

电热综合能源系统框架下蒙西电网 电源容量最优配比研究

路晓敏¹, 陈 磊¹, 徐 飞¹, 李则衡², 王小海³, 侯佑华³, 齐 军³, 郭 琦³

(1. 清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084;

2. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012;

3. 内蒙古电力(集团)有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 在电热综合能源系统框架下从总的节能减排效益角度出发, 以供电供热总化石能源消耗最小为目标, 研究高比例可再生能源系统中各类电源的相互关联机理及能源资源优化配置问题。基于对各类电源、热源在供电、供热、煤耗和灵活性等方面的分析, 建立了以化石能源消耗最少为目标的电源容量配比优化模型, 并结合蒙西电网的实际数据进行计算分析。对当前电、热负荷水平下的电源容量最优配比及各类电源之间的相互关联关系进行了讨论, 为可再生能源和常规电源的协调发展和节能减排效益最大化提供科学指导。

关键词: 电热综合能源系统; 灵活性; 节能减排; 容量配比

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.018

0 引言

近年来, 由于清洁供电和供暖的需求, 我国北方地区风电等可再生能源和热电联产发展迅速, 给电网运行带来很大变化。由于可再生能源自身很强的随机波动性, 其代替常规火电降低化石能源消耗的同时, 还需要大量的常规电源在灵活性上进行支持调节, 以实现系统发电和负荷之间的平衡^[1-5]。但是, 热电联产机组的电出力受其热出力约束, 限制了其功率调节能力, 挤压了系统中的灵活调节资源, 不利于可再生能源消纳^[6-7]。因此, 系统各类电源之间是相互制约、相互关联的, 存在容量配比的优化问题。电、热系统之间也是相互关联的^[8], 电力、热力系统之间通过热电联产、热泵、电制热等发生耦合, 从而使得 2 个系统在时间和空间上是互补的, 它们的运行相互影响, 将电力系统和热力系统统一在一个系统中形成电热综合能源系统。在电热综合能源系统框架下, 可以通过优化常规电源、可再生能源、热电联产和其他热源容量的配比关系, 在满足供电供热约束的条件下使得供电供热的总化石能源消耗最少, 实现节能减排效益最大化。

电源规划在电力系统发展中具有重要的地位。传统的电源规划模型通常都以总费用值最小为目标

函数, 总费用包括与发电厂装机容量相关的投资费用和与实际出力相关的运行费用, 计及的约束条件有电力电量平衡、最小开机容量等, 采用生产模拟方法计算目标值^[9]。文献[10-13]介绍了考虑目标成本最小的电源规划建模和求解方法。文献[14-16]考虑了不确定性因素对电源规划的影响, 在目标函数中计及了负荷预测不确定性、电价等的影响。文献[17-18]在规划中考虑环保效益, 分析了各类机组排放物对环境的危害并建立了总费用现值最小、CO₂ 排放量最小的多目标电源优化模型。文献[19]提出在市场环境下追求各发电公司利润最大化的电源规划模型。电源规划问题是高维非凸的非线性优化问题, 求解比较复杂。在求解算法上有启发式算法、数学优化方法及人工智能方法。但是现有方法更多从总费用值和利润出发, 以效益成本为中心, 很少将可再生能源对电网的影响考虑在内, 对高比例可再生能源接入的系统中各类电源的相互关联机理分析不够清晰, 而且传统电源规划主要局限在电力系统范畴, 未能从供电、供热 2 个系统的整体角度进行考虑。本文借助电源优化模型, 以化石能源消耗最小为目标, 考虑了常规电源和可再生电源各自的出力特性, 计算了各种约束条件下各类电源的最优容量配比, 对高比例可再生能源接入的系统中常规电源与可再生能源之间的相互关联关系进行分析, 更好地规划和指导电源的发展和配比。

本文将首先在电热综合能源系统框架下分析常规火电、热电联产及可再生能源在煤耗、灵活性上的性能, 以及热电联产及燃煤锅炉在供热煤耗上的性能, 进而分析不同类型电源设备之间的相互关联制约关系; 以供电供热总化石能源消耗最少为目标, 建立电热综合能源系统的电源容量配比优化模型, 为可再

收稿日期: 2017-02-27; 修回日期: 2017-05-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51377002); 国家科技支撑计划项目(2015BAA01B03); 国家电网公司科技项目(SGTJ00-00KXJS1500072); 内蒙古电力(集团)有限责任公司科技项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51377002), the National Science and Technology Support Plan of China(2015BAA01B03), the Science and Technology Project of SGCC(SGTJ0000KXJS1500072) and the Science and Technology Project of Inner Mongolia Power Company

