

基于热网互联的电力系统灵活性调度模型

魏 炜¹,倪颖婷¹,罗凤章¹,徐瑞凯¹,徐元孚²

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072;2. 国网天津市电力公司,天津 300010)

摘要: 为解决冬季采暖期电力系统灵活性不足的问题,基于热网互联的应用背景,综合考虑热电联产机组的热-电运行特性、热力管网的互联特性和用户建筑物的蓄能特性,建立电力系统灵活性调度模型。该模型分别以谷荷时段的向下灵活性和峰荷时段的向上灵活性最大为优化目标,在多源互联热力管网的结构下,充分利用不同热电联产机组运行特性的差异,实现对热-电输出功率的合理分配。算例分析表明,在考虑热网互联和建筑物蓄能特性的情况下,所提模型可有效提高不同调度时段电力系统的灵活性。

关键词: 电力系统灵活性; 热网互联; 可再生能源; 热电联产; 调度; 模型

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.022

0 引言

随着全球环境污染和化石能源危机的不断加剧,可再生能源发电 REG(Renewable Energy Generation)的规模逐渐扩大。截至 2015 年底,我国可再生能源发电的装机容量已达到 4.8×10^8 kW,占全国总发电容量的比例从 2010 年的 25% 提高到 33%。但随着可再生能源并网比例的逐年增加,其输出功率的随机性和波动性也给电力系统的安全稳定运行带来了新的挑战^[1-2]。为此,北美电力可靠性委员会 NERC(North American Electric Reliability Council)于 2010 年给出了“电力系统灵活性”的定义,即电力系统供需两侧响应系统不确定性变化的能力^[3]。电力系统灵活性主要体现在调度运行环节,是衡量电力系统运行性能的重要指标之一^[4]。电力系统保持充裕的灵活性可有效消除可再生能源并网带来的负面影响,提高可再生能源消纳水平,对于能源的可持续发展具有十分重要的意义。

目前,国内外针对电力系统灵活性展开了大量研究。文献[5]提出通过电网互联提高电力系统的灵活性,进而提升风电的利用水平。文献[6]提出通过增加系统备用容量和启用具有快速爬坡能力的机组,来提高电力系统灵活性。文献[7-8]将需求侧可调度负荷作为灵活性资源来提高电力系统灵活性,减少弃风量。

热电联产机组(以下简称热电机组)既是我国北方地区冬季采暖的主要热源,也是应对电力不确定性变化的重要调度资源。“十二五”期间,我国北方地

区大型城市建筑采暖的集中供热普及率达到 65%,其中热电机组的比例已达到 50%。如果能充分发挥热电机组的调节能力,可有效提高电力系统的运行灵活性。然而,热力管网传统的“一网一源”结构,限制了冬季采暖期热电机组在电力谷荷时段的向下调节能力和峰荷时段的向上调节能力,导致系统的运行灵活性大幅下降,严重时可能造成不必要的切负荷和弃风。近年来,已有多个城市的热力管网由传统的独立结构改造为互联结构,实现了“一网多源”、联合供热的新型供热模式。在此基础上,通过在同一热力管网内的不同热电机组间合理分配热负荷,可协调优化热电机组的热-电力输出功率,提高电力系统的运行灵活性。

本文立足于热力管网互联的应用背景,综合考虑了热电机组的热-电输出特性、热力管网的互联特性和用户建筑物的蓄能特性,提出了基于热网互联的电力系统灵活性调度模型,分别以谷荷时段的向下灵活性和峰荷时段的向上灵活性最大为优化目标,实现了热-电输出功率在热电机组间的优化调配,可有效解决冬季采暖期谷荷时段和峰荷时段电力系统灵活性不足的问题。

1 热电机组模型

我国的热电机组主要有背压式机组和抽汽式机组 2 种^[9-10]。其中,背压式机组具有“以热定电”的运行特点,其热-电输出功率的比率恒定不变,当热力输出功率一定时,其电力输出功率是无法调节的。与背压式机组相比,抽汽式机组存在更加灵活的热-电运行特性,其电力输出功率可在一定范围内灵活调节。目前我国大部分热电机组为抽汽式机组^[11],本文后续的研究都是基于抽汽式机组展开。

图 1 给出了抽汽式机组的热-电运行特性,热-电输出功率可以在 ABCD 围成的区域内进行灵活

收稿日期:2016-06-22;修回日期:2017-04-20
基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2014AA-051901);国家自然科学基金面上项目(51377116)
Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2014AA-051901) and the General Program of National Natural Science Foundation of China(NSFC)(51377116)

