考虑交换功率费用的多区互联电热联合系统协调消纳弃风分析

刘书彦[1],廖 扬[1],柴庆宣[2],胡林献[1],李延松[2]
(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学 航天学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:随着风电并网容量及弃风量的增加,远距离、大容量异地消纳风电已成为降低弃风率的有效策略。针对区域间以特高压直流为主要输送通道的发展格局,建立了区域间直流联络线模型;在考虑各区域电热联合系统信息保密及调度独立性的前提下,基于目标级联分析法,将调度问题分为上级优化主问题和下级优化子问题,并以联络线功率为协调变量,建立了考虑联络线交换功率费用的多区互联电热联合系统分散协调消纳弃风调度模型;通过算例仿真,详细分析了联络线电价、互联区域系统特性和消纳弃风措施对多区互联电热联合系统风电消纳率的影响。研究表明,计及联络线交换功率费用且合理选择联络线电价,优先选择与电负荷较高、热负荷和热电机组比重较低、风电渗透率较低的区域互联以及在互联区域内采取弃风消纳措施都有利于风电富裕区域电热联合系统的风电消纳。

关键词:多区互联;电热联合系统;分散协调调度;交换功率费用;消纳弃风
中图分类号:TM 73;TK 01 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.202201008

0 引言

我国风电发展迅速,截至2021年7月底,全国风电装机容量已达2.9×10^8 kW,占比高达12.90%。但随着风电的高速发展,“三北”地区弃风率高的问题也逐渐暴露出来[1]。

“三北”地区的风电、热电机组占比高[2],研究学者们已从“热电耦合”角度,对弃风机理[3]、消纳弃风措施(如配置电锅炉[4-6]、储能装置[7-9])以及影响风电消纳率的因素[10-12]进行了大量研究,并取得了丰硕成果。但是由于本地消纳能力有限,弃风问题未能完全解决,为此,很多研究学者开始对多区互联的协调消纳弃风展开研究。文献[13]建立了涉及核电调峰的多区能源互补联合调度模型,对其提高新能源消纳的能力进行了研究;文献[14]利用不同区域新能源发电的互补特性,建立了基于直流联络线功率优化的多区协调消纳新能源调度模型。文献[13-14]验证了多区互联电力系统能有效提高新能源消纳能力,但都采用集中调度模型,未考虑各区域电力系统的信息保密及调度独立性等问题,因此,分散调度模型及算法又成为了新的研究热点。文献[15]将大规模电力系统分解为多个联络线相连的区域子系统,各区域子系统调度模型可独立求解,并采用目标级联分析法ATC(Analytical Target Cascading)协调各区域子系统,能很好地解决大规模多区互联电力系统的分散协调调度问题;文献[16]基于ATC建立多区互联电力系统的分散协调消纳新能源调度模型,在保证区域电力系统调度独立性的前提下降低了弃风率;文献[17]基于双层ATC建立分散协调调度模型,通过仿真证实了区域间互联互备能使电力系统运行更为经济;文献[18]建立多区电力系统分散协调模型,对分散协调调度算法收敛效果进行研究,证实了分散协调调度在合理选取参数的前提下,具有良好的收敛精度和速度,其优化效果与集中调度相当。

综上可知,对于多区互联电力系统分散协调调度模型和优化算法的研究已有部分成果,但其均未考虑电力系统与热力系统之间的耦合作用,且没有计及联络线交换功率费用(以下简称交换功率费用)。本文基于现有研究成果,展开远距离、大容量异地消纳弃风策略的研究。首先针对区域间以特高压直流作为主要输送通道的发展格局,建立区域间直流联络线模型;然后在考虑交换功率费用的基础上建立多区互联电热联合系统分散协调消纳弃风的调度模型;最后通过算例仿真,详细分析联络线电价、互联区域系统特性及消纳弃风措施对多区互联电热联合系统风电消纳率的影响。

