

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE**

PAROPLYNOVÝ CYKLUS

Vypracoval: Bc. Matúš Habánek

Akademický rok: 2016/2017

Obsah

1	Zoznam literatúry	3
2	Abstrakty použitej literatúry	4
3	Abstract	7
4	Paroplynový cyklus	8
5	Doplnková literatúra.....	13

1 Zoznam literatúry

- [1] Shabbir I., Mirzaeian M., Feasibility analysis of different cogeneration systems for a paper mill to improve its energy efficiency, *International Journal of Hydrogen* 41 (2016), strany 16535 - 16548
- [2] <http://www.turbinesinfo.com/steam-turbine-efficiency/>, Vysvetlenie účinnosti turbín, 14. 1. 2017
- [3] <https://memagazineblog.org/2012/07/01/efficiency-by-the-numbers/>, Článok o účinnosti plynových turbín, 14. 1. 2017
- [4] <http://www.power-eng.com/articles/print/volume-106/issue-8/features/new-benchmarks-for-steam-turbine-efficiency.html>, Článok o najúčinnnejších parných turbínach, 14. 1. 2017
- [5] http://www.energy.siemens.com/us/pool/hq/power-generation/gas-turbines/downloads/SGT5-8000H_benefits.pdf, Brožúra Siemens o teste novej plynovej turbíny v paroplynovom cykle, 14. 1. 2017
- [6] Aguilar F. J. E., García M. T., Trujillo E. C., Villanueva J. A. B., Ojeda F. J. F., Prediction of performance, energy savings and increase in profitability of two gasturbine steam generator cogeneration plant, based on experimental data, *Energy* 36 (2011), strany 742 – 754
- [7] Variny M., Mierka O., Improvement of part load efficiency of a combined cycle power plant provisioning ancillary services, *Applied Energy* 86 (2009), strany 888 – 894
- [8] Ahmadi P., Dincer I., Thermodynamic analysis and thermoeconomic optimization of a dual pressure combined cycle power plant with a supplementary firing unit, *Energy Conversion and Managment* (2011), strany 2296 – 2308
- [9] Nadir M., Ghenaiet A., Thermodynamic optimization of several (heat recovery steam generator) HRSG configurations for a range of exhaust gas temperatures, *Energy XXX* (2015), strany 1 - 11

2 Abstrakty použitej literatúry

Feasibility analysis of different cogeneration systems for a paper mill to improve its energy efficiency

Cogeneration is considered as one of the promising energy efficient techniques for producing electricity and useful thermal energy from a single fuel source. This paper describes a feasibility study of the implementation of different cogeneration options to a paper mill to evaluate their energy saving potentials and economic benefits. The investigated systems in this paper are gas turbine, steam turbine and combined cycle cogeneration options evaluated and compared based on energy utilisation factor and Annualised Life Cycle Cost (ALCC) analysis. The results of energy analysis show that all Combined Heat and Power (CHP) systems satisfy the thermal energy needs of the mill while the combined cycle cogeneration option generates the highest amount of electric energy equal to 10.91 MW. The gas turbine cogeneration system is shown as the most advantageous system from overall energy point of view with the highest energy utilisation factor of 78% meeting the heat and electric requirements of the mill and exporting 21,329 MWh of additional electricity to the grid. Economic feasibility results also show that an overall saving of 5.12 million US\$ can be achieved by implementing the gas turbine cogeneration system to the mill making it as the best cogeneration option with the least overall ALCC of 1.34 million US\$ and the maximum percentage of CO₂ emission reduction (68%) when compared with the other options.

Keywords: Paper mill, Thermoconomics, Annualised life cycle cost analysis, Energy utilisation factor, Combined heat and power

Prediction of performance, energy savings and increase in profitability of two gasturbine steam generator cogeneration plant, based on experimental data

This study analyses three feasible regulation methods of an in-service cogeneration plant. The main task is to study the potential energy savings, CO₂ reduction and the increase in profitability compatible with the lowest transformation costs. The cogeneration system is composed of two General Electric LM2500 gas turbines and a heat recovery steam generator (HRSG). Two plant localizations in Spain have been considered; San Fernando (Cádiz) where the current plant is located, and Burgos. The latter has been taken into account to analyze the effect of cooler weather on the regulation methods. The paper has been divided into three parts. First, a revision of the current legislation regarding cogeneration in Spain is shown. Second, a description of the power plant and the proposed regulation methods are set out. Then, the cogeneration plant is modelled with the objective of evaluating the effects of the regulation methods in power, generated steam and thermal oil flow. Finally, the model was applied to analyze the profit obtained from different regulation combinations and to compare the benefits of those regulation methods in the two locations with different climatic situations. The main conclusion reached is the importance to meet the requirements of Spanish legislation in order to obtain advantages in the sale of electricity; an increased profit of up to 60% was obtained in the simulation. In addition, it is evident that the regulation is more important when ambient temperature is lower.