生能源和常规电源的协调有序发展提供科学指导。

1 电热综合能源系统中机组的性能与相互关联关系

从我国北方电网实际情况出发,常规火电、热电联产和风电是主要电源类型,热电联产和燃煤锅炉是主要热源类型。3类电源在灵活性和环保性方面的表现不同。机组的灵活性和环保性是重要性能,直接影响了机组在运行过程中的竞争力。机组的灵活性是指当电力系统发生快速大幅功率波动时机组通过功率调节以维持系统连续可靠运行的能力^[20-22]。灵活性越高的机组越有利于跟随可再生能源波动。环保性主要反映机组的化石能源消耗量以及排放物的污染程度。煤耗率是反映机组环保性能的重要指标,指供电或供热设备提供单位电量和热量所需的煤耗量。常规火电、热电联产和风电在灵活性和环保性上各有优势和劣势,在互相竞争的同时相互牵制、相互扶持。目前,我国风电装机和热电联产装机的规划缺乏考虑与系统其他机组之间的关联。本文从我国北方电网实际情况出发,梳理各类电源之间的关联关系,在电热综合能源系统框架下建立电源容量配比的优化模型,通过优化结果评估现有电源结构的合理性,并为各类电源的规划提供指导。

2 电源容量配比的数学模型

本文提出的电源容量配比模型为考虑一定的电热负荷下,分析供电、供热系统总体效益最优的机组配比关系的模型,如何评价系统的总体效益是关键。本文以煤耗量为评价指标,煤耗量一方面可以反映各类发电供热设备的运行成本,与经济性相关联;另一方面直接对应着污染气体的排放量,与环保效益相关联,可以作为研究电源容量配比时评价系统效益的指标。因此本文从环境效益出发,以供电、供热总化石能源消耗最小为目标进行分析,分析电热综合能源系统中不同类型电源的容量配比关联关系。

常规火电、热电联产和风电是我国北方电网的主要电源类型。由于气电、水电和抽水蓄能的发展受资源限制很大,光伏的数量和发展速度相比风电而言较小,因此在本文中只考虑了它们现有的运行容量,而未在优化模型中作为决策变量进行考虑。本文模型的决策变量如下:常规火电装机容量 S_{huo} 、供热机组装机容量 S_{re} 、风电装机容量 S_{wind} 、常规火电每日开机容量 C_{huo} 、热电联产每日开机容量(供热季) C_{re} 、各时段常规火电出力 $P_{huo,t}$ 、各时段供热机组出力(供热季) $P_{re,t}$ 、各时段风电出力 $P_{wind,t}$ 、热电联产供热比例(供热季) K_{re} 。其中直接待求的变量为常规火电、热电联产及风电的装机容量,起辅助作用的决策变量为各

类机组的开机容量及出力值、热电联产在供热季的供热比例等。需要说明的是,由于热电联产机组在非供热季只承担电负荷,没有热负荷约束,其电性能与常规火电相同,因此本文模型的热电联产机组只在供热季进行供热并满足对应的供热约束,在非供热季热电联产性能与常规火电相同,视为常规火电。因此本文在运行模拟时将供热季和非供热季分开进行。

2.1 目标函数

模型的目标函数为:在满足系统电负荷和热负荷需求的前提下,系统在运行期间的总煤耗量最小。系统的目标函数可表述为:

$$\min H_{\Sigma}=f(P,Q) \quad (1)$$

其中, H_{Σ} 为系统的供电供热总煤耗,由所有供电供热设备的电煤耗和热煤耗组成; P 为电源电出力; Q 为设备供热量。系统总煤耗由供电煤耗和供热煤耗组成,系统中的供电机组有常规火电、热电联产和风电,其消耗的电化石能源用电量和煤耗率的乘积表示,其中风电的煤耗率为0。供热的化石能源消耗量由热电联产机组的供热耗煤量和燃煤锅炉的耗煤量组成。系统总煤耗可以表述为:

$$H_{\Sigma}=\sum_{t=1}^T P_{huo,t} \gamma_{huo} + \sum_{t=1}^T P_{re,t} \gamma_{re} + Q_{re} \lambda_{re} + Q_{mei} \lambda_{mei} \quad (2)$$

