj je nagrajevanje pametne rabe EE,

katere splošna cilja sta znižanje porabe ter zagotavljanje časovno bolj konstantnih bremen. Aktivnosti DSM zajemajo predvsem načrtovanje in vgradnjo vseh ukrepov, zasnovanih za izboljšanje energetske učinkovitosti in prilagajanja porabe stanju elektroenergetskega sistema ter so bodisi finančne bodisi vzgojne narave. Aktivnosti DR so v nasprotju s širokim pojmom DSM definirano ožje in pomenijo izključno ukrepe za spodbujanje odjemalcev k povečani prožnosti pri porabi EE oz. k spremembi njenega vzorca tako v časovnem kot v količinskem smislu. Dejavnosti so predvsem tržno naravnane, odjemalcu je dana možnost prihranka denarja v zameno za prilagojen odjem. Aktivnosti DSM in DR niso univerzalne, določijo in prilagodijo se namreč upoštevajoč ponujeni potencial, ki ga med drugim določajo tudi vrsta obrata in z njim povezane možnosti upravljanja, geografska odvisnost ter tehnična izvedba.

Zaradi visokega deleža porabe EE v nakupovalnih središčih, ki znaša kar 3 % celotne proizvedene energije, je učinkoviti in pametni rabi energije v tovrstnih zgradbah posvečeno vse več pozornosti [3]. Visoke možnosti prihrankov se kažejo predvsem v optimizaciji delovanja pripadajočih hladilnih sistemov, poleg dejstva, da so v nakupovalnih središčih največji porabniki energije, namreč predstavljajo močno prilagodljiva električna bremen. Optimalno upravljanje slednjih dosežemo z nadgradnjo obstoječih krmilnih sistemov z naprednejšimi, ki omogočijo stalni nadzor, regulacijo ter hrambo izmerjenih vrednosti parametrov hladilnih sistemov. Hladilne sisteme več fizično oddaljenih nakupovalnih središč je nadalje smiselno povezati v centralni nadzorni sistem, ki predstavlja z vidika elektroenergetskega sistema zaključeno celoto.

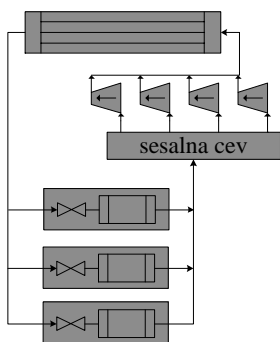
V prispevku opišem hladilno tehniko nakupovalnih središč, analiziram porabo EE znotraj njih ter definiram procese in pripadajoče strategije za optimizacijo operativnih stroškov porabe EE v hladilni tehniki, kjer izpostavim visok potencial sodelovanja hladilne tehnike pri izvajanju aktivnosti DSM in DR.

2 Hladilna tehnika v nakupovalnih središčih

Temeljni funkciji hladilnega sistema sta odstranjevanje toplote iz hladnega prostora ter njeno odvajanje v toplejšo okolico. Omenjena izmenjava toplote poteka med uparjalnikom v hladnem prostoru ter

kondenzatorjem v toplejši okolici, in sicer s pomočjo parno – kompresijskega krožnega procesa, za delovanje katerega sta dodatno potrebna še kompresor ter ekspanzijski ventil.

Hladilni sistemi v nakupovalnih središčih služijo razstavi ter hrambi hitro kvarljivih živil z namenom čim višje prodaje. V grobem skrbijo za dva temperatura nivoja, ki ju imenujemo pozitivni ter negativni nivo. Prvi nivo vzdržuje temperaturo ohlajenih izdelkov med po živilskih standardih določenima 1 °C in 14 °C, drugi pa skrbi za zamrznjene izdelke, katerih temperatura ne sme preseči -18 °C. Izdelki se nadalje nahajajo bodisi v pokončnih vitrinah, v katere segajo potrošniki s strani, bodisi v ležečih krstah, v katere dostopamo z zgornje strani. V nadaljevanju jih skupno imenujemo hladilni elementi, množico vseh hladilnih elementov enega nakupovalnega središča pa hladilni sistem. V velikih nakupovalnih središčih je navadno v uporabi centraliziran hladilni sistem, kar pomeni, da ima vsak od hladilnih elementov lastni uparjalnik in ekspanzijski ventil, poleg skupnih kondenzacijskih enot na strehi pa so fizično oddaljene tudi skupine skupnih kompresorjev, ki se nahajajo v strojnici. Shemo tovrstnega sistema prikazuje Slika 1.



