

太阳能辅助直接空冷发电系统背压 敏感性分析及优化

侯宏娟, 宋 嘉, 徐 璋, 梁明宇, 王 露, 杨勇平

(华北电力大学国家火力发电工程技术研究中心, 北京 102206)

摘 要: 基于热力学第一定律和传热单元数法, 结合关键设备的具体特性, 建立太阳能辅助直接空冷发电系统模型。并以太阳能辅助某 600 MW 直接空冷机组为例, 分析不同负荷下, 辐照、风速、环境温度等因素对系统背压的影响。结果表明: 引入太阳能后, 相较原燃煤机组系统背压略有增加, 但增幅不大。系统背压在一定范围内随太阳法向直射辐照度和环境温度的增大而增大; 随风速的增大而减小。开展以汽轮机净功率最大为目标的背压优化, 获得不同工况下系统的最优背压。结果表明辐照对最佳背压的影响小于风速及环境温度对最佳背压的影响。

关键词: 太阳能; 系统集成; 燃煤电站; 系统优化

中图分类号: TK512

文献标识码: A

0 引 言

太阳能辅助燃煤发电系统作为太阳能与技术成熟的燃煤电站两者优势互补的发电系统, 因其减少燃煤电站的煤炭消耗、改善对环境的污染, 同时又能增加发电功率, 缓解用电高峰时期的电力短缺等优势逐渐受到广泛关注。该技术最早由 Zoschak 等^[1]提出, 对比了太阳能与燃煤机组不同的集成方式, 结果表明太阳能辅助给水加热系统在初投资、技术和运行上均具有较好的应用前景。Ying 等^[2]和 Hu 等^[3]从热力学的角度论证了太阳能辅助燃煤发电技术的优越性。Pierce 等^[4]以南非某机组为例, 使用 SAM 软件比较了辅助发电系统与纯太阳能热发电系统的性能差异, 结果显示, 辅助发电系统具有更好的经济性。Wu 等^[5,6]比较了不同集热面积和蓄热时间对太阳能辅助燃煤发电系统年性能的影响, 并在此基础上优化了集成方案。侯宏娟等^[7,8]和 Gupta 等^[9]从热力学第二定律出发, 分析了太阳能辅助燃煤发电系统的热性能。Suresh 等^[10]基于 4-E(能量、焓、环境影响和经济性)分析法, 研究了太阳能辅助燃煤发电系统的综合性能。Zhai 等^[11]基于焓分析法, 建立了太阳能辅助燃煤发电系统的太阳能贡献

度评价模型。

然而, 上述研究都是针对太阳能辅助纯凝机组展开的, 鲜有涉及太阳能辅助空冷机组^[12]。而在实际中, 中国太阳能资源丰富的地区往往存在缺水的问题, 因此太阳能辅助空冷机组更具研究意义。本文以太阳能辅助某 600 MW 直接空冷发电系统为例, 分析辐照、风速、环境温度等因素对机组背压的影响, 并以此为基础, 研究不同运行工况下的最佳背压。

1 系统建模及性能评价

1.1 集热场模型

导热油流经集热场获得的太阳能 Q_{sol} 为^[13]:

$$Q_{\text{sol}} = Q_{\text{abs}} - (Q_{\text{loss}} + Q_{\text{pipe}}) \quad (1)$$

式中, Q_{abs} ——集热管中工质的吸热量, W/m^2 ; Q_{loss} ——集热管热损失, W/m^2 ; Q_{pipe} ——集热场管路热损失, W/m^2 。

集热管中工质的吸热量为^[14]:

$$Q_{\text{abs}} = DNI \cdot \cos \theta \cdot I \cdot \eta_s \cdot \eta_{\text{el}} \cdot \eta_{\text{fce}} \cdot \eta_{\text{hce}} \cdot \eta_{\text{sfa}} \quad (2)$$

式中, DNI ——太阳法向直射辐照度, W/m^2 ; θ ——入射角, ($^\circ$); I ——入射角修正系数; η_s ——集热

收稿日期: 2016-07-25

基金项目: 国家重点基础研究发展(973)计划(2015CB251505); 中央高校基本科研业务费专项资金(2016XS26)