1 ATC

ATC是解决非集中式、层次结构协调问题的一种新方法,它将原问题解耦为一个多层级的优化问题,各层级间通过耦合变量相互关联,各个层级内则有若干个可以独立求解的子问题[18]。本文基于ATC,

收稿日期:2021-05-08;**修回日期:**2021-11-12
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877049)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877049)

将多区互联电热联合系统分散协调优化问题分解为上级优化主问题和下级优化子问题[19]，上级优化主问题在虚拟上级调度中心进行求解，下级优化子问题则在各区域子系统内分别进行求解，主问题和子问题通过协调变量相关联。

图1描述了由2个拥有独立调度机构的区域联接而成的互联系统。根据线路撕裂法，可将其分解成2个独立区域子系统，联络线功率则等效为与联络线边界节点相连的发电机有功功率，这种方法无需传递边界节点相角信息[16]。

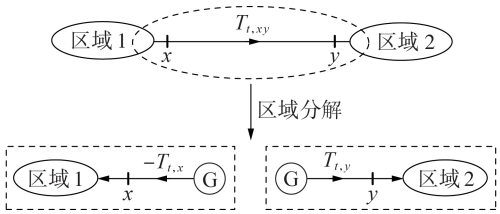


图1　区域分解示意图

Fig.1　Schematic diagram of area decomposition

图1中，$-T_{t,x}$、$T_{t,y}$、$T_{t,xy}$分别为t时段等效发电机x、y以及联络线xy的功率，单位均为MW，且满足如下协调耦合约束：

$$T_{t,x}=T_{t,y}=T_{t,xy} \tag{1}$$

经区域分解后，多区互联系统可分解为多个独立区域子系统。各区域子系统通过接收虚拟上级调度中心下发的主问题协调变量优化值求解下级优化子问题，然后将子问题协调变量优化值反馈给虚拟上级调度中心，虚拟上级调度中心利用反馈数据求解上级优化主问题并判断收敛判据是否收敛，若收敛则输出最新主问题协调变量优化值作为最优联络线功率，否则更新算法乘子系数并将最新主问题协调变量优化值下发给各子系统进行新一轮迭代，直至满足收敛条件为止。

2　多区互联电热联合系统分散协调调度模型

2.1　联络线模型

随着“三北”地区清洁能源的大规模开发及中东部地区负荷的快速增长，我国将形成区域间以特高压直流为主要输送通道的发展格局，因此，本文假设区域间将直流线路作为联络线，实现风电的远距离、大容量异地消纳。

1）联络线功率上下限约束。

$$T_{xy}^{\min}\leqslant T_{t,xy}\leqslant T_{xy}^{\max} \tag{2}$$

式中：$T_{xy}^{\max}$、$T_{xy}^{\min}$分别为联络线xy功率上、下限，单位均为MW。

2）联络线功率相邻时段调整方向约束。

因换流设备不宜频繁调节，联络线功率在相邻时段不能异向调整[14]，需满足如下约束：

$$\begin{cases}a_{t,xy}^{+}+a_{t,xy}^{-}\leqslant 1\\ a_{t,xy}^{+}+a_{t+1,xy}^{-}\leqslant 1\\ a_{t+1,xy}^{+}+a_{t,xy}^{-}\leqslant 1\\ T_{t+1,xy}-T_{t,xy}\leqslant d_{xy}^{\max}a_{t,xy}^{+}\\ T_{t,xy}-T_{t+1,xy}\leqslant d_{xy}^{\max}a_{t,xy}^{-}\end{cases} \tag{3}$$

式中：$a_{t,xy}^{+}$、$a_{t,xy}^{-}$分别为描述t时段联络线xy的爬坡、滑坡状态的0-1变量，$a_{t,xy}^{+}=1$表示爬坡，$a_{t,xy}^{+}=0$表示未爬坡，$a_{t,xy}^{-}$类似；$d_{xy}^{\max}$为联络线xy每次调整的调整量上限，单位为MW。在下级优化子问题中，此约束可视为等效发电机功率在相邻时段不能异向调整。