其中, γ_{huo} 、 γ_{re} 分别为常规火电、热电联产电出力煤耗率; λ_{re} 、 λ_{mei} 分别为热电联产、燃煤锅炉热出力煤耗率; $P_{huo,t}$ 、 $P_{re,t}$ 分别为 t 时刻常规火电、热电联产出力; Q_{re} 、 Q_{mei} 分别为热电联产、燃煤锅炉的供热量。

2.2 约束条件^[23-26]

需要满足的约束条件有电力/热力需求约束、机组利用率约束、运行约束和装机约束。

2.2.1 电力/热力需求约束

系统的电力/热力需求约束包括功率平衡约束、热负荷约束和系统备用约束。

a. 功率平衡约束。

任意时刻各类电源的出力总和应与电负荷需求相等。

$$P_{huo,t} + P_{re,t} + P_{wind,t} = P_{load} \quad \forall t \quad (3)$$

其中, $P_{huo,t}$ 、 $P_{re,t}$ 、 $P_{wind,t}$ 、 P_{load} 分别为 t 时刻常规火电、热电联产、风电的功率及电负荷的功率。

b. 热负荷约束。

在供热季,系统中有2种供热方式:热电联产供热和燃煤锅炉供热,系统热负荷约束为供热量与供热需求相等。

$$Q_{re} + Q_{mei} = Q_r \quad (4)$$

其中, Q_r 为系统的热负荷需求。

c. 系统备用约束。

系统开机的电源在满足负荷需求之余需要留有一定的备用,同时机组检修等因素使得机组可用率小

于 1, 装置容量和开机容量之间要考虑一定可用率。

$$C_{\text{huo}} + C_{\text{re}} + \mu_{\text{w,c}} S_{\text{wind}} \geq (1 + \mu_{\text{res}}) P_{\text{load,max}} \quad (5)$$

$$C_{\text{huo}} \leq \eta_{\text{huo}} S_{\text{huo}}, \quad C_{\text{re}} \leq \eta_{\text{re}} S_{\text{re}} \quad (6)$$

其中, $\mu_{\text{w,c}}$ 为风电置信系数; μ_{res} 为备用系数; η 为机组装机的可用率, 本文中取 80%。

2.2.2 机组利用率约束

机组的利用小时数可以用来衡量机组利用率, 反映了机组的经济性。如果利用小时数过低, 电源建设无法收回成本, 这种情况也是不合适的。式(7)表示各类机组都需要满足最低利用率要求。

$$\sum_{t=1}^T P_{x,t} / S_x \geq T_x \quad x \in \{\text{huo}, \text{re}, \text{wind}\} \quad (7)$$

其中, T_x 为机组的最低利用小时数要求。常规火电和热电联产机组均为煤电机组, 其利用率要求往往是一致的, 即有 $T_{\text{huo}} = T_{\text{re}}$ 。

2.2.3 运行约束

a. 常规机组爬坡约束。

$$\begin{cases} P_{\text{huo},t} - r_{\text{huo}}^{\text{d}} \leq P_{\text{huo},t+1} \leq P_{\text{huo},t} + r_{\text{huo}}^{\text{u}} \\ P_{\text{re},t} - r_{\text{re}}^{\text{d}} \leq P_{\text{re},t+1} \leq P_{\text{re},t} + r_{\text{re}}^{\text{u}} \end{cases} \quad \forall t \quad (8)$$

其中, $r_{\text{huo}}^{\text{u}}, r_{\text{huo}}^{\text{d}}$ 和 $r_{\text{re}}^{\text{u}}, r_{\text{re}}^{\text{d}}$ 分别为常规火电和热电联产机组的上、下调节速率。水电机组调节速率是最快的, 可以达到每分钟 50%~100%; 燃气机组也比较快, 可以达到每分钟 20%; 联合循环和汽轮机的热效率高, 但爬坡率较低, 一般只有每分钟 2%~5%^[7]。

b. 常规机组出力约束。

$$\begin{cases} L_{\text{huo}} C_{\text{huo}} \leq P_{\text{huo},t} \leq U_{\text{huo}} C_{\text{huo}} \\ L_{\text{re}} C_{\text{re}} \leq P_{\text{re},t} \leq U_{\text{re}} C_{\text{re}} \end{cases} \quad \forall t \quad (9)$$

