

Ing. Jiří CIGLER, Ph.D.
Feramit Cybernetics s.r.o.

Zkušenosti s řízením výkonu tepelného čerpadla podle dynamické ceny energie

Experience with Control of Heat Pump Output According to Dynamic Energy Price

Recenzent
prof. Ing. Jiří Bašta, Ph.D.

V příspěvku jsou shrnuty poznatky spojené s implementací algoritmů prediktivního řízení hybridního GEOTABS systému s časově proměnnou cenou silové energie. Na reálném případě je ukázáno, že metoda přímého řízení výkonu tepelného čerpadla podle dynamické ceny dokáže přinést finanční úsporu, nicméně pro plné využití potenciálu je nutné zajistit dostatečnou akumulaci u všech typů odběrů energie – u TABS systému z podstaty nalezeme velkou kumulační schopnost, problém s akumulací ale vyvstává u systémů VZT a TV.

Klíčová slova: prediktivní řízení, tepelné čerpadlo, akumulace tepla, úspory

The contribution summarizes findings regarding implementation of predictive control algorithms of a hybrid GEOTABS system with time variable price of electric power. The real case study demonstrates that the direct control of the heat pump output according to the dynamic price can bring financial savings. However, for the full utilization of the potential, it is necessary to ensure sufficient accumulation for all types of energy consumption – the TABS system has high storage ability from its nature, yet there arises a problem with accumulation for HVAC and DHW systems.

Keywords: predictive control, heat pump, heat accumulation, savings

ÚVOD

Vyšší integrace obnovitelných zdrojů energie (OZE) a tím způsobený vyšší podíl OZE v energetickém mixu celé distribuční sítě, lokálního microgridu (v našich podmínkách obvykle nazývaném lokální distribuční soustava), nebo lokálně u koncového zákazníka, s sebou přináší vyšší nároky na řízení výroby a spotřeby na dané úrovni distribuční sítě. Je to zejména z důvodu nestálosti výkonu těchto zdrojů nebo spotřebičů. Algoritmy, které se starají o tvarování výkonu v čase, se souhrnně nazývají demand side management (DSM) algoritmy. Na každé úrovni distribuční sítě existují různé motivace, proč tyto algoritmy využívat. Například v situaci, kdy má koncový zákazník instalovanou fotovoltaickou elektrárnu (FVE) v kombinaci s tepelným čerpadlem a akumulací, může DSM algoritmus řešit úlohu minimalizace přebytků do sítě tak, že pokud by hrozily, dojde ke spuštění tepelného čerpadla a k akumulaci vyrobené tepelné energie. Modelů DSM je celá řada, nelze se dopouštět nesprávné generalizace a porovnání vůči regulaci dle HDO a je vždy nutné posoudit přínos DSM řízení jednotlivým zainteresovaným stranám. Přehledně jsou modely DSM popsány v [1].

V tomto článku se zaměříme na jinou oblast DSM, a to na přímé řízení zátěže ze strany obchodníka s elektrickou energií. Pro obchodníka s elektrickou energií představuje zákazník s možností posouvat spotřebu v čase prostředek k dorovnání nebo cílenému tvarování regulační odchylky. V našem případě obchodník připravuje odhad ceny odchylky. Tato informace vstupuje do algoritmu prediktivní regulace, která má kompletní informaci o stavech všech akumulací v budově a rozhoduje o tom, za jakou cenu budou teplo nebo chlad vyráběny.

V článku jsou ukázány výsledky z ověřování, které probíhalo v nové budově ZŠ Líbeznice, která má jako základní koncový prvek – otopnou plochu – systém aktivace betonu (někdy nazývaný BKT – Betonkern-temperierung, nebo také TABS – Thermally Activated Building Systems) a rychlý koncový prvek vzduchotechniku.

V článku je nejprve představena budova ZŠ Líbeznice, kde probíhalo měření přínosu DSM algoritmů. Dále je rozebrána struktura ceny elektrické energie. Následuje popis principu DSM regulace a vyhodnocení výsledků. V závěru se čtenář seznámí se shrnutím výhod a nevýhod DSM.