Slika 1: Shema centraliziranega hladilnega sistema

2.1 Analiza porabe EE v nakupovalnih središčih

Rezultati raziskav s Švedske in ZDA kažejo, da predstavlja poraba EE v nakupovalnih središčih od tri do štiri odstotke celotne svetovne porabe EE, podobni rezultati veljajo tudi za Slovenijo [4]. Pretežno sestavljajo omenjen delež pripadajoča hladilna tehnika, razsvetljava in sistemi HVAC. Sledeč diagram prikazuje relativne prispevke k skupni porabi nakupovalnega centra na Švedskem.



Slika 2: Sestava porabe EE v enem od nakupovalnih centrov na Švedskem

Razvidno je, da odpade izmed naštetih največji del, in sicer 47 %, na hladilno tehniko. Med ostale porabnike spadata npr. pisarniška oprema in kuhinja.

Nadaljevanje prispevka se nanaša na področje hladilne tehnike. Omogočen nam je bil vpogled v enega izmed slovenskih nakupovalnih središč v Ljubljani z vgrajenim centraliziranim hladilnim sistemom, kjer je skupno 86 hladilnih elementov, od česar jih pripada 64 plus in 22 minus nivoju.

Porabo EE v hladilni tehniki nakupovalnega središča razdelim na:

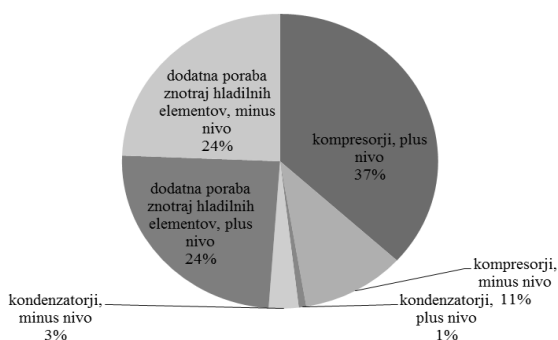
- neposredno porabo EE za hlajenje in
- dodatno porabo EE znotraj hladilnih elementov.

Prvi del ustreza porabi energije kompresorjev in kondenzatorjev. Prva pomeni energijo, ki jo porabijo kompresorji v strojnici za povišanje tlaka hladilne tekočine. V izbranem nakupovalnem središču znaša instalirana električna moč kompresorjev 173,5 kW na plus nivoju ter 50,0 kW na minus nivoju, torej skupno 223,5 kW. Kondenzator kot samostojen element na električno napajanje neposredno ni priključen. Temu navkljub definiramo porabo energije kondenzatorjev, ki dejansko ustreza porabi EE kondenzatorjem dodanih ventilatorjev, ki vpihujejo zrak skozi rebra kondenzatorjev ter tako povišajo hitrost izmenjave toplote. Vsak od kondenzatorjev na strehi nakupovalnega središča ima več ventilatorjev, pri čemer je število odvisno od zahtevane kapacitete, oblike in načina delovanja kondenzatorja. V izbranem nakupovalnem središču znaša instalirana električna moč kondenzatorjev, ki so del plus nivoja, 10,8 kW, kondenzatorjev, ki so del minus nivoja, pa 3,6 kW, torej skupno 14,40 kW.