调节。对于不同的热力输出功率,其电力输出功率的调节范围 $[P_F, P_E]$ 有所不同,如 $[P_{F_1}, P_{E_1}]$ 、 $[P_{F_2}, P_{E_2}]$ 分别为不同热力工况 h_1 、 h_2 下的电力输出功率调节范围。

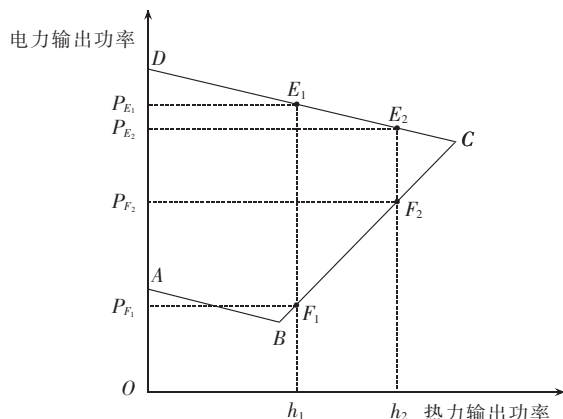


图 1 抽汽式机组热-电运行特性图

Fig.1 Thermal-electric operating characteristics of extraction unit

在传统的“一网一源”结构下,各机组的电力输出功率调节范围受到本地热负荷的制约,不同机组间的热-电运行特性未被充分利用。而在热力管网“一网多源”的结构下,可根据不同热电机组运行特性的差异合理分配热负荷,在保证热力输出功率不变的前提下增强电力系统的灵活性。以图 2 为例,工况 1 下,热电机组 A 和 B 的电力输出功率调节范围为 A_1 和 B_1 ;工况 2 下,电力输出功率调节范围相应变为 A_2 和 B_2 。虽然 2 种工况下热电机组供应的热负荷总量相同,但是工况 2 下电力输出功率的可调节范围,即系统的灵活性有所增大。

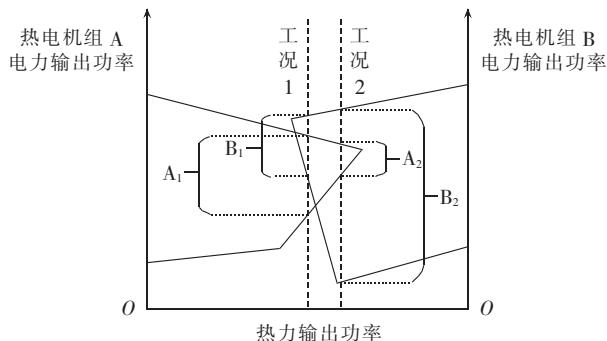


图 2 不同热力工况下的电力输出功率调节范围

Fig.2 Adjustment ranges of electric power outputs under different thermal conditions

2 热网互联和热负荷模型

2.1 热网互联模型

热力管网是热能传输的介质。热电机组通过热力管网将热能传递给用户。在“一网一源”结构下,

热电机组 i 的热力输出功率完全由区域 A_i 的热负荷决定,如式(1)所示。

$$h(i, t) = h_{A_i}(t) \quad i=1, 2, \dots, N_{\text{CHP}} \quad (1)$$

其中, $h(i, t)$ 为 t 时刻热电机组 i 的热力输出功率; $h_{A_i}(t)$ 为 t 时刻区域 A_i 的热负荷; N_{CHP} 为热电机组的数量。

在热力管网改造为“一网多源”结构后,热电机组 i 不仅可以向区域 A_i 的用户供热,还可以通过互联管网向其他区域的用户供热。新型供热结构下的热网互联模型如下式所示:

$$h(i, t) = h_{A_i}(t) + \Delta h_{A_j}(i, t) \quad i \neq j \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{CHP}}} h(i, t) = \sum_{j=1}^n h_{A_j}(t) \quad (3)$$

其中, $\Delta h_{A_j}(i, t)$ 为热力管网互联后 t 时刻热电机组 i 向区域 A_j 提供的热力输出功率; n 为供热区域的数量。

2.2 热负荷模型

供暖系统的热负荷是指为达到要求的室内温度,供暖系统在单位时间内向建筑物供给的热量^[12]。供暖系统的热负荷与用户的热力需求密切相关。

用户的热力需求主要由用户所在建筑物围护结构的耗热量决定^[12],如式(4)所示。

$$Q_{\text{load}}(t) = KF(T_{\text{in}}(t) - T_{\text{out}}(t)) \quad (4)$$

其中, $Q_{\text{load}}(t)$ 为 t 时刻的热力需求; K 为建筑物围护结构的传热系数; F 为建筑物与室外大气接触的外表面积; $T_{\text{in}}(t)$ 为 t 时刻供暖室内温度; $T_{\text{out}}(t)$ 为 t 时刻供暖室外温度。