通信作者: 侯宏娟(1972—), 女, 博士、副教授, 主要从事太阳能热利用方面的研究。hongjuanhou@ncepu.edu.cn

器遮荫系数; η_{cl} ——末端损失因子; η_{fce} ——集热场效率光学修正因子; η_{hce} ——集热装置效率光学修正因子; η_{sfa} ——集热器集热场比例。

集热器热损失 Q_{loss} 和集热场管路热损失 Q_{pipe} 计算参见文献[13]。

1.2 汽轮机模型

太阳能的引入必然引起汽轮机各级组通流量的变化,本文采用改进型 Flügel 公式^[15]进行汽轮机的变工况计算:

$$\frac{G'_i}{G_i} = \sqrt{\frac{p_i'^2 - p_{i+1}^2}{p_i^2 - p_{i+1}^2}} \quad (3)$$

式中, G'_i ——变工况后的汽轮机第 i 级的主汽流量, kg/h; G_i ——变工况前的汽轮机第 i 级的主汽流量, kg/h; p_i' ——变工况后的汽轮机第 i 级的抽汽压力, MPa; p_i ——变工况前的汽轮机第 i 级的抽汽压力, MPa。

1.3 冷端模型

基于传热单元数法,建立冷端模型^[16,7]。空冷凝汽器蒸汽凝结饱和温度 t_s 为:

$$t_s = \frac{D_c(h_c - h_w)}{3600 A_y v_y \rho_a c_a} \cdot \frac{1}{1 - e^{-\frac{KA}{A_y v_y \rho_a c_a}}} + t_a \quad (3)?$$

式中, D_c ——汽轮机排汽量, kg/s; h_c ——汽轮机排汽比焓, kJ/kg; h_w ——凝结水比焓, kJ/kg; A_y ——空冷系统总迎风面积, m²; v_y ——空冷系统迎面风速, m/s; ρ_a ——空气密度, kg/m³; c_a ——空气比热容, kJ/(kg·K); t_a ——环境温度, °C; K ——空冷凝汽器的传热系数, W/(m²·K); A ——空冷系统总散热面积, m²。

轴流风机功率 P_f 为:

$$P_f = P_{f0} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_{a0}} \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 \quad (4)$$

式中, P_{f0} ——设计工况下风机功率, MW; ρ_{a0} ——设计工况下空气密度, kg/m³; n ——实际工况风机转速, r/min; n_0 ——设计工况下风机转速, r/min。

1.4 评价指标

汽轮机净功率为:

$$P_{net} = P_e - P_f \quad (5)$$

式中, P_{net} ——汽轮机净功率, MW; P_e ——太阳能

辅助直接空冷发电系统发电功率, MW。

太阳能发电功率为:

$$P_s = P_e - Q_b \cdot \eta_{ref} \quad (6)$$

式中, P_e ——太阳能辅助直接空冷发电系统发电功率, MW; Q_b ——单位时间内燃料带入锅炉的热量, MW; η_{ref} ——参考燃煤机组的发电效率。

太阳能净发电功率 $P_{s,net}$ 为:

$$P_{s,net} = P_s \cdot \frac{P_e}{P_e} \quad (7)$$

光电转换效率 η_s 为:

$$\eta_s = \frac{P_{s,net}}{DNI \cdot A} \quad (8)$$

式中, A ——总采光面积, m²。

总效率 η 为:

$$\eta = \frac{P_{net}}{Q_b + DNI \cdot A} \quad (9)$$

基于燃煤的辅助发电机组效率 η^* 为:

$$\eta^* = \frac{P_{net}}{Q_b} \quad (10)$$

2 案例分析

本文以太阳能辅助 N600-16.67/538/538 型中间再热直接空冷式机组为研究对象,如图 1 所示。原机组主要参数列于表 1。选取陕西榆林夏至日正午 12:00 气象参数(DNI 为 907 W/m², 环境温度为 22 °C, 迎面风速为 1.84 m/s)为集热系统设计点参数。太阳集热场由 110 个回路组成,每个回路含 4 个 ET-150 型集热器,总采光面积为 359697 m²。集热器采用南北水平轴单轴跟踪布置,传热工质为导热