Poraba energije znotraj hladilnih elementov se ne nanaša neposredno na proces hlajenja, temveč na opremo, dodano hladilnim elementom bodisi s ciljem višje prodaje bodisi zaradi izboljšave delovanja hladilnega sistema. Razdelim jo na porabo energije pripadajoče razsvetljave, porabo energije vgrajenih ventilatorjev ter porabo energije električnih grelcev. Medtem ko omogoča razsvetljava boljšo vidnost in izpostavljenost izdelkov v trgovini ter ventilatorji izboljšano toplotno izmenjavo, imajo električni grelci dve funkciji. Prva je preprečevanje rošenja stekla fizično zaprtih hladilnih elementov za ohranjanje ugodja kupcev, po začetku nameščanja steklenih vrat na prej odprte hladilne elemente so se namreč začele težave z ohranjanjem vidljivosti skozi vrata, zaradi česar je prodaja razstavljenih izdelkov padla. Električni grelci, ki omenjeno preprečujejo (Anti-Sweat heaters - ASH), so navadno moči med 100 in 200 W za ena vrata, njihova relativno nova alternativa je uporaba nanosa AFF (ang. Anti-Fog Film). Druga funkcija električnih grelcev znotraj hladilnih elementov je taljenje ledu, akumuliranega na uparjalnikovem rešetju. Formacija ledu je v hladilni tehniki poznan in močno neželen pojav, do katerega pride v primeru nižje temperature uparjalnika od ležišča in prehajanja relativno vlažnega zraka [5]. Nastali led deluje na hladilni sistem kot

toplotna izolacija, ovira namreč pretok hladnega zraka ter tako zmanjšuje učinek toplotne izmenjave. Za preprečevanje nabiranja ledu je potrebno redno odtajevanje, ki akumuliran led stali. Povprečno se hladilne naprave v nakupovalnih središčih odtajujejo štiri do šestkrat dnevno, en cikel odtajevanja pa traja približno eno uro. Obstajajo trije načini izvajanja odtajevanja. V primeru najpreprostejšega se dotok hladilne tekočine v uparjalnik prekine, ventilator pa vpihava toplejši okoliški zrak, ki nastali led stali. Obstajata tudi hitrejši metodi odtajevanja, in sicer prva z vročim plinom, ki ga usmerimo iz kompresorja v uparjalnik, ter druga z električnim odtajevanjem, kjer je za namen taljenja neželenega ledu v rešeto uparjalnika vgrajen električni grelec. V tem primeru se med procesom odtajevanja hladilni agregat dotičnega hladilnega elementa izklopi in vklopi električni grelec. Prvi opisan način odtajevanja, ki ga imenujemo tudi naravno odtajevanje, se v nakupovalnih središčih načeloma ne ali le redko uporablja. Najpogostejša, a hkrati energijsko najbolj potratna izvedba je izvedba z električnim grelcem. V nakupovalnem središču, do katerega podatkov imam dostop, so z namenom preprečevanja odtajevanja v večini uporabljeni električni grelci, le manjše število hladilnih elementov v plus nivoju uporablja naravno odtajevanje. Vsota instalirane električne moči razsvetljave in električnih grelcev v izbranem nakupovalnem središču znaša 115,5 kW za plus nivo in 115,1 kW za minus nivo, skupno torej 230,6 kW.

Skupna instalirana električna celotnega moč plus nivoja v izbranem nakupovalnem središču znaša 299,8 kW, celotnega minus nivoja pa 168,7 kW. Z namenom primerjave instaliranih moči posameznih porabnikov in nivojev v hladilni tehniki v izbranem nakupovalnem središču izdelam Sliko 3.



Slika 3: Klasifikacija porabnikov EE v izbranem nakupovalnem središču

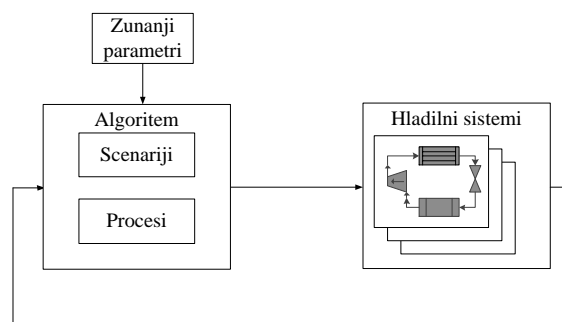
Razvidno je, da odpade na kondenzatorje na strehi le majhen del instalirane moči, medtem ko se preostala večina skoraj enakomerno razdeli med skupino kompresorjev in razsvetljavo, ventilatorje ter električne grelce znotraj hladilnih elementov. Instalirana moč plus nivoja je s skoraj dvema tretjinama nad močjo minus nivoja prevladujoča.