为满足用户的热力需求,热负荷通常采用以下 2 种模型。

(1)不考虑蓄能特性,建筑物的热负荷 $h_{\text{load}}(t)$ 等于热力需求,此时室内温度 $T_{\text{in}}(t)$ 恒定不变,即:

$$h_{\text{load}}(t) = Q_{\text{load}}(t) \quad (5)$$

其中, $h_{\text{load}}(t)$ 为单个建筑物 t 时刻的热负荷。

(2)考虑蓄能特性之后^[13-14],建筑物的室内温度 $T_{\text{in}}(t)$ 可以在符合人体热舒适度的变化范围 $[T_{\text{in}, \text{min}}, T_{\text{in}, \text{max}}]$ 之内变化。当热负荷大于热力需求时,室内温度逐渐升高,相当于热能存储于建筑物中;当热负荷小于热力需求时,室内温度逐渐降低,相当于建筑物释放热能。建筑物的热负荷 $h_{\text{load}}(t)$ 模型如式(6)所示^[15]。

$$h_{\text{load}}(t) = Q_{\text{load}}(t) + \frac{T_{\text{in}}(t+1) - T_{\text{in}}(t)}{\Delta t} c_{\text{air}} \rho_{\text{air}} V \quad (6)$$

其中, c_{air} 为室内空气的比热容; ρ_{air} 为室内空气的密度; V 为建筑物的外围体积,即与室外大气接触的外表面积 F 所包围的体积。其中, F 和 V 的比值为建筑物的体形系数 $\delta_{\text{sc}} = \frac{F}{V}$ 。

区域 A_i 的热负荷等于区域 A_i 内所有建筑物的热负荷之和,如式(7)所示。

$$h_{A_i}(t) = \sum_{A_i} h_{\text{load}}(t) \quad (7)$$

本文将针对以上 2 种热负荷模型,分析其对电力系统灵活性的影响。

3 电力系统灵活性

电力系统灵活性可采用不同时段可调节发电设备向上或向下的可调节容量来表达。由于系统在不同调度时段对于可调节容量的要求有所不同,因此电力系统灵活性可以分为向上灵活性和向下灵活性^[16]。在谷荷时段,各台机组的出力水平较低,其向下的可调节容量范围较小,系统面临的主要挑战是是否具有足够的向下调节容量,即向下灵活性来应对可再生能源发电功率的向上波动。同理,在峰荷时段,系统面临的主要挑战是是否具有足够的向上灵活性来应对可再生能源发电功率的向下波动。电力系统向上灵活性和向下灵活性的计算公式分别如式(8)、(9)所示。

$$f^u(t) = \sum_{i=1}^N \min(P_{\max}(i) - P(i, t), \Delta t \cdot r_u(i)) \quad (8)$$

$$f^d(t) = \sum_{i=1}^N \min(P(i, t) - P_{\min}(i), \Delta t \cdot r_d(i)) \quad (9)$$

其中, $f^u(t)$ 为 t 时刻系统的向上灵活性; $f^d(t)$ 为 t 时刻系统的向下灵活性; $P_{\max}(i)$ 和 $P_{\min}(i)$ 分别为机组 i 的最大电力输出功率和最小电力输出功率; $P(i, t)$ 为 t 时刻机组 i 的电力输出功率; $r_u(i)$ 和 $r_d(i)$ 分别为机组 i 的上爬坡率和下爬坡率; N 为具有调度能力的机组数量,包括常规火电机组和热电机组; Δt 为调度时段间隔。

为衡量在不同调度时段电力系统灵活性是否充裕,本文以灵活性不足率作为评价指标。灵活性不足率 Δf 在不同调度时段分别表现为向上灵活性不足率 Δf^u 和向下灵活性不足率 Δf^d , 具体计算公式如下:

$$\Delta f^u = \frac{\sum_{t=1}^{T_1} (\Delta P^d(t) - f^u(t))}{\sum_{t=1}^{T_1} f^u(t)} \times 100\% \quad (10)$$

$$\Delta f^d = \frac{\sum_{t=1}^{T_2} (\Delta P^u(t) - f^d(t))}{\sum_{t=1}^{T_2} f^d(t)} \times 100\% \quad (11)$$