BUDOVA ZŠ LÍBEZNICE

Jedná se o novou budovu s 9 třídami, aulou a sborovnou. Podlahová plocha činí cca 1000 m². Budova byla otevřena v září 2015 a slouží pro více než 250 žáků. Zajímavostí je kromě moderního architektonického pojetí také systém vytápění a chlazení budovy. Hlavním zdrojem energie je tepelné čerpadlo (TČ) země-voda bez invertoru. Na primární straně je napojeno na 6 zemních vrtů. Tepelné čerpadlo funguje ve třech hlavních režimech:

- ☐ vytápění,
- ☐ pasivní chlazení (bez využití kompresoru TČ),
- ☐ aktivní chlazení s regenerací vrtů a využitím kompresoru TČ.

Vyrobené teplo z TČ je přiváděno do zásobníku ústředního vytápění (ÚT) a teplé vody (TV). Ze zásobníku ÚT jsou napájeny otopné plochy, kterými je v tomto případě systém TABS a výměníky decentralizovaných VZT jednotek. Podobné zapojení je u chlazení, kdy se vyrobený chlad dostá-



Obr. 1 ZŠ Líbeznice

Fig. 1 Elementary school Líbeznice

vá přes akumulární zásobník opět do TABS systému nebo chladicích výměníků VZT jednotek. Jedná se tedy o tzv. hybridní GEOTABS systém, což je systém, který má při správném návrhu potenciál dosáhnout stejného komfortu jako v případě jiných systémů vytápění a chlazení, ale s o 20 až 70 % nižšími nároky na primární energii [2].

STRUKTURA CENY ELEKTRICKÉ ENERGIE

Stávající struktura finální ceny elektrické energie sestává z několika složek, které můžeme jednoduše rozdělit na fixní položky a položky za odebranou energii. Fixní položkou je platba za rezervovaný příkon podle jmenovité proudové hodnoty instalovaného hlavního jističe před elektroměrem. Položky dané množstvím odebrané energie můžeme opět rozdělit na část fixní (tj. obchodník cenu neovlivní), která mimo jiné pokrývá daň za elektřinu, poplatek za odběrné a předávací místo (OPM), dopravu elektřiny a distribuci elektřiny, a na část silovou, která představuje platbu za samotnou elektrickou energii.

Pro vytápění s tepelným čerpadlem je speciální sazba ceny za elektrickou energii s označením D56d. Je to dvoutarifová sazba s operativním řízením doby platnosti nízkého tarifu po dobu 22 hodin. Dvoutarifová sazba znamená, že elektrická energie proudí ve vysokém tarifu (VT) nebo nízkém tarifu (NT). Operativní řízení znamená, že distributor energie může operativně měnit doby platnosti jednotlivých tarifů, ale musí zaručit splnění jistých omezení, jako jsou např. minimální souvislá doba trvání NT 1 hodina či maximální souvislá doba trvání VT 1 hodina. Více detailů ke struktuře tarifů lze nalézt na stránkách Energetického regulačního úřadu (www.eru.cz).

V našem případě uvažujeme konstantní distribuční sazbu, ale časově proměnnou cenu silové energie, kterou obchodník koncovému uživateli nabízí. Cena silové energie reflektuje aktuální situaci na trhu s elektrickou energií. Obchodník má představu o aktuální ceně odchylky nebo protiodchylky a může tuto informaci využít k řízení flexibilních zdrojů nebo spotřebičů. Historické ceny odchylek, resp. protiodchylek je možné získat na stránkách Operátora trhu s elektrickou energií (www.ote-cr.cz). Potenciální úspora na straně zákazníka je tedy pouze v kapitole nákladů za silovou energii.

PRINCIP DSM A POPIS VYHODNOCENÍ

V průběhu Vánoc 2016 došlo mezi 27. 12. 2016 a 2. 1. 2017 na ZŠ Líbeznice k ověření potenciálního přínosu regulace podle časově proměnné ceny. Toto období bylo zvoleno záměrně zejména z důvodu, aby případné porušení tepelného komfortu nikoho neomezilo.

Standardně je systém TABS regulován prediktivním regulátorem, který pracuje jak s předpovědí počasí, tak s matematickým popisem termodynamiky budovy a otopné soustavy. Bližší informace k regulátoru lze nalézt například v [3]. Pro účely experimentu došlo k drobným úpravám v matematické formulaci prediktivní regulace.