3）联络线功率阶梯化约束。

联络线功率在某个时段经历了爬坡或者滑坡后，需要平稳运行一段时间才能继续调整，有如下约束：

$$\begin{cases}b_{t,xy}^{-}+\sum\limits_{t_1=t+1}^{\min(T,t+T_{\mathrm{N}})}b_{t_1,xy}^{+}\leqslant 1\\ b_{t,xy}^{+}+b_{t,xy}^{-}\leqslant 1\\ b_{t,xy}^{+}-b_{t,xy}^{-}=(a_{t,xy}^{+}+a_{t,xy}^{-})-(a_{t-1,xy}^{+}+a_{t-1,xy}^{-})\end{cases} \tag{4}$$

式中：$b_{t,xy}^{+}$、$b_{t,xy}^{-}$分别为描述t时段联络线xy是否开始、结束调整的0-1变量，$b_{t,xy}^{+}=1$表示开始调整，$b_{t,xy}^{+}=0$表示未开始调整，$b_{t,xy}^{-}$类似；T为调度总时段数；T_{N}控制最小调整间隔时段数[16]。在下级优化子问题中，此约束可视为等效发电机经过一次出力调整需要平稳运行一段时间。

4）联络线功率调整量约束。

$$\begin{cases}\left|T_{t+1,xy}-T_{t,xy}\right|\leqslant(a_{t,xy}^{+}+a_{t,xy}^{-})d_{xy}^{\max}\\ \left|T_{t+1,xy}-T_{t,xy}\right|\geqslant(a_{t,xy}^{+}+a_{t,xy}^{-})d_{xy}^{\min}\end{cases} \tag{5}$$

式中：$d_{xy}^{\min}$为联络线xy调整量下限，单位为MW。

5）联络线调整次数约束。

$$\sum_{t=1}^{T}(a_{t,xy}^{+}+a_{t,xy}^{-})\leqslant L \tag{6}$$

式中：L为一个调度周期内联络线调整次数最大值。

6）传输电量约束。

$$\sum_{t=1}^{T}T_{t,xy}\Delta t\geqslant Q_{xy} \tag{7}$$

式中：Q_{xy}为一个调度周期内联络线xy传输电量最小值，事先根据合同给定，单位为MW·h；Δt为单位调度周期的时间，单位为h。

2.2　下级优化子问题

假设多区互联电热联合系统由K个区域电热子系统通过直流输电线路相互联接而成，且区域电热子系统k通过M_k条直流联络线与其余区域电热子系统相联。

2.2.1　目标函数

本文目标函数由机组运行成本、弃风惩罚成本、偏差调整成本及交换功率费用四部分组成，其中交换功率费用对送端子系统而言是收入，对受端子系

统而言则是成本。

$$\min\sum_{t=1}^{T}\left\{\left(\sum_{i=1}^{I_k}C_{t,k,i}^{\mathrm{CON}}+\sum_{s=1}^{S_k}\sum_{j=1}^{J_s}C_{t,k,s,j}^{\mathrm{CHP}}\right)+C_k^{\mathrm{W}}(P_{t,k}^{\mathrm{WF}}-P_{t,k}^{\mathrm{W}})\Delta t+\sum_{m=1}^{M_k}\left\{\left[\lambda_{t,k,m}(T_{t,k,m}^{\mathrm{main}*}-T_{t,k,m})\right]^2+\mu_{t,k,m}(T_{t,k,m}^{\mathrm{main}*}-T_{t,k,m})\right\}\Delta t\pm\sum_{m=1}^{M_k}C_{k,m}^{\mathrm{T}}T_{t,k,m}\Delta t\right\} \tag{8}$$