其中, T_1 、 T_2 分别为电力峰荷、谷荷调度时段总数; $\Delta P^u(t)$ 、 $\Delta P^d(t)$ 分别为 t 时刻可再生能源的向上波动功率、向下波动功率,通常可由可再生能源的功率预测值和实际功率输出计算得到。

4 电力系统灵活性调度模型

本文根据不同时段电力系统灵活性的特点,分

别构建谷荷时段和峰荷时段的电力系统灵活性调度模型,通过对热-电输出功率的优化调度,提高在不同调度时段电力系统的向上或向下灵活性,最大限度地减小切负荷或弃风的比例。

4.1 目标函数

在电力谷荷时段,本文以电力系统的向下灵活性最大为优化目标,如式(12)所示。

$$\max f_1 = \sum_{t=1}^{T_2} f^d(t) \quad (12)$$

在电力峰荷时段,本文以电力系统的向上灵活性最大为优化目标,如式(13)所示。

$$\max f_2 = \sum_{t=1}^{T_1} f^u(t) \quad (13)$$

优化变量为所有机组逐时的电力输出功率 $P(i, t)$ 和热电机组逐时的热力输出功率 $h(i, t)$ 。

4.2 约束条件

a. 电负荷及热负荷平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{CON}}} P_{\text{CON}}(i, t) + \sum_{j=1}^{N_{\text{CHP}}} P_{\text{CHP}}(j, t) + \sum_{k=1}^{N_{\text{WIND}}} P_{\text{WIND}}(k, t) = P_L(t) \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^{N_{\text{CHP}}} h(j, t) = H(t) \quad (15)$$

其中, $P_{\text{CON}}(i, t)$ 为 t 时刻火电机组 i 的电力输出功率; $P_{\text{CHP}}(j, t)$ 为 t 时刻热电机组 j 的电力输出功率; $P_{\text{WIND}}(k, t)$ 为 t 时刻风电机组 k 的电力输出功率预测值; $P_L(t)$ 为 t 时刻系统电负荷总量; $H(t)$ 为 t 时刻系统热负荷总量; N_{CON} 为火电机组的数量; N_{WIND} 为风电机组的数量。

b. 火电机组约束。

综合机组的上下限出力约束及机组爬坡率约束,建立火电机组的电力输出功率限值约束见式(16)。

$$\max \{P_{\min}(i), P_{\text{CON}}(i, t-1) - r_d(i) \cdot \Delta t\} \leq P_{\text{CON}}(i, t) \leq \min \{P_{\max}(i), P_{\text{CON}}(i, t-1) + r_u(i) \cdot \Delta t\} \quad (16)$$

c. 热电机组约束。

热电机组的电力输出功率及热力输出功率限值约束:

$$\max \{P_{\min}(j), P_{\text{CHP}}(j, t-1) - r_d(j) \cdot \Delta t\} \leq P_{\text{CHP}}(j, t) \leq \min \{P_{\max}(j), P_{\text{CHP}}(j, t-1) + r_u(j) \cdot \Delta t\} \quad (17)$$

$$h_{\min}(j) \leq h(j, t) \leq h_{\max}(j) \quad (18)$$

其中, $h_{\min}(j)$ 为热电机组 j 的最小热力输出功率; $h_{\max}(j)$ 为热电机组 j 的最大热力输出功率。

d. 温度约束。

考虑到人体的热舒适度,室内温度的变化应控制在一定范围内。

$$T_{\text{in}, \min} \leq T_{\text{in}}(t) \leq T_{\text{in}, \max} \quad (19)$$

其中, $T_{\text{in}, \min}$ 为室内最小热舒适温度; $T_{\text{in}, \max}$ 为室内最大热舒适温度。

4.3 模型求解

针对上述模型,采用通用代数建模系统 GAMES 求解器进行模拟计算求解。通过求解该非线性规划问题,获得最优目标函数值以及对应的各优化变量值。

5 算例分析

本文分别研究热网互联和建筑物蓄能特性对提高电力系统灵活性的影响。以风电功率的不确定性作为研究对象,来验证电力系统灵活性调度模型的有效性。算例系统的结构如图 3 所示。1—6 号机组为抽汽式热电机组,7 号、8 号机组为常规火电机组,系统中只有 1 个风电场。

参照我国“三北”电网实际电源结构比例^[11],将火电、热电、风电的装机容量比例设置为 23%、67%、10%,机组参数见表 1。为说明热-电输出功率在不同热电机组间的优化分配效果,本文设置 1—3 号与 4—6 号热电机组具有不同的热-电运行特性,见图 4。