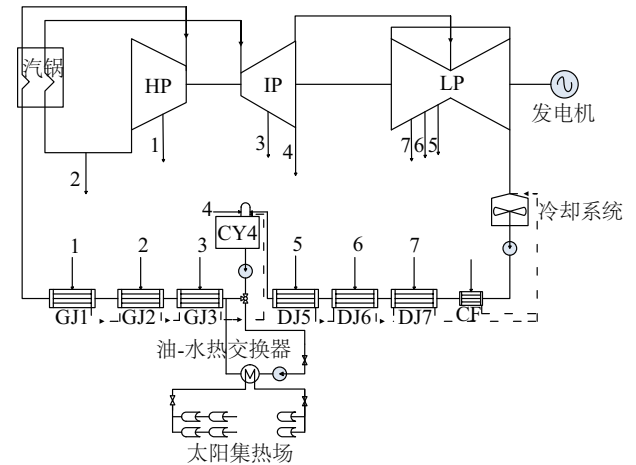


图 1 太阳能辅助直接空冷发电系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of solar aided direct air-cooled (coal-fired) power generation system

油。空冷凝汽器采用顺逆流联合的结构,包含 576 个顺流管束,64 个逆流管束,顺逆流面积比为 9:1,翅片管总面积为 1750684 m²。

表 1 机组各级抽汽的参数

Table 1 Extraction steam parameters of the units

机组	压力/ MPa	温度/ ℃	比焓/ kJ·kg ⁻¹	流量/ t·h ⁻¹	加热器 出口比焓/ kJ·kg ⁻¹
主蒸汽	16.67	538	3397.2	1848.8	—
一抽	6.0810	385.3	3140.7	131.9	1065.5
二抽	3.7940	322.5	3030.0	127.5	908.8
三抽	2.0460	461.5	3382.4	77.3	781.7
四抽	1.0160	361.0	3181.6	54.4	652.2
五抽	0.6150	302.5	3067.0	83.1	511.9
六抽	0.2404	196.3	2861.0	75.6	376.3
七抽	0.8064	93.7	2664.2	79.1	229.4
排汽	0.0150	54.0	2434.9	1218.3	—

系统运行模式采用“功率增大型”^[5],即加入太阳能热后,主蒸汽流量不变,机组表现为多做出功。

2.1 背压敏感性分析

本文针对影响空冷机组运行的主要参数,分析 DNI、迎面风速和环境温度对机组背压的影响。

2.1.1 DNI 对背压的影响

迎面风速和环境温度保持不变时,太阳能辅助直接空冷发电系统不同运行工况下背压 p_c 随 DNI 的变化如图 2 所示,其中 THA 表示汽轮机额定出力工况。

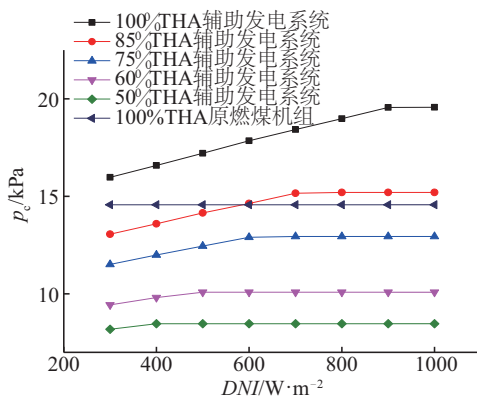


图 2 DNI 对不同工况下辅助发电机组背压的影响

Fig. 2 Back-pressure variation with DNI and load

由图 2 可看出,对于原空冷机组,由于无耦合

太阳集热场,因此,机组背压不随 DNI 的变化而变化。对于辅助发电系统,在一定范围内,背压随着 DNI 的增大而增大,两者近似线性关系。这是因为在“功率增大型”的条件下,汽轮机排汽量随太阳能取代比例的增大而增大,凝汽器需要排向环境的热量增多;在风速、环境温度不变的前提下,只有提高机组背压,使冷凝温度升高,空气与凝汽器间的换热增强,才能使空气从凝汽器中带走足够的热量。当太阳能热增加到足够取代全部三段高压抽汽后,为保证锅炉安全,给水温度基本保持不变,因此,不再取代更多抽汽,排汽量保持不变,背压不再随 DNI 的增大而变化。