Zahrnutí signálu o dynamické ceně: cenový vektor s odhadovaným vývojem ceny na 8 h dopředu je přímo zanesen do ztrátové funkce

$$J = \min_Q \sum_{k=0}^{N-1} c_k \cdot \dot{Q}_k$$

kde je:

- c_k cena energie v periodě k ,
- $\dot{Q}_k$ výkon do TABS v periodě k ,
- N horizont predikce.

Noční a víkendové útlumy TABS systému byly zrušeny, protože v našem případě způsobují snížení flexibility. Očekávaný vývoj cen elektrické energie totiž není možné predikovat na časový úsek, který by odpovídal dynamice TABS systému (více než 24 h), a proto je nutné volit kratší horizont predikce odpovídající době, po kterou je předpověď ceny validní.

Výstupem prediktivního regulátoru je v pravidelných 30minutových periodách otopný/chladicí výkon, který má být v další periodě dodán. Nižší regulační smyčky se poté postarají o zajištění tohoto požadavku. To v praxi znamená, že podle aktuální teploty vratné vody je nastaven „setpoint“ na teplotu výstupní vody do okruhu TABS při konstantním průtoku teplotonosné látky. TČ ovšem vyrábí teplo i pro systém TV a VZT, které jsou řízeny nezávisle na TABS systému – jedná se v podstatě o řízení podle potřeby. TČ je vybaveno vlastní automatickou regulací, která umožňuje základní nastavování přes protokol BACnet. Je možné nastavit režim vytápění nebo chlazení a pak požadované teploty v jednotlivých zásobnících ÚV, TV, a chladu. Přímé spínání kompresoru podle cenového signálu tak není možné. Ve výsledku řídicí systém funguje například tak, že prediktivní regulátor vypočítá na 30 minut dodávku tepla do TABS systému, a pokud v zásobníku ÚV není dostatečné množství tepla, je sepnuto TČ. Tato skutečnost do jisté míry omezuje využití DSM algoritmů.