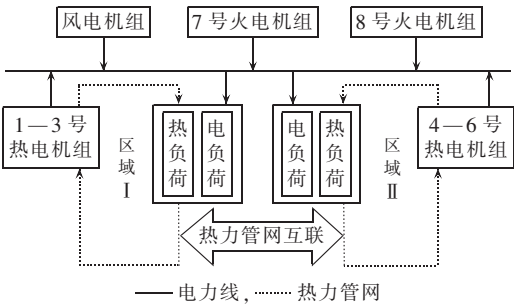


图 3 算例系统结构图

Fig.3 System structure for case study

表 1 机组参数					
Table 1 Parameters of units					
机组	最大发电功率/MW	最小发电功率/MW	最大热功率/MW	向上爬坡率/(MW·h ⁻¹)	向下爬坡率/(MW·h ⁻¹)
1	420	165	450	70	70
2	420	165	450	70	70
3	420	165	450	70	70
4	247	81	180	80	80
5	247	81	180	80	80
6	247	81	180	80	80
7	200	80	0	50	50
8	500	200	0	130	130

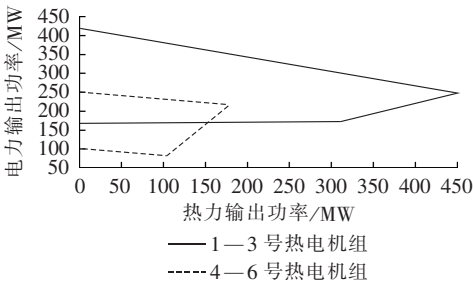


图 4 热电机组热-电运行特性图

Fig.4 Thermal-electric operating characteristics of CHP units

本文参照实际数据设定了一个调度周期的风电功率预测曲线作为灵活性调度的输入数据。为了评估本文所提电力系统灵活性调度模型的有效性,在风电预测功率的基础上采用威布尔分布来模拟风电实际功率,算例中风电预测功率和模拟的实际功率如图 5 所示。

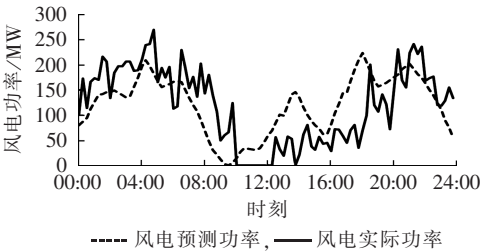


图 5 风电功率曲线

Fig.5 Wind power curves

区域 I、II 的建筑物的外围体积分别为 $2.78 \times 10^8 \text{ V/m}^3$ 、 $1.08 \times 10^8 \text{ V/m}^3$,建筑相关参数详见文献[15]。热力需求和系统电负荷曲线分别如图 6、7 所示,电力谷荷时段为 01:00—06:00,峰荷时段为 10:00—20:00。

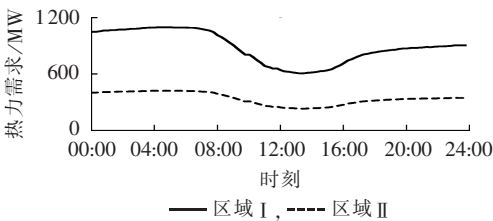


图 6 热力需求曲线

Fig.6 Heat demand curves

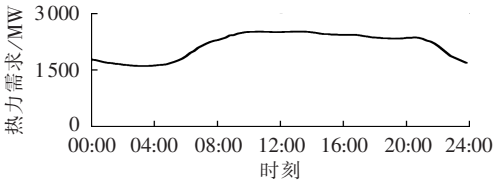


图 7 系统电负荷功率曲线

Fig.7 Electric power load curve of system

5.1 热网互联效果分析

在热力管网传统的“一网之源”结构下,1—3 号、4—6 号热电机组分别向区域 I、II 进行供热;在热力管网“一网多源”的结构下,1—6 号热电机组共同向区域 I、II 进行供热。谷荷时段的向下灵活性和峰荷时段的向上灵活性分别如图 8、9 所示。热网互联后,谷荷时段系统的向下灵活性不足率由 16.99% 降低至 0,峰荷时段系统的向上灵活性不足率由 44.74% 降低至 8.84%,电力系统谷荷时段的向下灵活性和峰荷时段的向上灵活性有较大的提高。