对比不同工况曲线可发现,机组负荷越大,背压随 DNI 增大到保持不变的拐点越靠后。说明机组负荷越大,容纳太阳能热的能力也越强。

2.1.2 迎面风速对背压的影响

DNI 环境温度不变时,太阳能辅助直接空冷发电系统不同运行工况下背压 p_c 随迎面风速的变化如图 3 所示。

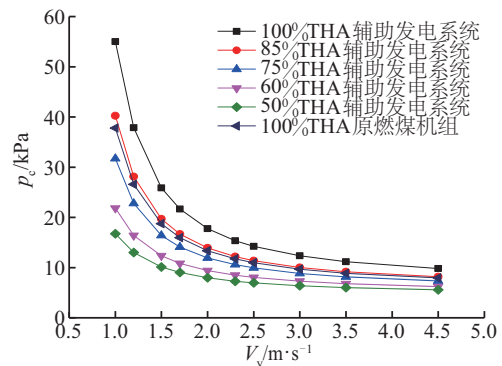


图 3 迎面风速对不同工况下辅助发电机组背压的影响

Fig. 3 Back-pressure variation with frontal velocity of air and load

由图 3 可看出,相同工况下辅助发电系统的背压高于原机组;不同工况下,背压都随迎面风速的增加先快速降低,后逐渐趋缓;最为剧烈的背压变化发生在风速为 1~2 m/s 的范围内,迎面风速达到 2.5 m/s 后,风速再增加, p_c 降低缓慢。这是因为迎面风速较高时,凝汽器与空气间的换热已足够好,此时即便再提高风速,也难以显著增强换热。在相同的迎面风速下,背压随机组负荷的升高而升高,这是因为低负荷下排汽量减少,同样的风速冷却效果更好,可使凝汽器真空更低。此外,机组负荷越低,

曲线的变化幅度越小,说明机组负荷越小,背压对迎面风速的敏感度越低。

2.1.3 环境温度对背压的影响

DNI 和迎面风速不变时,不同运行工况下背压 p_c 随环境温度的变化如图 4 所示。

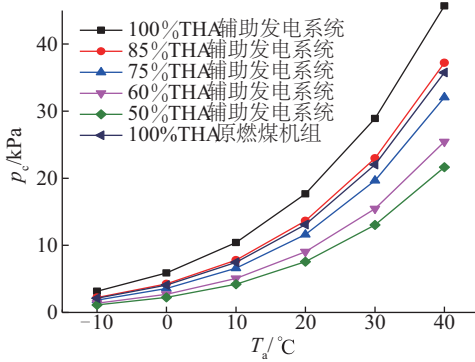


图4 环境温度对不同工况下辅助发电机组背压的影响

Fig. 4 Back-pressure variation with ambient temperature and load

由图 4 可看出,相同工况下辅助发电系统的背压高于原机组;不同工况下,机组背压都随环境温度升高而升高,且升高的速度不断加快。可见环境温度变化对背压有极大影响,当环境温度升高,空冷散热器入口空气温度升高,空冷效果变差,背压升高。与图 2 和图 3 一致的是,在相同环境温度时,负荷越高,机组背压越高。

此外,负荷越高时,随着环境温度的升高,其背压的上升越剧烈,说明越高的负荷下,机组背压对环境温度的敏感度越高。

由图 3 和图 4 可知,迎面风速和环境温度对辅助发电系统背压的影响规律与常规直接空冷机组类似。这是因为,迎面风速和环境温度仅能直接影响空冷岛的运行,而辅助发电系统和常规直接空冷机组使用了相同的空冷岛结构,因此其规律较为相似。此外,原机组 100%THA 下的背压与辅助发电系统 85%THA 下的背压接近。这是因为,原机组 100%THA 下的凝气器流量与辅助发电系统 85%THA 下的凝气器流量较为接近。

2.2 背压优化

由背压敏感性分析可知,背压随迎面风速的增大而减小;减小机组背压可增大机组发电功率,但需提高风机功率以提供更高的迎面风速,进而影响汽轮机净功率。因此,选择合适的背压,使汽轮机净功率最大化,既机组的背压优化,是空冷机组运