Keywords: Cogeneration, Combined heat and power, GT regulation, Legal and market framework

Improvement of part load efficiency of a combined cycle power plant provisioning ancillary services

According to the type of ancillary service provisioned, operation mode of a power plant may change to part load operation. In this contribution, part load operation is understood as delivering a lower power output than possible at given ambient temperature because of gas turbine power output control. If it is economically justified, a power plant may operate in the part load mode for longer time. Part load performance of a newly built 80 MW combined cycle in Slovakia was studied in order to assess the possibilities for fuel savings. Based on online monitoring data three possibilities were identified: condensate preheating by activation of the currently idle hot water section; change in steam condensing pressure regulation strategy; and the most important gas turbine inlet air preheating. It may seem to be in contradiction with the well proven concept of gas turbine inlet air cooling, which has however been developed for boosting the gas turbine cycles in full load operation. On the contrary, in a combined cycle in the part load operation mode, elevated inlet air temperature does not affect the part load operation of gas turbines but it causes more high pressure steam to be raised in HRSG, which leads to higher steam turbine power output. As a result, less fuel needs to be combusted in gas turbines in order to achieve the requested combined cycle's power output. By simultaneous application of all three proposals, more than a 2% decrease in the power plant's natural gas consumption can be achieved with only minor capital expenses needed.

Keywords: Combined cycle, Part load performance, Ancillary services, Electric efficiency, Fuel savings

Thermodynamic analysis and thermoeconomic optimization of a dual pressure combined cycle power plant with a supplementary firing unit

In this paper, a combined cycle power plant (CCPP) with a supplementary firing system is first thermodynamically analyzed through energy and exergy. The optimal design of operating parameters of the plant is then performed by defining an objective function and applying a generic algorithm (GA) type optimization method. In order to optimally find the design parameters, a thermo-economic method is employed. An objective function representing the total cost of the plant in terms of dollar per second is defined as the sum of the operating cost related to the fuel consumption and the capital investment for equipment purchase and maintenance costs. Subsequently, different parts of the objective function are expressed in terms of decision variables. Finally, the optimal values of decision variables are obtained by minimizing the objective function using a GA. Moreover, the influences of changes in the demanded power and fuel cost are studied by considering three different output powers (i.e., 160, 180 and 200 MW). To validate the present model, the results of the present simulation code are compared with the actual data. The results show that the average difference between the model results and the actual data is about 1.41%. Moreover, various cases are investigated to determine how to decrease the objective function (cost, mass flowrate, etc.) for the optimized design and operating parameters (fuel cost, power output, etc.).

Keywords: Combined cycle power plant, Energy, Exergy, Efficiency, Optimization, Thermoeconomics, Genetic algorithm

Thermodynamic optimization of several (heat recovery steam generator) HRSG configurations for a range of exhaust gas temperatures

Design optimization of a (heat recovery steam generator) HRSG is essential due to its direct impact on large power generation combined cycles. This study is aimed at giving a thermodynamic comparison between the optimums of three configurations of HRSG operating at exhaust gas temperature (TOT) from 350 °C to 650 °C. The optimization results, using PSO (Particle Swarm Optimization) method, show that adding another pressure level allows achieving a higher pressure at the inlet of high pressure turbine, producing more steam quantities, destroying less exergy and finally producing more specific work independently of TOT. For a given value of 600 °C representative of TOT of recent gas turbines, an addition of a pressure level is shown to increase the specific work of about 17 kJ/kg, representing a benefit of about 10% for the steam cycle, whereas a third pressure level results in 8 kJ/kg increase in the specific work, corresponding to 4% in the steam cycle.