其中, $L_{\text{huo}}, U_{\text{huo}}$ 和 $L_{\text{re}}, U_{\text{re}}$ 分别为常规火电和热电联产机组出力的最小、最大限制百分比。

c. 风电出力约束。

风电具有随机波动的出力特性, 其出力约束与常规机组不同, 可用典型出力曲线来约束。风电装机规模改变后的出力曲线难以预测, 可以依据历史典型出力进行调整。历史典型风电出力曲线是根据典型风场景筛选并经过修正后的曲线, 它与风电装机规模及风场景有关, 能够反映当地风水平。在容量配比优化分析中, 可假设风电装机发生改变后的风电出力是历史风电出力的比例伸缩, 如式(10)所示。

$$P_{\text{wind}}^{\text{typical}} = \frac{S_{\text{wind}}}{S_{\text{wind}}^{\text{now}}} P_{\text{wind}}^{\text{typical,now}} \quad (10)$$

其中, $P_{\text{wind}}^{\text{typical}}$ 为典型风电出力; $S_{\text{wind}}^{\text{now}}$ 为当前风电装机容量; $P_{\text{wind}}^{\text{typical,now}}$ 为当前风电装机水平下的典型风电出力。

风电的出力约束为每一时刻的风电出力不能大于该时刻的最大典型出力值。

$$P_{\text{wind},t} \leq P_{\text{wind},t}^{\text{typical}} \quad \forall t \quad (11)$$

2.2.4 装机约束

常规火电、热电联产和风电的装机容量是本模型

的待决策变量。若是在已有装机水平上对电网机组进行配比优化, 则机组装机量不能低于其当前装机水平, 如式(12)所示。若不考虑当前装机现状, 则该约束条件可以舍弃。

$$S_{\text{huo}} \geq S_{\text{huo}}^{\text{now}}, \quad S_{\text{re}} \geq S_{\text{re}}^{\text{now}}, \quad S_{\text{wind}} \geq S_{\text{wind}}^{\text{now}} \quad (12)$$

其中, $S_{\text{huo}}^{\text{now}}, S_{\text{re}}^{\text{now}}, S_{\text{wind}}^{\text{now}}$ 为待决策电源的当前装机容量。

2.3 求解方法

为了减少计算量, 本文在求解时采用典型日运行模拟的方法, 即从全年数据中选择典型日进行电力电量计算。典型日的选取需要考虑到负荷和风资源的季节性和周期性。本文的选取方法为^[27]: 逐月选取与该月工作日(非工作日)平均负荷最为接近的曲线为典型工作日(非工作日)负荷场景。以典型负荷曲线为基础, 分别筛选出风场景中正调峰特性和反调峰特性最强的曲线并加以修正作为典型风场景。通过选择多个典型风场景, 考虑了风电的不确定性和随时间的波动性。利用典型风场景进行配比规划研究虽然在计算精度上具有一定的误差, 但是该误差不会影响到电源容量配比结果, 并且大幅降低了计算量。此外, 考虑到蒙西电网供热季和非供热季的期间运行特性差异较大, 构造的典型场景中考虑到了供热季和非供热季的区别, 并在运行约束中有所体现。

本文对常规火电、热电联产和风电分别按照其特性进行建模, 将系统的电和热联合在一起构建配比优化模型。该模型通过 CPLEX 优化包求解, 简单易行, 得到的结果可用于分析实际系统电源配比的合理性, 能够反映各类机组的关联关系。需要注意的是, 本文的电源配比规划模型建立在电网配套建设足够强的假设下, 将同类电源看作整体进行计算, 未考虑电源的空间分布特性, 减少了一定的计算量。考虑电源空间分布特性的分析仍有待后续展开。

3 蒙西电网机组容量配比的分析和优化

以蒙西电网为例, 对蒙西电网实际数据进行计算分析。本文选取了 2015 年蒙西电网 48 个典型日负荷来代表全年负荷数据, 取每小时为一个运行点, 典型日负荷曲线如图 1 所示。

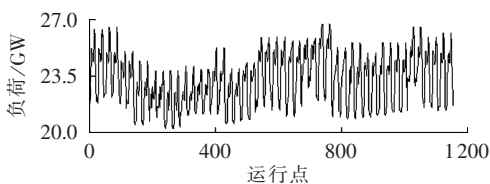


图 1 蒙西电网典型日负荷曲线

Fig.1 Typical daily load curve of West Inner Mongolia Power Grid

系统参数及边界条件见表 1, 表中调节范围为标么值。各类机组的参数和煤耗率为蒙西电网机组的

实际数据统计和经验数据所得,蒙西电网对各类机组的利用率要求为煤电 3000 h、风电 2000 h。

表 1 系统参数
Table 1 System parameters

机组类型	调节范围	爬坡能力/%	煤耗率/[g·(kW·h) ⁻¹]	
			电	热
常规火电	[0.5,1]	5	300	—
热电联产	[0.6,0.9]	5	300	30
风电	—	—	—	—
燃煤锅炉	—	—	—	135