2.2 Operatersko vodenje hladilne tehnike

Vse napredne rešitve za učinkovito upravljanje hladilne tehnike zahtevajo poglobljeno razumevanje delovanja vseh segmentov hladilnega sistema, pri čemer igra

sprotno zajemanje parametrov iz hladilnih sistemov in okolja ter možnost celovitega nadzora nad ključnimi elementi hladilnega sistema temeljno vlogo. Tovrstno interakcijo s hladilno tehniko omogoča povezava fizično distribuiranih hladilnih sistemov več nakupovalnih središč v skupno, predvsem z vidika elektroenergetskega sistema zaključeno celoto, ki jo je nadalje moč preko omrežja IP upravljati in nadzirati z oddaljenega centralnega strežniškega mesta. Celovita rešitev nadzora hladilne tehnike med drugim zajema krmilnike za nadzor temperatur, ekspanzijskih ventilov ter kompresorjev. Velja, da pripada vsakemu hladilnemu elementu svoj krmilnik za izvajanje kroženja ohlajenega zraka, za delovanje ventilatorjev ter nadzor odprtosti ekspanzijskega ventila glede na merjeno temperaturo. Krmilniki so z namenom možnosti sinhronizacije medsebojno povezani z ustreznim telekomunikacijskim protokolom, ki nadalje omogoča dostop in nadzor s centralnega računalnika.

Množica hladilnih sistemov več nakupovalnih središč je torej upravljanja z oddaljenega nadzornega sistema. Ta vsebuje matematično – fizikalni model vseh hladilnih sistemov, ki povzema njihove bistvene lastnosti ter pozna odvisnost tako vplivnih kot krmiljenih parametrov in njihove meritve v preteklem ter realnem času. Znotraj centralno–nadzornega sistema se na podlagi definiranih procesov in pripadajočih scenarijev vršijo optimizacijski algoritmi, ki vsebujejo ukaze v smislu učinkovite rabe energije ter z njo povezanih stroškov. Shemo delovanja centralno nadzornega sistema prikazuje Slika 4.



Slika 4: Shematičen prikaz delovanja centralnega nadzornega sistema

3 Strategije za optimizacijo stroškov porabe EE v hladilni tehniki

Z namenom definicije strategij oz. scenarijev, smiselnih za optimizacijo stroškov hladilne tehnike v nakupovalnih središčih najprej definiram procese, na katere se bodo scenariji nanašali, ti so sledeči: hlajenje, odtajevanje, razsvetljava v hladilnih elementi in preprečevanje rošenja na vratih hladilnih elementov.

Strategije, katerih vgradnja je enostavna in tehnično nezahtevna, poimenujem tradicionalne strategije, modernejšje, ki temeljijo na izvajanju aktivnosti DSM in DR, pa definiram kot napredne. Skupno vsem je, da bodisi posredno ali neposredno omogočajo prihranke v stroških za porabo EE v hladilni tehniki. Predlagane procese in strategije povzema Tabela 1.

Tabela 1: Tabela predlaganih strategij za vsakega od procesov

Proces	Tradicionalne strategije	Napredne strategije
Hlajenje	- kakovostna zasteklitev hladilnih elementov, - pokrivanje delikatese v času izven obratovalnih ur, - odpiranje in zapiranje elementov upoštevajoč senzorje premikov, - premaz strehe z močno odbojno barvo;	- časovno zamikanje delovanja kompresorjev ob upoštevanju termične kapacitete živil in živilskih standardov, izkoriščanje večtarifnih sistemov, - krmiljenje delovanja ekspanzijskega ventila na osnovi cenovnih signalov EE, - ponujanje spremembe odjema ob upoštevanju živilskih standardov;
Odtajevanje	- uporaba metode odtajevanja z vročim plinom;	- časovno prerazporejanje ciklov odtajevanja glede na ceno EE, - desinhronizacija delovanja električnih grelcev z namenom zmanjšanja vršne vrednosti porabe EE, optimizacija števila, trajanja in zaporedja ciklov;
Razsvetljava znotraj hladilnih elementov	- nadomestitev fluorescentnih svetil s tehnologijami LED (Light Emitting Diode), FO (Fiber Optic) ali CCFL (Cold Cathode), - izklop v času izven obratovalnih ur, - regulacija razsvetljave upoštevajoč senzor svetlosti;	-
Preprečevanje rošenja na vratih hladilnih elementov	- izklop električnih grelcev v času izven obratovalnih ur, - delovanje električnih grelcev upoštevajoč senzor vlage, - odstranitev električnih grelcev in uporaba nanosa AFF na notranji strani vrat;	-

V nadaljevanju pojasnim izbor nekaterih strategij.