式中：I_k、S_k分别为子系统k内的火电机组数、热电厂数；J_s为第s座热电厂的热电机组数；$C_{t,k,i}^{\mathrm{CON}}$、$C_{t,k,s,j}^{\mathrm{CHP}}$分别为$t$时段子系统$k$火电机组$i$、第$s$座热电厂热电机组$j$的运行成本，单位均为元，各机组耗量特性方程详见文献[20]；C_k^{W}为子系统k的弃风惩罚因数，单位为元/(MW·h)；$P_{t,k}^{\mathrm{W}}$、$P_{t,k}^{\mathrm{WF}}$分别为t时段子系统k风电场的实际出力、预测出力，单位均为MW；$\lambda_{t,k,m}$、$\mu_{t,k,m}$分别为t时段子系统k第m条联络线的偏差平方项、偏差项系数；$T_{t,k,m}^{\mathrm{main}*}$、$T_{t,k,m}$分别为$t$时段子系统$k$虚拟上级调度中心下发的第$m$条联络线的主问题协调变量优化值、子问题联络线功率，单位均为MW；$C_{k,m}^{\mathrm{T}}$为子系统k第m条联络线的电价，单位为元/(MW·h)。

2.2.2 约束条件

约束条件包括电平衡约束、热平衡约束、机组约束、电锅炉约束、联络线约束等。

1)电平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{I_k}P_{t,k,i}^{\mathrm{CON}}+\sum_{s=1}^{S_k}\sum_{j=1}^{J_s}P_{t,k,s,j}^{\mathrm{CHP}}+P_{t,k}^{\mathrm{W}}\pm\sum_{m=1}^{M_k}T_{t,k,m}=P_{t,k}^{\mathrm{load}}+\sum_{s=1}^{S_k}\sum_{h=1}^{H_s}P_{t,k,s,h}^{\mathrm{eboiler}} \tag{9}$$

式中：H_s为第s座热电厂供热区域的换热站数目；$P_{t,k,i}^{\mathrm{CON}}$、$P_{t,k,s,j}^{\mathrm{CHP}}$、$P_{t,k}^{\mathrm{load}}$、$P_{t,k,s,h}^{\mathrm{eboiler}}$分别为$t$时段子系统$k$火电机组$i$的电出力、第$s$座热电厂热电机组$j$的电出力、电负荷、第$s$座热电厂换热站$h$所配置电锅炉的运行电功率，单位均为MW。

2)热平衡约束。

供热系统按供热区域分别平衡：

$$\sum_{j=1}^{J_s}Q_{t,k,s,j}^{\mathrm{CHP}}+\sum_{h=1}^{H_s}Q_{t,k,s,h}^{\mathrm{eboiler}}=\sum_{h=1}^{H_s}Q_{t,k,s,h}^{\mathrm{load}} \tag{10}$$

式中：$Q_{t,k,s,j}^{\mathrm{CHP}}$、$Q_{t,k,s,h}^{\mathrm{load}}$、$Q_{t,k,s,h}^{\mathrm{eboiler}}$分别为$t$时段子系统$k$第$s$座热电厂热电机组$j$的热出力、换热站$h$的热负荷、换热站$h$所配置电锅炉的热功率，单位均为GJ/h。

3)机组约束。

机组约束包括机组出力约束、风电场出力约束、热电耦合约束、机组爬坡/滑坡约束。

机组出力约束、风电场出力约束如下：

$$\underline{P}_{k,i}^{\mathrm{CON}}\leqslant P_{t,k,i}^{\mathrm{CON}}\leqslant\bar{P}_{k,i}^{\mathrm{CON}} \tag{11}$$

$$\underline{P}_{k,s,j}^{\mathrm{CHP}}\leqslant P_{t,k,s,j}^{\mathrm{CHP}}\leqslant\bar{P}_{k,s,j}^{\mathrm{CHP}} \tag{12}$$

$$\underline{D}_{k,s,j}^{\mathrm{CHP}}\leqslant D_{t,k,s,j}^{\mathrm{CHP}}\leqslant\bar{D}_{k,s,j}^{\mathrm{CHP}} \tag{13}$$