下面对 3 个算例进行分析:算例 1,固定各类机组的当前容量,考察当前装机水平下系统的煤耗量及各类机组利用率的情况;算例 2,从当前装机水平出发,进行机组容量优化,考察各类机组的未来装机空间;算例 3,不考虑当前装机的实际水平,计算目前负荷水平下的最优装机,考察蒙西电网当前装机比例的合理性和优化空间。算例的结果和分析如下。

算例 1:将装机约束式(12)改写为 $S_{\text{huo}}=S_{\text{huo}}^{\text{now}}, S_{\text{re}}=S_{\text{re}}^{\text{now}}, S_{\text{wind}}=S_{\text{wind}}^{\text{now}}$ 。固定机组容量如表 2 所示,并不考虑机组利用率约束式(7)。

表 2 3 个算例的结果对比
Table 2 Comparison of results among three cases

算例	机组容量/MW			煤耗/t
	常规火电	热电联产	风电	
1	9850	17030	14976	7.5141×10 ⁷
2	14608	17207	14976	7.5751×10 ⁷
3	10783	19887	13567	7.5322×10 ⁷

计算结果显示,最优运行方式对应的系统煤耗量为 7.5141×10⁷ t,常规火电的利用率为 3722 h,热电联产的利用率为 4422 h,风电的利用率为 1817 h。若强行提高对风电的利用率需求,则会导致模型无解,即蒙西电网现有的装机配比和容量下风电的利用小时数最高为 1817 h,无法达到 2000 h 的要求。

算例 2:从当前装机水平出发,并考虑各机组利用率约束进行机组容量优化,即考虑式(7)和(12)。

计算结果显示,系统最小煤耗量为 7.5751×10⁷ t,各类机组装机如表 2 所示。经过对比发现,在当前装机的基础上,风电和热电联产机组的装机空间已经饱和,常规火电还有 4758 MW 的上升空间,各类机组的实际利用率为常规火电 3342 h、热电联产 3511 h、风电 2000 h。与算例 1 中各类机组的利用率相比,煤电机组的利用率下降,风电利用率在限值上。可见为了满足风电的利用率要求,一方面需要增大常规火电装机,另一方面降低煤电机组的利用率以提供灵活调节能力进行风电消纳,此时的系统煤耗量比当前要大。

算例 3:不考虑当前装机实际水平的情况下进行优化,即改写式(12)为 $S_{\text{huo}}\geq 0, S_{\text{re}}\geq 0, S_{\text{wind}}\geq 0$ 。

计算结果显示,目标最优时的系统煤耗量为

7.5322×10⁷ t,最优机组容量如表 2 所示。对比当前与最优装机可以发现,常规火电和热电联产分别有 933 MW 和 2857 MW 的上升空间,风电装机则需要减少 1409 MW,常规火电实际利用率为 3457 h,热电联产为 3760 h,风电为 2000 h。优化结果显示,系统通过增加煤电装机降低风电装机来满足风电的利用率要求,煤耗与算例 1 相比略有上升,说明当前蒙西电网中高风电装机和高风电利用率要求不利于系统的目标最优。

通过分析 3 个算例的计算结果发现:蒙西电网中当前的风电装机比例较高,热电联产比例相对较大,系统灵活性调节能力不足;为达到风电高利用率的要求,一方面可以增加煤电装机以增大消纳风电的能力,但是会带来系统煤耗的增加,另一方面可以降低对风电的利用率需求,必要的弃风也是提高系统灵活性充裕度的手段;在蒙西电网的当前负荷水平和风电利用率需求下,最优方案为常规火电增装 933 MW,热电联产增装 2857 MW,风电减少 1409 MW。该方案煤耗低、投资少、更经济方便;风电是清洁能源,能够降低系统的煤耗,但是风电的高利用率要求反而增加了系统煤耗和建设投资,可见,从社会效益最大化出发,合理的风电建设和适当的弃风是必要的。