图 10 比较了热网互联前后在电力谷荷时段热电机组和火电机组的运行情况。此时,电力负荷处

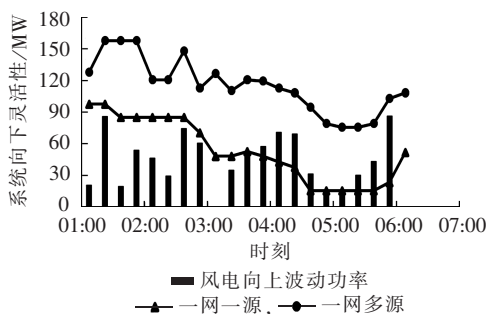


图 8 热网互联前后谷荷时段系统向下灵活性

Fig.8 System downward flexibility during valley period, with or without interconnection of thermal networks

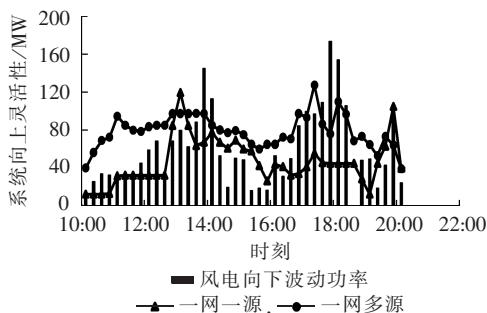
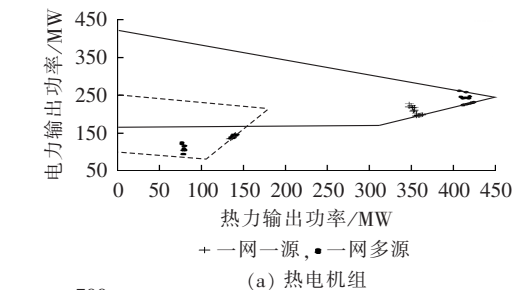
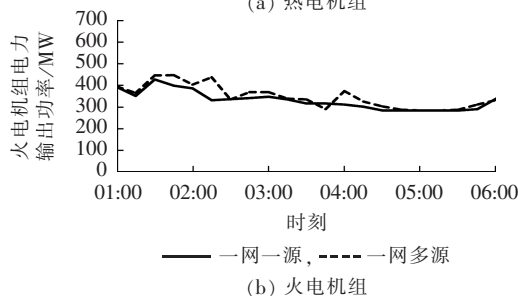


图 9 热网互联前后峰荷时段系统向上灵活性

Fig.9 System upward flexibility during peak period, with or without interconnection of thermal networks



(a) 热电机组



(b) 火电机组

图 10 热网互联前后谷荷时段机组运行情况

Fig.10 Power outputs of units during valley period, with or without interconnection of thermal networks

于谷荷时段,热力负荷处于峰荷时段,在“一网一源”的结构下热电机组主要运行在背压工况,基本没有向下的可调节容量,系统的向下灵活性主要是由常规火电机组提供的,不足以应对风电的波动。热网互联后,利用 1—3 号以及 4—6 号热电机组不同的热-电运行特性,对区域 I、II 的热负荷进行优化分

配。4—6 号热电机组承担更少的热负荷,其电力输出功率的调节范围有了较大的增加。同时,火电机组的电力输出功率有所增大,提高了整个系统的向下灵活性。

图 11 比较了热网互联前后在电力峰荷时段热电机组和火电机组的运行情况。在峰荷时段,“一网一源”的结构下热电机组基本没有向上的可调节容量。热网互联之后,通过分配给 1—3 号热电机组更少的热负荷,增大了向上的可调节容量,同时进一步减少了火电机组的电力输出功率,提高了系统的向上灵活性。

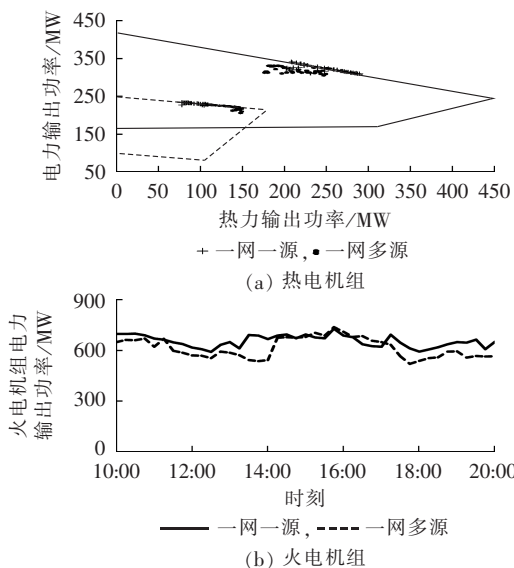


图 11 热网互联前后峰荷时段机组运行情况

Fig.11 Power outputs of units during peak period, with or without interconnection of thermal networks