$$0\leqslant P_{t,k}^{\mathrm{W}}\leqslant P_{t,k}^{\mathrm{WF}} \tag{14}$$

式中：$\bar{P}_{k,i}^{\mathrm{CON}}$、$\underline{P}_{k,i}^{\mathrm{CON}}$分别为子系统$k$火电机组$i$的电出力上、下限，单位均为MW；$\bar{P}_{k,s,j}^{\mathrm{CHP}}$、$\underline{P}_{k,s,j}^{\mathrm{CHP}}$分别为子系统$k$第$s$座热电厂热电机组$j$的电出力上、下限，单位均为MW；$D_{t,k,s,j}^{\mathrm{CHP}}$和$\bar{D}_{k,s,j}^{\mathrm{CHP}}$、$\underline{D}_{k,s,j}^{\mathrm{CHP}}$分别为$t$时段子系统$k$第$s$座热电厂热电机组$j$供热抽汽速率及其上、下限，单位均为t/h。热电机组电出力上、下限与供热抽汽速率存在如下耦合关系：

$$\bar{P}_{k,s,j}^{\mathrm{CHP}}=a_{\mathrm{H}}+b_{\mathrm{H}}D_{k,s,j}^{\mathrm{CHP}} \tag{15}$$

$$\underline{P}_{k,s,j}^{\mathrm{CHP}}=a_{\mathrm{L}}+b_{\mathrm{L}}D_{k,s,j}^{\mathrm{CHP}} \tag{16}$$

式中：a_{H}、a_{L}分别为纯凝工况下机组电出力上、下限，单位均为MW；b_{H}、b_{L}分别为最大凝气、背压工况下机组供电供热比[12]，单位均为MW·h/t。

热电机组热出力和供热抽汽速率关系如式(17)所示。

$$Q_{t,k,s,j}^{\mathrm{CHP}}=\frac{D_{t,k,s,j}^{\mathrm{CHP}}\Delta H}{1000} \tag{17}$$

式中：ΔH为蒸汽焓降，单位为kJ/kg。

火电机组和热电机组爬坡、滑坡约束如下：

$$P_{t,k,i}^{\mathrm{CON}}-P_{t-1,k,i}^{\mathrm{CON}}\leqslant r_{\mathrm{up}}^{\mathrm{CON}}\Delta t \tag{18}$$

$$P_{t-1,k,i}^{\mathrm{CON}}-P_{t,k,i}^{\mathrm{CON}}\leqslant r_{\mathrm{down}}^{\mathrm{CON}}\Delta t \tag{19}$$

$$P_{t,k,i}^{\mathrm{CHP}}-P_{t-1,k,i}^{\mathrm{CHP}}\leqslant r_{\mathrm{up}}^{\mathrm{CHP}}\Delta t \tag{20}$$

$$P_{t-1,k,i}^{\mathrm{CHP}}-P_{t,k,i}^{\mathrm{CHP}}\leqslant r_{\mathrm{down}}^{\mathrm{CHP}}\Delta t \tag{21}$$

式中：$r_{\mathrm{up}}^{\mathrm{CON}}$、$r_{\mathrm{down}}^{\mathrm{CON}}$分别为火电机组爬坡、滑坡速率，单位均为MW/h；$r_{\mathrm{up}}^{\mathrm{CHP}}$、$r_{\mathrm{down}}^{\mathrm{CHP}}$分别为热电机组爬坡、滑坡速率，单位均为MW/h。

4)电锅炉约束。

电锅炉电热转换等式约束如下：

$$Q_{t,k,s,h}^{\mathrm{eboiler}}=3.6\eta P_{t,k,s,h}^{\mathrm{eboiler}} \tag{22}$$

式中：η为电热转换效率。

电锅炉运行电功率约束如下：

$$0\leqslant P_{t,k,s,h}^{\mathrm{eboiler}}\leqslant F_{t,k,s,h}P_{k,s,h}^{\mathrm{eboiler,max}} \tag{23}$$