Keywords: HRSG (heat recovery steam generator), Exhaust gas temperature, Combined cycle performance, Optimization, PSO (Particle Swarm Optimization) technique

3 Abstract

Cogeneration uses a heat engine to generate electricity and heat at the same time. Different heat engines can be used in cogeneration. Combined cycle uses a gas turbine and a steam turbine to achieve an electrical efficiency higher than either of its parts. Combined cycle plants are best operated at their maximal load, but if operation at a lower load is required, it shouldn't be regulated solely by fuel consumption. Part load operation may be justifiable but this depends on the market situation and local legislative. Inlet air heating improves the efficiency of a combined cycle plant operating at a part load. It should be noted that inlet air cooling is also a viable and proven practice but it is used to boost performance at full load. Heat recovery steam generators should be at least dual pressure and at times it may be beneficial to have an option of using afterburning. Opposed to conventional boiler regeneration doesn't increase the amount of steam generated, moreover it worsens the electrical efficiency and therefore shouldn't be used in a combined cycle plant.

4 Paroplynový cyklus

Kogenerácia je proces, pri ktorom sa súčasne generuje elektrická energia a užitočné teplo. Jej výhodou je, že umožňuje termodynamicky efektívnejšie zhodnotenie paliva, keďže dáva možnosť užitočne využiť časť tepla vznikajúceho pri výrobe elektrickej energie. Merné náklady na výrobu tepla aj elektriny sú teda nižšie, ako keby sme ich vyrábali v dvoch úplne oddelených procesoch a teda aj záťaž na životné prostredie je nižšia. Kogeneráciu možno výhodne uplatniť v priemyselných podnikoch, elektrárňach, iných menších firmách ale aj iných inštitúciách, avšak dôležitým predpokladom je správne dimenzovanie jednotlivých zariadení vzhľadom na realizované odbery tepla a elektrickej energie počas roka a ich trendy počas roka, mesiaca či dňa. Medzi typy kogenerácie patria plynové turbíny (a motory, môžu pracovať aj s rôznymi druhmi palív), parné turbíny a kombinovaný cyklus (plynová turbína aj parná turbína) inak nazývaný aj paroplynový cyklus (PPC).

Pri PPC sa vzduch nasávaný z okolia komprimuje a zmiešava sa s vysokotlakovým zemným plynom v spaľovacej komore. Po zhorení paliva vysokotlakové spaliny postupujú do plynovej turbíny, kde expandujú a generujú pri tom elektrickú energiu. Spaliny však majú ešte stále pomerne vysokú teplotu a využijú sa teda v spalinovom kotle na výrobu prehriatej vodnej pary o vysokom tlaku. Táto vysokotlaková para následne expanduje na parnej turbíne, kde generuje elektrickú energiu. Expandovaná para sa podľa potreby následne využíva na prevádzke.

Výhodou PPC je možnosť využiť teplo na generáciu elektrickej energie v podstate dva krát, čo vyústi do zvýšenej účinnosti jej generácie. Ak je však potreba tepla značne vyššia ako potreba elektrickej energie sa tento fakt stáva nevýhodou [1]. Nevýhodou kogenerácie je nutnosť udržiavať vysoké zaťaženie počas väčšiny roka, aby bola ekonomicky výhodná. Nevýhodou paroplynového cyklu je nutnosť investovať do dvoch väčších zariadení – turbín namiesto jednej ako pri parných turbínach alebo spaľovacích turbínach, aj keď budú o niečo menšie. Ďalšou nevýhodou je praktická nevyhnutnosť rozvodu vysokotlakového zemného plynu pre plynovú turbínu, v opačnom prípade by si PPC vyžadoval ďalší kompresor a značne zvýšené prevádzkové náklady.

Zapojenie PPC môže byť rôznorodé, čo vyplýva priamo z typu parnej turbíny. Hlavné typy sú protitlakové a kondenzačné turbíny. Pri protitlakových turbínach je vystupujúcim médiom mierne prehriata vodná para a jej výstupný tlak je vyšší ako atmosferický, pri kondenzačných je to parokvapalná zmes (výstupný tlak je nižší ako atmosferický), ktorá postupuje do kondenzátora. Turbíny môžu byť ešte navyše odberové a indukčné. Pri odberových turbínach je možný odber pary (regulovaný alebo neregulovaný) ešte pred výstupom z nej, čo napríklad pri kodenzačných turbínach umožňuje saturovať príležitostnú potrebu tepla. Indukčné turbíny naopak umožňujú priviesť extra prúd pary medzi vstup a výstup a teda generovať tým viac elektrickej energie.