4 不同类型电源容量配比和关联关系分析

本节在配比模型和第 3 节基础算例的基础上,探究蒙西电网常规电源和风电的关联关系及改变热电机组供热比例对其他机组利用率和系统煤耗的影响。

4.1 风电消纳与常规机组之间的关系

风电消纳需要系统中的煤电机组提供灵活性功率,煤电机组的装机水平和利用率需求都会影响其发挥灵活性的能力。以下通过计算分析风电消纳与煤电机组利用率和装机水平的关系。

在当前装机水平下,改变煤电机组(常规火电和热电)的利用率要求,观察风电利用率和系统总体煤耗的变化,结果如图 2 所示。

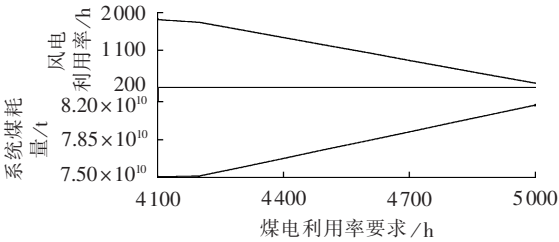


图 2 不同煤电利用率要求下的
风电利用率和系统煤耗量

Fig.2 Curves of wind power utilization and system coal consumption vs. coal power utilization required

由图 2 可见,在当前装机水平下,提高对煤电机

组的利用率会减小系统中的可调功率空间,降低灵活性和消纳风电的能力,从而导致风电的利用率直线下降,并伴随着系统的总体煤耗不断上升。

固定风电装机为当前水平,观察风电利用率要求发生变化时煤电机组的装机和系统总煤耗的变化情况,结果如图 3 所示。

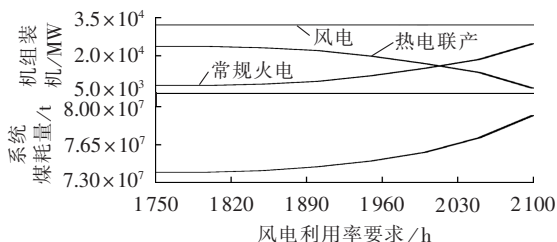


图 3 不同风电利用率要求下的机组装机和系统煤耗量

Fig.3 Curves of energy capacities and system coal consumption vs. wind power utilization required

由图 3 可见,随着风电利用率要求的提高,系统煤电的总装机不发生变化,但是常规火电的装机上升,热电联产的装机下降,灵活性好的机组代替灵活性差的机组,并伴随着系统的总煤耗不断上升。

4.2 热电联产机组对其他机组利用率及系统煤耗的影响

基于算例 3,当其他条件和参数不变时,改变热电联产机组供热比例,即改变热电联产装机,优化其他机组的容量,观察常规火电装机、风电装机和系统煤耗的变化情况,结果如图 4 所示。

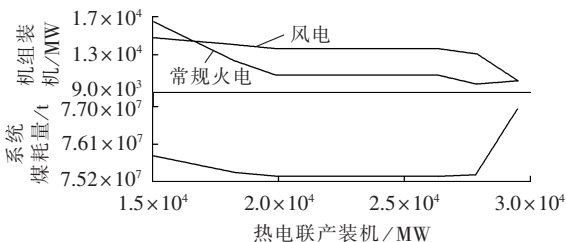


图 4 不同热电联产装机下的机组装机和系统煤耗量

Fig.4 Curves of energy capacities and system coal consumption vs. CHP capacity required

由图 4 可见,随着热电联产装机容量增加,常规火电和风电装机先下降再平稳再下降,对应系统煤耗为先下降再平稳再上升。常规火电和风电装机下降的原因一方面是热电联产装机增多挤压了常规火电和风电的空间,另一方面是常规火电装机下降,系统灵活性降低,不利于消纳风电,进一步导致风电装机下降。煤耗先下降的原因是热电联产供热成本低于燃煤锅炉,热煤耗降低;再上升的原因是热电联产限制风电消纳,电煤耗增加。

5 结论

本文在电热综合能源系统的层面,分析了高比例可再生能源接入系统中各类电源在灵活性和环保性

上的性能,并建立了以供电供热总化石能源消耗最少为目标的各类机组容量配比的优化模型,分析了高比例可再生能源接入下各类电源的相互关联关系。可再生能源虽然能降低系统煤耗,但在缺乏大规模储能的情况下需要常规机组提供灵活性支持,存在容量配比优化问题;热电联产机组供电供热综合煤耗低,但降低了系统灵活性,影响可再生能源消纳,比例过高时反而会增加系统煤耗,存在最优容量。