V primeru metode odtajevanja z električnimi grelci nastajajo poleg porabe EE grelca tudi toplotne izgube zaradi segrevanja hladnega prostora, hladilnih palic in cevi, ki zato zahtevajo še dodatno hlajenje, in so višje od porabe EE kompresorjev, katerih delovanje je v primeru izvedbe z vročim plinom potrebno tudi med odtajevanjem za zagotavljanje dovolj vročega plina. Z vidika obratovalnih stroškov je tako bistveno ugodnejši način odtajevanja z vročim plinom, katerega se zaradi znatno višjih investicijskih stroškov poslužujejo le redka nakupovalna središča. Začetni stroški so v primeru odtajevanja z vročim plinom višji zaradi potrebe po izvedbi dodatnega razvoda cevi.

Časovno zamikanje delovanja kompresorjev in krmiljenje delovanja ekspanzijskega ventila na osnovi cenovnih signalov sta omogočena zaradi toplotne vztrajnosti živil, živila je tako smiselno ob časovnih intervalih nižjih cen EE ohladiti do najnižje dovoljene temperature, zaradi česar ob časovnih intervalih višjih cen EE hlajenje nekaj časa ni potrebno. Nakupovalno središče lahko operaterju omrežja ali ponudniku EE ponudi tudi spremembo odjema bodisi za podporo izvajanju sistemskih storitev bodisi v primeru preobremenjenosti omrežja ali nudenju terciarne rezerve delovne moči, kar pomeni, da jima omogoči daljinsko upravljanje bremen. Podrobnejše zahteve se definirajo individualno. V vsakem primeru je denarno nagrajena že pripravljenost. Podobno kot za hlajenje velja tudi za izvajanje ciklov odtajevanja v primeru uporabe grelcev, razlika je v manj strogih predpisih, zamik odtajevanja ima namreč na varnost hrane manjši vpliv.

Sodelovanja razsvetljave znotraj hladilnih elementov in delovanja grelcev za preprečevanje rošenja na vratih

pri izvajanju aktivnosti DR zaradi relativno nižjih moči ne izpostavim, je pa njuna vključitev ravno tako mogoča in smiselna.

4 Zaključek

V prispevku predstavim tradicionalne in naprednejše pristope k znižanju operativnih stroškov porabe EE v hladilni tehniki nakupovalnih središč, pri čemer se osredotočim tudi na aktivnosti DSM in DR. Izvajanje slednjih omogoča opisan operaterski pristop k vodenju, ki ima zmožnost komunikacije z elektroenergetskim sistemom ter tako tudi prilagajanja njegovemu trenutnemu stanju.

Literatura

- [1] Xiang-ting C., Yu-hui Z., Wei D., Jie-bin T., Yu-xiao G., »Design of intelligent Demand Side Management System Respond to Varieties of Factors«, 2010 China International Conference on Electricity Distribution
- [2] Logenthiran T, Srinivasan D, Zong Shun T, »Multi-Agent System for Demand Side Management in Smart Grids«, Singapore, December 2011, IEEE PEDS 2011
- [3] Green T., Kinnaert M., Razavi-Far R., Izadi-Zamanabad R., Niemann H, »Optimising performance in steady state for a supermarket refrigeration system«, 20th Mediterranean Conference on Control & Automation, Barcelona, Spain, 2012
- [4] M. Umberger, I. Humar, Energy savings of refrigerators in shopping centers with adaptive control and realtime energy management systems, Przeglad Elektrotechniczny, R.88 NNNR 6/2012
- [5] S.A. Tassou in D. Datta, "Influence of Supermarket Environmental Parameters on the Frosting and Defrosting of Vertical Multideck Display Cabinets," ASHRAE Transaction 105, str. 491-496, 1999