Existuje viacero parametrov, ktoré vyjadrujú účinnosť turbín [2]. Izoentropická účinnosť fyzikálne vyjadruje mieru vratnosti procesu a je definovaná ako podiel vykonanej práce ku množstvu práce vykonanej pri izoentropických podmienkach. Izoentropická účinnosť sa niekedy nazýva aj termodynamická účinnosť. Elektrická účinnosť vyjadruje podiel množstvo elektrickej energie a tepla dodaného spálením paliva. Elektrickej účinnosti je blízka termická účinnosť, ktorá je definovaná ako podiel práce, ktorú vykoná plyn v turbíne ku tepelnému toku dodanému spálením paliva. Celková účinnosť vyjadruje podiel súčtu množstva využiteľného tepla v procese a množstva generovanej elektrickej energie ku množstvu tepla dodaného spálením paliva. Efektívna elektrická účinnosť je definovaná ako podiel množstva generovanej elektrickej energie ku množstvu tepla dodaného spálením paliva zmenšeného o teplo potrebné na výrobu vystupujúcej pary.

Účinnosť turbín rastie s ich maximálnym výkonom. Moderné plynové turbíny o vysokých výkonoch dosahujú termickú účinnosť až na úrovni okolo 40% [3]. Parné turbíny môžu dosahovať účinnosť až okolo 50% [4]. Kombinované zapojenie v PPC umožní dosiahnuť termickú účinnosť blížiacu sa až 60% [5].

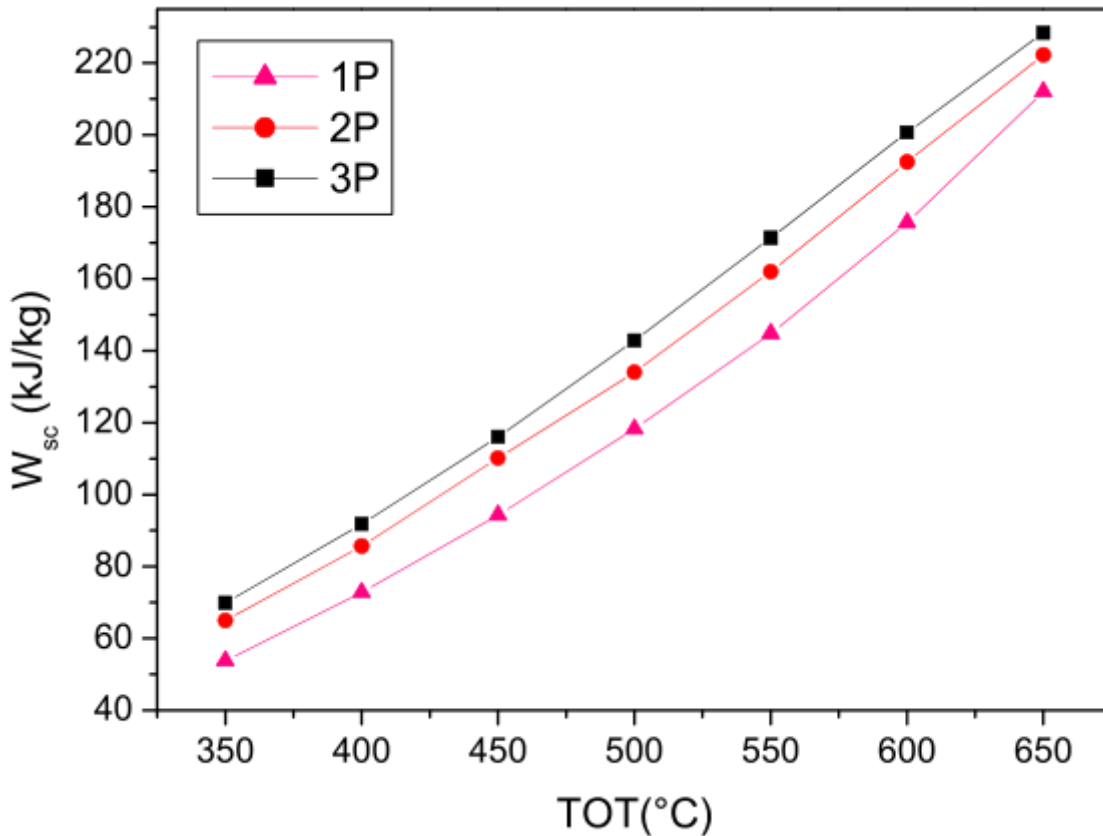
Regulovanie výkonu PPC sa najčastejšie realizuje reguláciou výkonu plynovej turbíny. Základným spôsobom regulácie plynovej turbíny je regulácia množstvom paliva. Je však nutné si uvedomiť, že často sú kompresor a turbína na spoločnej osi a majú teda rovnaké otáčky. Znížením množstva paliva sa teda nezníži množstvo nasávaného vzduchu. To vyústi do nižšej teploty spalín a v konečnom dôsledku aj nižšej účinnosti celého PPC. Je preto výhodné mať na kompresore osadené VIGV (variable inlet guide vanes – otočné vstupné lopatky) [6]. Tieto umožnia meniť spolu s množstvom paliva aj množstvo vzduchu a neznižovať teda výrazne účinnosť celého systému. Účinnosť sa však zníži aj napriek tomu v dôsledku menšieho prietoku spalín, avšak menej.