基于蒙西电网的实际数据,评价了其各类机组当前装机的合理性及优化调整空间,分析结果表明:

a. 风电装机容量偏大会造成风电消纳困难、利用小时数偏低,为了达到风电消纳要求,可以通过增加常规火电以提高系统的灵活性;

b. 常规机组的灵活性能与机组类型、机组的利用率要求密切相关,常规机组利用率要求升高,其提供的灵活性下降,消纳风电能力下降;

c. 热电联产替代燃煤锅炉供热有利于降低热煤耗,但同时替代了常规火电的发电空间,降低了系统的灵活性,不利于消纳可再生能源,存在最优容量。

本文基于蒙西电网分析得到的机组关联关系对我国其他类似电网有借鉴意义,可用于评价电源结构的合理性,有利于指导电网更科学地规划可再生能源、常规火电、热电联产容量,实现各种电源的协调发展,降低系统的总体煤耗,提高社会总体效益。后续工作将考虑电源投资、可再生能源空间分布、网络约束等因素,从电热综合能源系统的角度研究更加完善的电源容量配比方法。

参考文献:

- [1] 吕泉,陈天佑,王海霞,等. 含储热的电力系统电热综合调度模型[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):79-85.
LÜ Quan, CHEN Tianyou, WANG Haixia, et al. Combined heat and power dispatch model for power system with heat accumulator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 79-85.
- [2] 姜欣,陈红坤,向铁元,等. 考虑调峰特性的电网风电接入能力分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(12):13-18,25.
JIANG Xin, CHEN Hongkun, XIANG Tiejue, et al. Reactive power control of sub-synchronous oscillation damping system for DFIG-based wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12): 13-18, 25.
- [3] 孙荣富,张涛,梁吉. 电网接纳风电能力的评估及应用[J]. 电力系统自动化,2011,35(4):70-76.
SUN Rongfu, ZHANG Tao, LIANG Ji. Evaluation and application of wind power integration capacity in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 70-76.
- [4] LIU W, LUND H, MATHIESEN B V. Large-scale integration of wind power into the existing Chinese energy system[J]. Energy, 2011, 36(8):4753-4760.
- [5] 丰颖,负志皓,周琼,等. 考虑风电接入的在线风险评估和预防控制[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):61-68.
FENG Ying, YUN Zhihao, ZHOU Qiong, et al. Online risk assess-