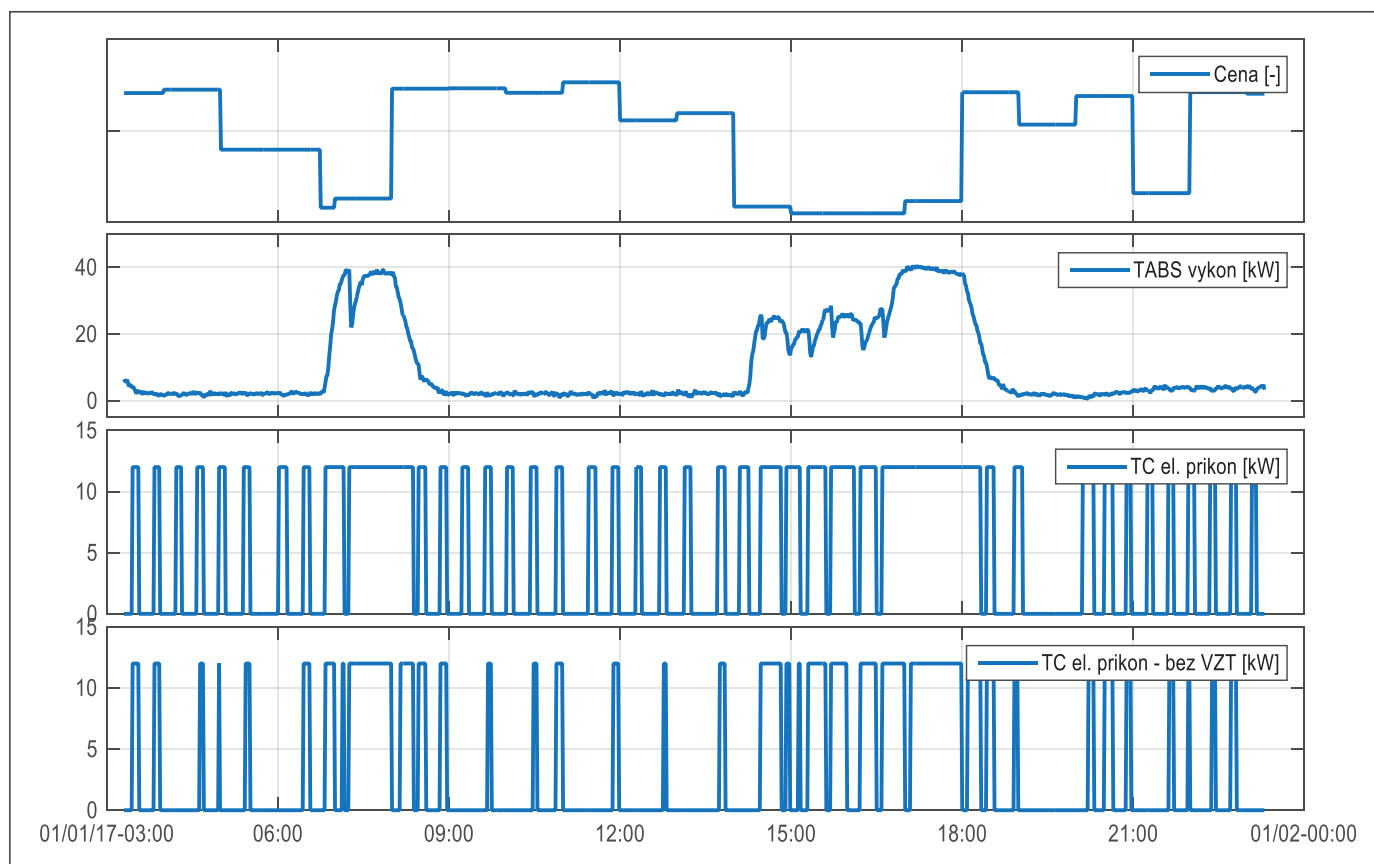
Dalším faktorem, který ovlivňuje provoz TČ, je odběr tepla systémem VZT. V současné chvíli bohužel nejsou systémy řízení TABS a VZT kompletně propojeny, a tak z pohledu TČ dochází k zcela nahodilému odběru energie ze zásobníku ÚT bez ohledu na aktuální cenu energie.

Pro přesné vyhodnocení přínosu řízení podle dynamické ceny je nezbytně nutné měření příkonu kompresoru TČ. Tato informace bohužel v současné době není k dispozici, neboť není instalováno průběhové měření distributora ani podružný elektroměr. O spotřebě elektrické energie zatím můžeme usuzovat pouze z informace o spuštění kompresoru. Pro vyhodnocení (viz níže) je tak uvažován konstantní příkon 12 kW při sepnutém TČ. Tato hodnota vychází z tabulkových hodnot dodaných výrobcem TČ a pro teploty na výstupu kondenzátoru, které byly dosahovány v průběhu ověřování, je tato hodnota validní.

VÝSLEDKY

Na obr. 2 je zobrazen snímek z jednoho typického dne v průběhu experimentu. Cena elektrické energie (horní graf) se nacházela v 3 časových úsecích na velmi nízkých hodnotách. Z těchto úseků si prediktivní regulátor vybral první dva úseky k dodávce tepla do systému TABS (druhý graf shora). V ostatních intervalech nebylo nutné energii dodávat. Na třetím grafu shora je zobrazen příkon TČ odhadnutý na základě signálu o sepnutí kompresoru. Je vidět, že kompresor je sepnut zejména v okamžicích, kdy je odběr TABS systémem. Nicméně TČ běželo krátce i v úsecích, kdy nebyl odběr systémem TABS a kdy byla cena energie vysoká. To bylo způsobeno požadavkem VZT, která odebírá energii dle potřeby bez ohledu na cenu.

Z toho důvodu byl ještě vypočítán odhad, jaký by byl průběh výkonu tepelného čerpadla v případě, že by VZT neodebírala energii ze zásobníku ÚV (spodní graf). Signál byl vypočítán takovým způsobem, že v každé hodině bylo sepnutí TČ zkráceno o takovou dobu, která byla nutná pro vytvoření potřebného množství energie pro VZT (informace o spotřebě energie ohřivačů VZT je k dispozici díky kalorimetrickým měřením). Jedná se o aproximaci, a navíc je TČ stále regulováno svojí autonomní regulací. Přesto více vyniknou úseky, kdy byla vysoká potřeba tepla od systému TABS.