5.2 建筑物蓄能特性效果分析

考虑热网互联后,谷荷时段的向下灵活性能应对风电的功率波动,但在峰荷时段仍存在 8.84% 的向上灵活性不足率。为进一步提高峰荷时段的向上灵活性,本文在热网互联的基础上引入建筑物的蓄能特性进行发电机组的灵活调度。当不考虑建筑物的蓄能特性时,热负荷与热力需求实时相等,室内温度保持在 20℃ 不变。由于热电机组“以热定电”的运行方式,其电力输出功率调节范围受到热力需求的严格限制,制约了电力系统的灵活性。考虑建筑物的蓄能特性后,如图 12 所示,峰荷时段系统的向上灵活性有所提高,向上灵活性不足率降低至 5.62%。如图 13—15 所示,室内温度控制在 19~21℃ 之间,在一定范围内通过改变热负荷的大小,热电机组可在更大的热力输出功率范围内运行,增大了热电机组的电力输出功率调节范围,提高了峰荷时段系统的向上灵活性。

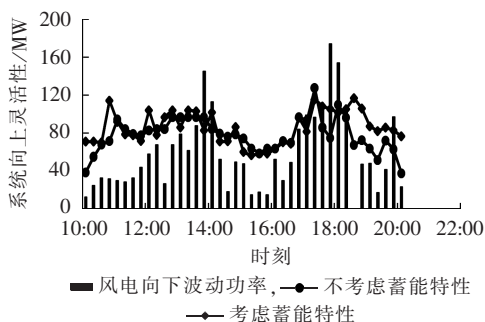


图 12 考虑蓄能特性前后峰荷时段系统向上灵活性

Fig.12 System upward flexibility during peak period,with or without consideration of energy storage characteristics

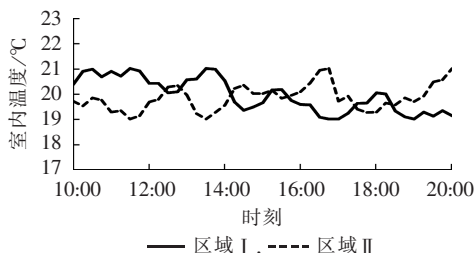


图 13 考虑蓄能特性后峰荷时段室内温度曲线

Fig.13 Indoor temperature curves of peak period with consideration of energy storage characteristics

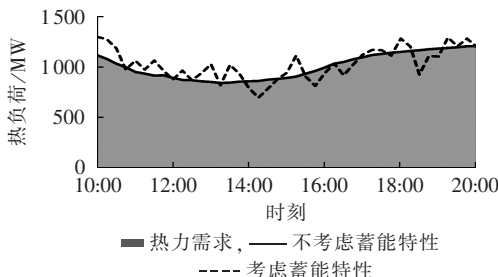


图 14 峰荷时段热负荷曲线

Fig.14 Heating load curves of peak period

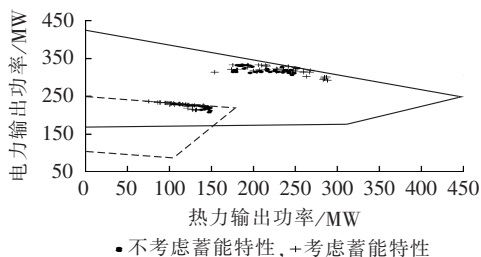


图 15 考虑蓄能特性前后峰荷时段热电机组运行情况

Fig.15 Power output of CHP unit during peak period,with or without consideration of energy storage characteristics

特性、热力管网的互联特性和用户建筑物的蓄能特性,可有效解决冬季供暖期谷荷时段和峰荷时段电力系统灵活性不足的问题,提高可再生能源消纳水平。算例验证了模型的有效性,并得到以下结论:

a. 在热力管网“一网多源”的互联结构下,充分利用不同抽汽式机组间的热-电输出特性,可合理分配热负荷,增大电力输出功率的调节范围,从而提高不同调度时段的电力系统灵活性;

b. 利用建筑物的蓄能特性,在保证供热质量的前提下,将室温控制在符合人体热舒适度的范围内,可以更加灵活地匹配供热需求的变化,协调优化热-电输出功率,进一步提高电力系统灵活性。

参考文献:

- [1] 王成山,于波,肖峻,等.平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J].中国电机工程学报,2012,32(16):1-8. WANG Chengshan,YU Bo,XIAO Jun,et al. Sizing of energy storage systems for output smoothing of renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(16):1-8.
- [2] 肖定垚,王承民,曾平良,等.考虑可再生能源电源功率不确定性的电源灵活性评价[J].电力自动化设备,2015,35(7):120-125,139. XIAO Dingyao,WANG Chengmin,ZENG Pingliang,et al. Power source flexibility evaluation considering renewable energy generation uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015,35(7):120-125,139.
- [3] North American Electric Reliability Corporation. Special report: potential reliability impacts of emerging flexible resources[R]. Princeton, America: North American Electric Reliability Corporation (NERC),2010:2-6.
- [4] ADAMS J,O'MALLEY M,HANSON K. Flexibility requirements and potential metrics for variable generation: implications for system planning studies[M]. Princeton, NJ, USA: NERC,2010: 14-17.
- [5] 肖定垚,王承民,曾平良,等.电力系统灵活性及其评价综述[J].电网技术,2014,38(6):1569-1576. XIAO Dingyao,WANG Chengmin,ZENG Pingliang,et al. A survey on power system flexibility and its evaluations [J]. Power System Technology,2014,38(6):1569-1576.
- [6] 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.
- [7] ROSSO A,MA Juan. Assessing the contribution of demand side management to power system flexibility[C]//IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference. Orlando, USA: IEEE,2011:4361-4365.
- [8] 楚成博.含可控负荷系统的调度灵活性研究[D].济南:山东大学,2013. CHU Chengbo. Studies on flexibility of power system dispatch with controllable loads[D]. Ji'nan: Shandong University,2013.
- [9] 孙奉仲,杨祥良,高明,等.热电联产技术与管理[M].北京:中国

6 结论

为应对可再生能源并网带来的不确定性和随机性,本文提出了基于热网互联的电力系统灵活性调度模型。该模型综合考虑了热电机组的热-电输出

电力出版社,2008:14-39.

- [10] 刘志真,邱丽霞,李琳,等. 热电联产[M]. 北京:中国电力出版社,2006:28-44.
- [11] 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.
- [12] 冉春雨,崔明辉,白莉,等. 供热工程[M]. 北京:化学工业出版社,1993:55-71.
- [13] 秦冰,江亿,付林. 集中供热系统热动态特性研究综述[J]. 煤气与热力,2003,23(11):694-697.
QIN Bing,JIANG Yi,FU Lin. Summarization for research on dynamic performance of centralized heat-supply system[J]. Gas & Heat,2003,23(11):694-697.
- [14] 付林,江亿. 承担采暖负荷的背压机组电力调峰优化运行[J]. 中国电机工程学报,2000,20(3):81-84,88.
FU Lin,JIANG Yi. Optimal operation of back-pressure units for space heating[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(3): 81-84,88.

- [15] YANG Yulong,WU Kai,LONG Hongyu. Integrated electricity and heating demand-side management for wind power integration in China[J]. Energy,2014,78:235-246.
- [16] LANNONYE E,MILLIGAN M,ADAMS J,et al. Integration of variable generation:capacity value and evaluation of flexibility [C]//Proceedings of the Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis,Minnesota,USA:IEEE,2010:25-29.

作者简介:



魏 炜

魏 炜(1976—),男,天津人,副教授,博士,主要研究方向为智能配电系统、综合能源系统运行优化(**E-mail**:weiw@tju.edu.cn);

倪颖婷(1992—),女,福建厦门人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统运行优化(**E-mail**:niyingting@126.com);

罗凤章(1980—),男,天津人,讲师,博士,主要研究方向为主动配电系统分析与优化规划等(**E-mail**:luofengzhang@tju.edu.cn)。

Power system flexibility dispatch model based on thermal network interconnection

WEI Wei¹,NI Yingting¹,LUO Fengzhang¹,XU Ruikai¹,XU Yuanfu²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education,Tianjin University,Tianjin 300072,China;

2. State Grid Tianjin Electric Power Company,Tianjin 300010,China)

Abstract: Aiming at the insufficient power system flexibility of winter heating period,a power system flexibility dispatch model based on the interconnection of thermal networks is built,which comprehensively considers the operating characteristics of CHP(Combined Heat and Power) units,the interconnection characteristics of thermal networks and the energy storage characteristics of household buildings,takes the maximum downward flexibility of valley period and the maximum upward flexibility of peak period as its optimization objectives,and makes the best of the differences among different CHP units in operating characteristics to realize the rational allocation of thermal and electric powers under the structure of interconnected thermal networks of multiple thermal sources. Case analysis shows that,the proposed model effectively improves the flexibility of power system for different dispatch periods.

Key words: power system flexibility; thermal network interconnection; renewable energy resource; combined heat and power; dispatch; models