- ment and preventive control considering wind-power integration [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 61-68.
- [6] 白雪飞,王丽宏,杜荣华. 风电大规模接入对蒙西电网调峰能力的影响[J]. 内蒙古电力技术, 2010, 28(1): 1-3.
- BAI Xuefei, WANG Lihong, DU Ronghua. Influence on peak regulation capability to inner mongolia power grid with large scale incoming of wind power field[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2010, 28(1): 1-3.
- [7] 苏阔. 含风电集中供热的电力系统优化调度研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- SU Kuo. Research on power system optimal dispatch with wind power central heating[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [8] 徐飞, 闵勇, 陈磊, 等. 包含大容量储热的电-热联合系统[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5063-5072.
- XU Fei, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Combined electricity-heat operation system containing large capacity thermal energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5063-5072.
- [9] 李小明, 陈金富, 段献忠, 等. 电源规划模型及求解方法研究综述[J]. 继电器, 2006, 34(23): 78-84.
- LI Xiaoming, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong, et al. A survey of modeling and optimization methods on generation expansion planning[J]. Relay, 2006, 34(23): 78-84.
- [10] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京: 水电水利出版社, 1990: 223-266.
- [11] 张湘艳, 曾克娥, 陈金富. 电源规划中的可靠性分析[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(1): 4-6.
- ZHANG Xiangyan, ZENG Kee, CHEN Jinfu. Reliability analysis in generation system planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(1): 4-6.
- [12] 张沈习, 程浩忠, 邢海军, 等. 配电网中考虑不确定性的分布式电源规划研究综述[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 1-9.
- ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, XING Haijun, et al. Review of DG planning considering uncertainties for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 1-9.
- [13] BLOOM J A. Long-range generation planning using decomposition and probabilistic simulation[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(4): 797-802.
- [14] FARGHAL S A, KANDIL M S, ABDEL-AZIZ M R. Generation expansion planning: an expert system approach[J]. IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution, 1988, 135(4): 261-267.
- [15] MO B, HEGGE J, WANGENSTEEN I. Stochastic generation expansion planning by means of stochastic dynamic programming [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 662-668.
- [16] HE Y Q, DAVID A K. Advances in global optimisation for generation expansion planning[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1995, 142(4): 423-428.
- [17] KIM Y C, AHU B H. Multicriteria generation-expansion planning with global environmental considerations[J]. IEEE Transactions on engineering management, 1993, 40(2): 154-161.
- [18] SU C T, LII G R, CHEN J J. Long-term generation expansion planning employing dynamic programming and fuzzy techniques [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology 2000. Goa, India: IEEE, 2000: 644-649.
- [19] 赵新宇, 王锡凡, 陈皓勇. 火电厂投资风险决策的模型与整体框架[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 7-11.
- ZHAO Xinyu, WANG Xifan, CHEN Haoyong. Strategy decision model and framework of thermal power generation investment [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 7-11.
- [20] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 147-158.
- LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 147-158.
- [21] 李海波, 鲁宗相, 乔颖, 等. 大规模风电并网的电力系统运行灵活性评估[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1672-1678.
- LI Haibo, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. Assessment on operational flexibility of power grid with grid-connected large-scale wind farms[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1672-1678.
- [22] KEHLER J H, HU M. Planning and operational considerations for power system flexibility[C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, MI, USA: IEEE, 2011: 1-3.
- [23] 李小明, 陈金富, 段献忠, 等. 电源规划模型及求解方法研究综述[J]. 继电器, 2006, 34(23): 78-84.
- LI Xiaoming, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong, et al. A survey of modeling and optimization methods on generation expansion planning[J]. Relay, 2006, 34(23): 78-84.
- [24] GÓMEZ EXPÓSITO A, CONEJO A J, CAÑIZARES C, et al. Electric energy systems: analysis and operation[M]. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2016: 9-25.
- [25] 陈磊, 徐飞, 王晓, 等. 储热提升风电消纳能力的实施方式及效果分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4283-4290.
- CHEN Lei, XU Fei, WANG Xiao, et al. Implementation and effect of thermal storage in improving wind power accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4283-4290.
- [26] 李正茂, 张峰, 梁军, 等. 含电热联合系统的微电网运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3569-3576.
- LI Zhengmao, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Optimization on microgrid with combined heat and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3569-3576.
- [27] 肖建华, 王锐风, 温春楠, 等. 典型日负荷曲线预测的一种简单方法[J]. 吉林电力, 2006, 34(2): 14-17.
- XIAO Jianhua, WANG Ruifeng, WEN Chunnan, et al. A simple method of typical day load curve forecasting[J]. Jilin Electric Power, 2006, 34(2): 14-17.

作者简介:



路晓敏

路晓敏(1993—),女,山东滨州人,硕士研究生,主要研究方向为新能源电力系统动态分析与运行、频率稳定分析(E-mail: luxm15@mails.tsinghua.edu.cn);

陈磊(1982—),男,湖北公安人,副教授,博士,主要研究方向为新能源电力系统动态分析与运行(E-mail: chenlei08@tsinghua.edu.cn);

徐飞(1974—),男,安徽桐城人,副研究员,博士,主要研究方向为新能源电力系统动态分析与运行(E-mail: xufei@tsinghua.edu.cn)。

Optimal energy-source capacity ratios of integrated electricity-heat energy system of West Inner Mongolia Power Grid

LU Xiaomin¹, CHEN Lei¹, XU Fei¹, LI Zeheng², WANG Xiaohai³, HOU Youhua³, QI Jun³, GUO Qi³

(1. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment,

Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. College of Information Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

3. Inner Mongolia Power Company, Hohhot 010010, China)

Abstract: The interrelationships among different energy sources and their optimal capacity ratios of the integrated electricity-heat energy system with high proportion of renewable energy sources are researched to minimize its total fossil energy consumption for energy saving and emission reduction. The performances of different electricity and heat sources are analyzed in the aspects of power supply, heat supply, coal consumption, flexibility, etc., based on which, a capacity-ratio optimization model with the minimum fossil energy consumption as its objective is established. Case study is performed based on the actual data of West Inner Mongolia Power Grid. The optimal capacity ratios of different energy sources for present electricity and heat load levels and their interrelationships are discussed, which provides the scientific guidance for the coordinative development of renewable and conventional energy sources and the benefit maximization of energy saving and emission reduction.

Key words: integrated electricity-heat energy system; flexibility; energy saving and emission reduction; capacity ratio