行中的一个重要问题。本文在背压敏感性分析的基础上,对背压进行了优化,获得了不同 DNI 、环境温度和负荷下的最佳背压。

环境温度为 22 °C, 100%THA 负荷时,不同 DNI 下的背压优化曲线如图 5 所示。汽轮机净功率随背压的增大先增后减,曲线的峰值对应了机组的最佳背压; DNI 越高,峰值净功率越大;最佳背压随 DNI 的增大而略有增大,但不同 DNI 下的最佳背压均接近 17 kPa。此外,原机组 100%THA 工况背压优化曲线峰值对应的最佳背压为 15 kPa,略小于耦合集热场后的最佳背压。

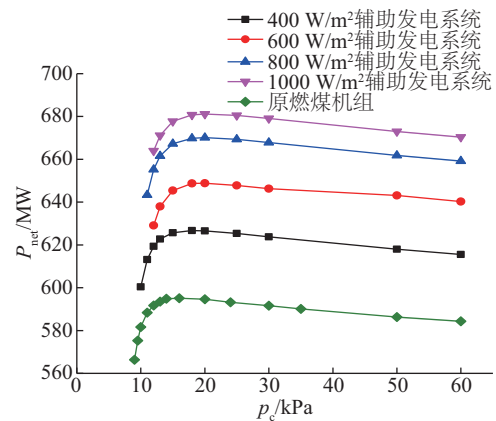


图5 DNI 对最佳背压的影响(THA=100%)

Fig. 5 Optimization of back-pressure variation with DNI

DNI 为 907 W/m^2 , 100%THA 负荷时,不同环境温度下的背压优化曲线如图 6 所示。汽轮机净功率均先随背压的升高而剧烈上升,达到峰值后缓慢下降;环境温度越高,曲线越尖锐;最佳背压随环境温度的升高而增大,增幅较 DNI 变化时明显,说明相对于 DNI ,环境温度对最佳背压的影响更大。此

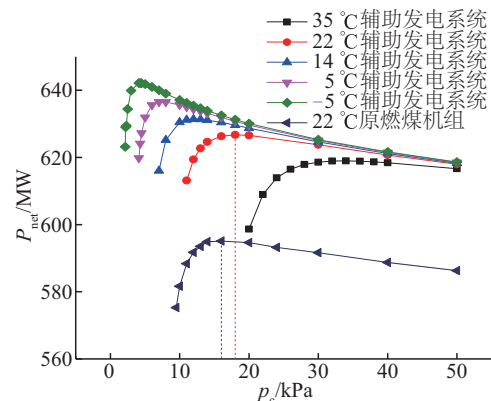


图6 环境温度对最佳背压的影响

Fig. 6 Optimization of back-pressure variation with ambient temperature

外,图 6 中原机组背压优化曲线峰值对应的最佳背压略小于对应环境温度下辅助发电系统背压优化曲线峰值对应的最佳背压。

环境温度为 22 °C, DNI 为 907 W/m^2 时,不同机组负荷下的背压优化曲线如图 7 所示。最佳背压随负荷的升高而增大,但增幅较小;当机组负荷从 50%THA 增至 100%THA,最佳背压从 12 kPa 增至 18 kPa。此外,原机组与辅助发电系统在对应工况下有较为接近的最佳背压。这是因为加入太阳能后,凝气器流量变化较小。