Ako už bolo spomenuté vyššie, je výhodné pokiaľ turbíny pracujú väčšinu času pri čo najvyššom zaťažení, aby mali merné náklady čo najnižšie. V závislosti od situácie na trhu a lokálnej legislatívy môže byť ekonomicky zaujímavá aj prevádzka pri čiastočnom zaťažení. Týka sa to poskytovania podporných služieb prevádzkovateľovi elektrickej siete, poskytovať ich je možné aj na Slovensku. Poskytovaním týchto služieb umožňujete prevádzkovateľovi siete regulovať výkon vašich zariadení, za čo vám platí. Aby pritom nedošlo k rapídneho zvýšeniu merných nákladov, je nutné mať zavedený efektívny spôsob regulácie. Pri čiastočnom zaťažení klesá teplota spalín na výstupe z turbíny. Je teda výhodné predhrievať spaľovací vzduch, čo zvýši množstvo generovanej vodnej pary a teda aj elektrický výkon na parnej turbíne. To naopak umožní znížiť výkon na plynovej turbíne a teda aj spotrebu zemného plynu [7,8].

Plynové turbíny pracujú v otvorenom cykle a teda nasávajú spaľovací vzduch z okolia. Vlastnosti vzduchu (teplota, tlak, vlhkosť) majú teda priamy vplyv na prevádzku systému. Tento vplyv ale závisí od spôsobu prevádzkovania. Pri čiastočnom zaťažení je výhodné vzduch predhrievať, čo je vysvetlené

vyššie a teda aj vyššia teplota vzduchu je prospešná. Pri vyššom zaťažení môže byť naopak teplota spalín príliš vysoká a blížiť sa maximálnej prípustnej teplote spalín na vstupe, čo môže aj zabrániť dosiahnutiu maximálneho možného výkonu. Vtedy je vyššia teplota vzduchu nežiadúca a chladienie spalín (napríklad parné vstreky do spaľovacej komory) alebo spaľovacieho vzduchu umožní zvýšiť prietok spalín a teda aj výkon plynovej turbíny [7].

Spaliny, ktoré prejdú spaľovacou turbínou, následne odovzdávajú časť svojho tepla napájacej vode v spalínových kotloch za generácie pary. Napájacia voda sa predhreje v ekonomizéri, odparí v samotnom parnom bubne a vyrobená para sa ešte ohreje v prehrievači, v niektorých usporiadaniach je zapojené aj znovu prihriatie expandovanej vysokotlakovej pary pred vstupom do nízkotlakovej časti. Snahou je maximalizovať množstvo tepla, ktoré chladnúce spaliny odovzdajú napájacej vode, čo je limitované len rozdielom ich teplôt. Pre maximalizáciu tohto množstva je teda nutné pri inej vstupnej teplote spalín do spalínového kotla vyrábať paru o inom tlaku, tak aby bola zachovaná určitá minimálna hnacia sila prestupu tepla. Pre spalínové kotle je charakteristická prítomnosť viac ako jednej tlakovej úrovne. Táto zmena umožňuje výrobu väčšieho množstva pary, vyšší tlak pary na najvyššej tlakovej úrovni, menšiu mieru ničenia exergie (exergia je množstvo užitočnej práce, ktoré môže systém vykonať, kým sa dostane do rovnováhy s okolím, kedy už je exergia nulová) a para vykoná väčšie množstvo špecifickej práce a to bez ohľadu na výstupnú teplotu spalín zo spaľovacej turbíny. Pridanie prvej tlakovej úrovne prináša navýšenie špecifickej konanej práce asi o 10% a pridanie druhej tlakovej úrovne prináša asi 4% zvýšenie (Obrázok 1.). Miera ničenia exergie je najvyššia pri nízkej výstupnej teplote spalín a s rastom tejto teploty klesá, pri všetkých teplotách však je táto miera najnižšia pre trojtlakový dizajn. Najväčšia časť vyrobenej pary v optimálnom prípade vždy pripadá na paru na najvyššej tlakovej úrovni [9].