Obr. 2 Denní snímek časově proměnné ceny energie, profilu dodávky energie do systému TABS a běhu kompresoru TČ

Fig. 2 Daily image of the time variable energy price, energy supply profile to the TABS system and running of the HP compressor

Z analýzy dat vyplývá, že v případě profilu spotřeby bez korekce (třetí graf shora) je ve sledovaném období průměrná cena silové energie za odebranou kWh o 20 % nižší, než je průměr dynamické ceny pro dané období. V případě signálu s korekcí odběru VZT (spodní graf) je průměrná cena odebrané kWh o více než 40 % nižší, než je průměr dynamické ceny v období. Je však nutné zdůraznit, že zákazník platí nejen za komoditu, ale mnohdy více než polovinu nákladů tvoří fixní platby.

SHRNUTÍ

V článku bylo představeno využití prediktivního regulátoru pro DSM aplikaci – řízení výkonu TČ podle časově proměnné ceny. Cena vycházela z ceny odchylky, resp. protiodchylky. Je ukázáno, že pro skutečně rozumné využití DSM algoritmů v praxi je nutné už od samého počátku návrhu systému uvažovat v kontextu potřeb DSM.

TABS představuje ideální koncový prvek, u kterého je možné tvarovat a posouvat spotřebu v čase, nicméně pokud ostatní koncové prvky VZT nebo TV odebírají energii dle potřeby, může to celý přínos významně ovlivnit. Ve sledované budově je projekčně nutný podobný výkon do VZT i do systému TABS a tomu odpovídá i vyhodnocení průměrných cen za odebranou kWh, kdy VZT jako taková odebírala prakticky za průměrnou cenu energie v období. Pro efektivní využití dynamických cen by v tomto případě bylo nutné mít akumulační zásobník, který dokáže překlenout potřeby VZT v horizontu zhruba 4 h.

Zákazník platí za energii, která je z velké části závislá na běhu kompresoru TČ. Mnohdy se ale stává, že TČ je dodáváno vč. autonomní regulace, která funguje výborně v běžném provozu, ale při jejím návrhu nebylo uvažováno s možností modulovat výkon podle vnějšího signálu.

DSM je přístup, se kterým se v budoucnu budeme setkávat stále častěji. Je to z důvodu vyššího zastoupení intermitentních obnovitelných zdrojů, rozmachu bateriových úložišť a akumulací. Je jen otázkou, jaké obchodní modely budou dávat v budoucnu ekonomický smysl. Velký vliv na to budou mít jak zájmy distributorů energie, tak regulátora trhu.

Co se týká budovy ZŠ Líbeznice, ta bude dále sloužit pro výzkumné účely, a to nejen na poli DSM, ale bude předmětem zájmu předních odborníků na GEOTABS systémy, neboť byla zařazena mezi trojici demonstračních budov projektu z programu H2020 s názvem hybridGEOTABS MPC-: GT.

Kontakt na autora: cigler@feramat.cz

Použité zdroje:

- [1] BEHRANGRAD, M. A review of demand side management business models in the electricity market. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2015, č. 47, 270–283.
- [2] HELSEN, L. *Geothermally activated building structures*. Advances in Ground-Source Heat Pump Systems. 2016.
- [3] CIGLER, J., ŠIROKÝ, J. Zkušenosti s nasazováním prediktivní regulace pro energeticky hospodárné provozování budov. *Vytápění, větrání, instalace*. 2014, č. 3, str. 102–106.

Čpavkové tepelné čerpadlo

GEA představil na veletrhu Chillventa 2016 nové vysoce výkonné tepelné čerpadlo Red Astrum, jako standardní řešení pro vnitřní užití v průmyslu a pro blízké zásobování teplem. Pracuje na teplotní hladině 80 °C a podle výrobce je vhodné pro přípravu teplé užitkové vody i pro průmyslové účely. Pokrývá výkony mezi 1 až 2,5 MW a vyhovuje pro zdroje vody s teplotou 10 až 40 °C.

Pramen: CCI 13/2016, s. 38

(AB)