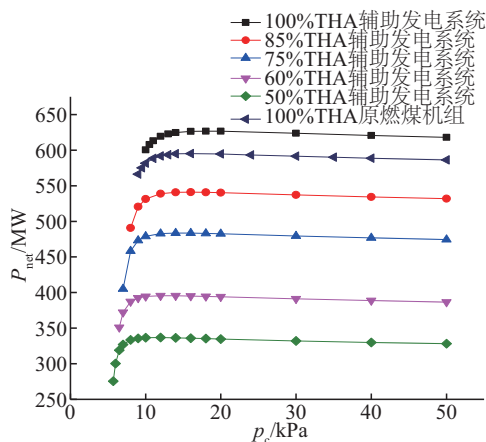


图 7 机组负荷对最佳背压的影响

Fig. 7 Optimization of back-pressure variation with load

此外,由图 5~图 7 可知,原机组与对应工况、环境温度的辅助发电系统均有较为接近的最佳背压。这说明耦合太阳集热场对于背压优化的影响较小。

将图 5 和图 6 整合为图 8。由图 8 可见,相同工况下,基于汽轮机净功率最大化的互补发电系统的最佳背压主要由环境温度决定。

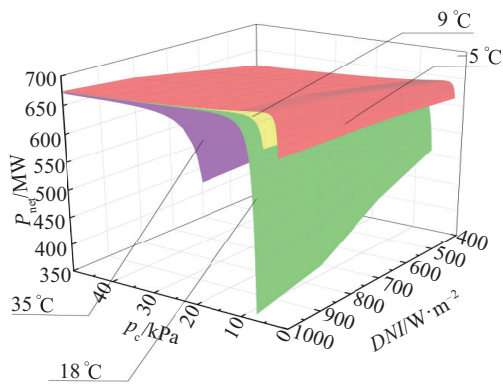


图 8 DNI 和机组负荷对最佳背压的影响

Fig. 8 Optimization of back-pressure variation with DNI and load

表 2 原机组与辅助发电机组性能对比

Table 2 Thermal performance comparison between original units and solar aided direct air-cooled power generation system

参数	原空冷机组	辅助发电系统
总效率/%	41.6	38.7
基于燃煤的机组效率/%	41.6	47.5
煤耗率/ $g \cdot kWh^{-1}$	288.38	256.05
汽轮机净功率/MW	596.8	680.8
光电转换效率/%	—	27.1

将图 8 的优化结果应用于辅助发电机组的运行,得到优化后的太阳能辅助直接空冷发电系统设计点性能参数,如表 2 所示。由表 2 可知,相比原机组,优化后的太阳能辅助直接空冷机组煤耗率下降了 32.33 g/kWh ,基于燃煤的发电机组效率提升了 5.9%,汽轮机净功率提升了 14.1%。此外,光电转换效率达到 27.1%,优于纯槽式太阳能热发电机组光电转换效率 (15.0%~22.6%)^[17]。

3 结 论

1) 系统背压在一定范围内随太阳法向直射辐照度的增大而增大,且近似为线性关系;辅助发电系统背压随迎面风速的增加而降低,随环境温度/负荷的升高而升高;耦合集热场后,系统背压略有增加,但增幅不大。

2) 相同负荷下,基于汽轮机净功率最大化的最佳背压主要受环境温度的影响,随环境温度的升高而升高; DNI 对最佳背压的影响较小,最佳背压随 DNI 的增大而略有增大,但增幅很小。不同负荷时,最佳背压随机组负荷的增大而升高。

3) 经过背压优化的太阳能辅助空冷发电系统热性能与原机组相比有较大提升,也优于纯槽式太阳能热发电机组。

4) 与原常规机组相比,耦合太阳集热场对机组背压敏感性的影响较大,对背压优化的影响较小。

[参考文献]

- [1] Zoschak R, Wu S. Studies of the direct input of solar energy to a fossil-fueled central station steam power plant [J]. Solar Energy, 1975, 17(5): 297—305.
- [2] Ying Y, Hu E J. Thermodynamic advantages of using solar energy in the regenerative Rankine power plant [J].