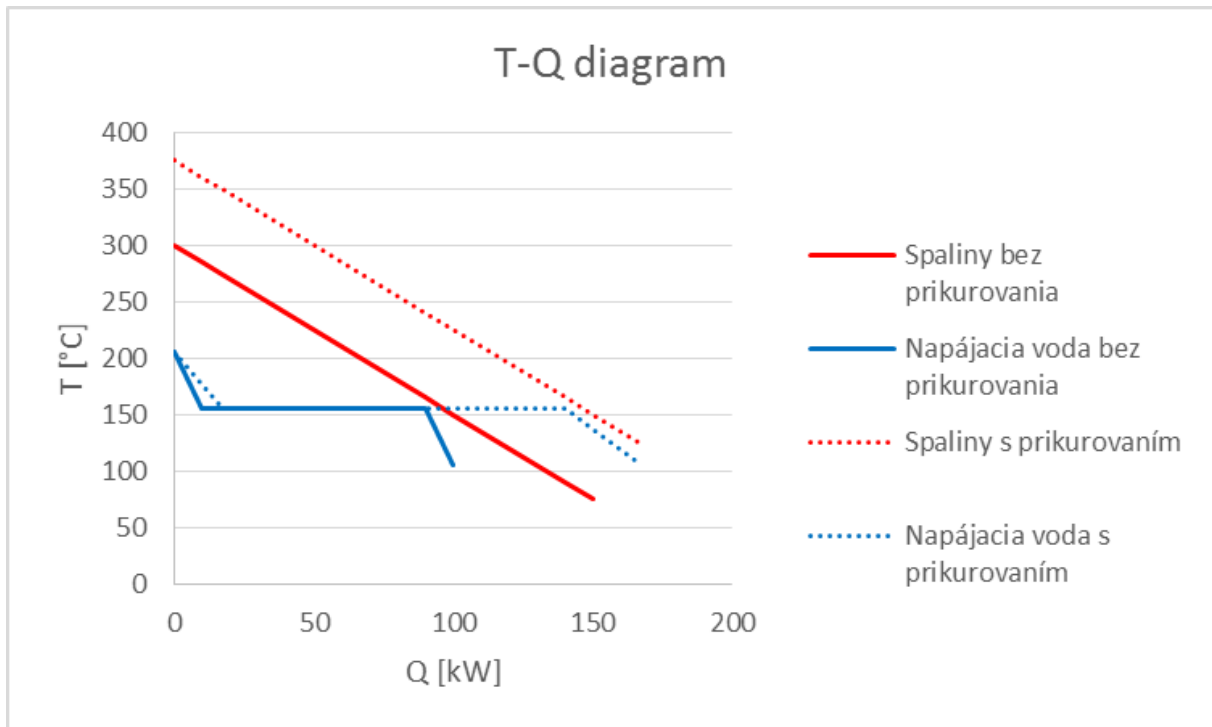


Obrázok 1. Množstvo vykonanej špecifickej práce v závislosti od výstupnej teploty spalín pre jednotlakový (1P), dvojtlakový (2P) a trojtlakový (3P) spalínový kotol

Jedným zo spôsobov zvyšovania termickej účinnosti klasických kotlov je regeneračný ohrev napájajúcej vody. Tento spôsob zahŕňa extrakciu časti pary z parnej turbíny, ktorá následne ohrieva napájaciu vodu pred vstupom do kotla. Pri spaľovacích turbínach sa regeneračný ohrev napájajúcej vody však nepoužíva. Vyššia teplota napájajúcej vody na vstupe do spalínového kotla by znamenala znížené využitie tepla zo spalín. Toto je podmienené udržiavaním minimálnej hnacej sily prestupu tepla. To spôsobí vyššie komínové straty, avšak množstvo vyrobenej pary vyššie nebude. Celkovo je to teda strata, keďže by sa zmenšil prietok pary parnou turbínou na úkor extrahovanej pary. Pri klasických kotloch je teplo využité aj na predohrev spaľovacieho vzduchu a teda nedôjde k rovnakému zvýšeniu komínových strát.