- Applied Thermal Engineering, 1999, 19(11): 1173—1180.
- [3] Hu E, Yang Y, Nishimura A, et al. Solar thermal aided power generation [J]. Applied Energy, 2010, 87(9): 2881—2885.
- [4] Pierce W, Gauché P, Backström T V, et al. A comparison of solar aided power generation (SAPG) and stand-alone concentrating solar power (CSP): A South African case study [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 61(2): 657—662.
- [5] Wu Junjie, Hou Hongjuan, Yang Yongping, et al. Annual performance of a solar aided coal-fired power generation system (SACPG) with various solar field areas and thermal energy storage capacity [J]. Applied Energy, 2015, 157: 123—133.
- [6] Wu Junjie, Hou Hongjuan, Yang Yongping. Annual economic performance of a solar-aided 600 MW coal-fired power generation system under different tracking modes, aperture areas, and storage capacities [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 104: 319—332.
- [7] 侯宏娟, 高 嵩, 杨勇平. 槽式集热场辅助燃煤机组回热系统混合发电热性能分析 [J]. 太阳能学报, 2011, 32(12): 1772—1776.
- [7] Hou Hongjuan, Gao Song, Yang Yongping. Thermodynamics analysis of coal-fired power generation system aided by parabolic trough collective fields [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2011, 32(12): 1772—1776.
- [8] 侯宏娟, 毛 剑, 杨勇平, 等. 太阳能辅助燃煤机组发电系统集热温度优化 [J]. 中国电机工程学报, 2012, (20): 76—81.
- [8] Hou Hongjuan, Mao Jian, Yang Yongping, et al. Optimization of solar collector working temperature for solar aided coal-fired power generation systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, (20): 76—81.
- [9] Gupta M K, Kaushik S C. Exergetic utilization of solar energy for feed water preheating in a conventional thermal power plant [J]. International Journal of Energy Research, 2009, 33(6): 593—604.
- [10] Suresh M V J J, Reddy K S, Kolar A K. 4-E (Energy, Exergy, Environment, and Economic) analysis of solar thermal aided coal-fired power plants [J]. Energy for Sustainable Development, 2010, 14(4): 267—279.
- [11] Zhu Yong, Zhai Rongrong, Zhao Miaomiao, et al. Evaluation methods of solar contribution in solar aided coal-fired power generation system [J]. Energy Conversion & Management, 2015, 102: 209—216.
- [12] 侯宏娟, 王 露, 付 立, 等. 太阳能辅助空冷机组互补发电系统热性能研究 [J]. 工程热物理学报, 2015, 36(8): 1638—1642.
- [12] Hou HongJuan, Wang Lu, Fu Li, et al. Thermal performance researches of solar aided air-cooled coal-fired system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(8): 1638—1642.
- [13] 於震跃. 槽式太阳能集热场辅助燃煤发电系统的性能分析 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [13] Yu Zhenyue. Performance analysis of trough solar collector field aided coal-fired power system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [14] Patnode A M. Simulation and performance evaluation of parabolic trough solar power plants [D]. Wisconsin-Madison: University of Wisconsin-Madison, 2006: 176—181.
- [15] 周兰欣, 周 玉, 曹智杰. 600 MW 直接空冷机组凝汽器换热面积计算 [J]. 汽轮机技术, 2012, 54(2): 99—100.
- [15] Zhou Lanxin, Zhou Yu, Cao Zhijie. Computation of condenser heat transfer area of 600 MW direct air cooling unit [J]. Turbine technology, 2012, 54(2): 99—100.
- [16] 杨立军, 杜小泽, 杨勇平. 空冷凝汽器全工况运行特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(8): 24—25.
- [16] Yang Lijun, Du Xiaoze, Yang Yongping. Performance analysis of air-cooled condensers at all operating conditions [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(8): 24—25.
- [17] 郭 苏, 刘德有, 王 沛, 等. 槽式太阳能热发电系统综述 [J]. 华电技术, 2014, 36(12): 70—75.
- [17] Guo Su, Liu Deyou, Wang Pei, et al. Overview of parabolic trough solar thermal power generation system [J]. Huadian Technology, 2014, 36(12): 70—75.

BACK-PRESSURE SENSITIVITY ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF A SOLAR AIDED DIRECT AIR-COOLED POWER GENERATION SYSTEM

Hou Hongjuan, Song Jia, Xu Zhang, Liang Mingyu, Wang Lu, Yang Yongping

(National Thermal Power Engineering & Technology Research Center, North China Electric Power University,
Beijing 102206, China)

Abstract: A solar aided direct air-cooled (coal-fired) power generation system model has been built based on the first law of thermodynamics, η -NTU method and the characteristics of key components. A parabolic trough solar field aided 600 MW direct air-cooled power generation system has been investigated as a case study. The effect of *DNI*, frontal velocity of air and ambient temperature on back-pressure has been analyzed under different load conditions. The results showed that, the back-pressure increases with the introduction of solar energy, but the growth rate is not big. The back-pressure increases with the increasing *DNI* or the ambient temperatures, and decreases with the increasing frontal velocity of air within a certain range. Besides, based on analysis mentioned above, the back-pressure has been optimized to maximize the net power of the steam turbine, and the optimized back-pressures under different *DNI*, ambient temperature, and loads have been obtained. The result showed that *DNI* has a smaller influence on the back-pressure optimization than frontal velocity of air or ambient temperature.

Keywords: solar energy; system integration; coal-fired power plants; system optimization