Ďalšou charakteristickou črtou spalínových kotlov môže byť možnosť prikurovania. Pri prikurovaní sa do kotla privádza ďalšie množstvo zemného plynu, ktorý zhorí v prebytku kyslíka. Prikurovanie je jednou z možností ako zvýšiť množstvo vyrobenej pary v spalínovom kotli paroplynového cyklu. Marginálna účinnosť prikurovania vyjadruje aká časť tepla dodaného navyše sa využije na ohrev napájajúcej vody. Pri prikurovaní sa zvýši teplota spalín vstupujúcich do kotla. Ak by sa vyrábala para o rovnakých tlakových úrovniach, pri rovnakej minimálnej hnacej sile prestupu tepla, tak logicky je možné vyrobiť viac vodnej pary ak je veľkosť teplovýmennej plochy postačujúca, čo je najjednoduchšie znázorniť v hrubo načrtnutom T-Q diagrame (Obrázok 2). Keďže by do kotla

prichádzalo väčšie množstvo napájacej vody, viac tepla by sa spotrebovalo aj na jej ohrev na teplotu varu. Tomuto odpovedajúca časť T-Q diagramu by sa teda rozšírila a z diagramu je jasné, že spaliny by odchádzali pri nižšej teplote ako v prípade prevádzky bez prikurovania. Ak nastane tento prípad, marginálna účinnosť prikurovania musí byť logicky vyššia ako 100%, čo však neznamená, že by prikurovanie vyrábalo energiu z ničoho. Znamená to toľko, že zlepšené podmienky pre prestup tepla (priemerne vyššia hnacia sila) umožňuje vyrobiť väčšie množstvo vodnej pary a väčšie množstvo privádzanej napájacej vody umožňuje využiť väčšiu časť tepla zo spalín aj pri ich nižšej teplote.



Obrázok 2. Ilustrácia vplyvu prikurovania na teplotu spalín na výstupe zo spalínového kotla

Kogenerácia je výhodnou súčasťou výroby elektrickej energie a tepla. Môže byť realizovaná viacerými spôsobmi, ktoré sa odlišujú v pomere vyrobenej elektrickej energie ku vyrobenému teplu a svojimi termickými účinnosťami. Zmenou zaťaženia sa môže značne líšiť účinnosť výroby a je teda nutné kogeneračnú jednotku v prvom rade správne nadimenzovať. Ak je však zmena zaťaženia nevyhnutná, tak ekonomike procesu je možné pomôcť voľbou vhodnej metódy regulácie. Nestačí totiž znížiť množstvo privádzaného paliva, je nutné znížiť aj množstvo privádzaného vzduchu. V prípade úpravy vlastností spaľovacieho vzduchu pre PPC je nutné porozumieť, že správny smer úpravy teploty závisí od spôsobu prevádzkovania. Spalinový kotol je taktiež dôležitým článkom, ktorý umožňuje efektívny prenos energie medzi plynovou a parnou turbínou, preferovaný je viactlakový dizajn s možnosťou prikurovania. PPC je však pomerne vdáchnou témou a teda aj tento článok je len úzkym načrtnutím jeho možností.

5 Doplnková literatúra

- [1] Khaliq, A., Kaushik S. C., Second-law based thermodynamic analysis of Brayton/Rankine combined power cycle with reheat, *Applied Energy* 78 (2004), strany 179 – 197
- [2] Sanjay Y., Singh O., Prasad B. N., Energy and exergy analysis of steam cooled reheat gas–steam combined cycle, *Applied Thermal Engineering* 27 (2007), strany 2779 – 2790
- [3] Rovira A., Sánchez C., Muñoz M., Valdés M., Durán M. D., Thermoeconomic optimisation of heat recovery steam generators of combined cycle gas turbine power plants considering off-design operation, *Energy Conversion and Management* 52 (2011), strany 1840 – 1849
- [4] Kotowicz J., Bartela L., The influence of economic parameters on the optimal values of the design variables of a combined cycle plant, strany 911 – 919
- [5] Godoy E., Scenna N. J., Benz S. J., Families of optimal thermodynamic solutions for combined cycle gas turbine (CCGT) power plants, *Applied Thermal Engineering* 30 (2010), strany 569 – 576