式中：$F_{t,k,s,h}$为t时段子系统k第s座热电厂换热站h所配置电锅炉启停状态，$F_{t,k,s,h}=0$表示关停，$F_{t,k,s,h}=1$表示开启；$P_{k,s,h}^{\mathrm{eboiler,max}}$为子系统$k$第$s$座热电厂换热站$h$所配置电锅炉容量，单位为MW。

5)联络线约束。

联络线的各约束与式(2)—(7)类似，例如联络线功率上下限约束可表示为：

$$T_{k,m}^{\min}\leqslant T_{t,k,m}\leqslant T_{k,m}^{\max} \tag{24}$$

式中：$T_{k,m}^{\max}$、$T_{k,m}^{\min}$分别为子系统k第m条联络线功率上、下限，单位均为MW。其余联络线约束不再赘述。

2.3 上级优化主问题

上级优化主问题的目标函数为主问题协调变量$T_{t,k,m}^{\mathrm{main}}$与子问题联络线功率优化值$T_{t,k,m}^{*}$偏差及偏差的平方之和最小。

$$\min\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}\left\{\sum_{m=1}^{M_k}\left\{\left[\lambda_{t,k,m}(T_{t,k,m}^{\text{main}}-T_{t,k,m}^{*})\right]^2+\mu_{t,k,m}(T_{t,k,m}^{\text{main}}-T_{t,k,m}^{*})\right\}\right\}\Delta t \tag{25}$$

假设某联络线联接区域子系统 k_1 和 k_2，且分别对应子系统 k_1 的第 m_1 条联络线、子系统 k_2 的第 m_2 条联络线，则 2 个子系统的主问题协调变量 $T_{t,k_1,m_1}^{\text{main}}$、$T_{t,k_2,m_2}^{\text{main}}$ 满足如下约束：

$$T_{t,k_1,m_1}^{\text{main}}=T_{t,k_2,m_2}^{\text{main}} \tag{26}$$

式中：$k_1,k_2\in\{k\,|\,k=1,2,\cdots,K\}$；$m_1\in\{m\,|\,m=1,2,\cdots,M_{k_1}\}$；$m_2\in\left\{m\,\middle|\,m=1,2,\cdots,M_{k_2}\right\}$。

ATC 计算流程已在第 1 节进行了简要说明，下面以第 τ 次迭代为例，针对 ATC 如何计算、如何更新系数进行详细说明。

在第 τ 次迭代中，子系统 k 根据第 $\tau-1$ 次迭代求得的主问题协调变量优化值 $T_{t,k,m,\tau-1}^{\text{main}*}$、偏差平方项系数 $\lambda_{t,k,m,\tau-1}$ 与偏差项系数 $\mu_{t,k,m,\tau-1}$ 求解下级优化子问题，然后将子问题联络线功率优化值 $T_{t,k,m,\tau}^{*}$ 上传至虚拟上级调度中心，虚拟上级调度中心根据上传数据求解上级优化主问题，得到 $T_{t,k,m,\tau}^{\text{main}*}$，再根据收敛判据判断是否收敛，收敛判据如式(27)所示。

$$\frac{\left|T_{t,k,m,\tau}^{\text{main}*}-T_{t,k,m,\tau}^{*}\right|}{T_{k,m}^{\max}}\leqslant\varepsilon \tag{27}$$

式中：ε 为误差阈值。

若不满足式(27)，则更新偏差平方项与偏差项系数，更新规则详见文献[16]，然后将 $T_{t,k,m,\tau}^{\text{main}*}$、$\lambda_{t,k,m,\tau}$、$\mu_{t,k,m,\tau}$ 下发给子系统 k 进行第 $\tau+1$ 次迭代；若满足式(27)，则判定收敛，输出联络线的协调变量优化值作为最终优化值，例如式(26)的联络线功率最终优化值为 $T_{t,k_1,m_1,\tau}^{\text{main}*}$（或 $T_{t,k_2,m_2,\tau}^{\text{main}*}$），各子系统根据联络线功率优化值进行优化调度。

3　算例分析

3.1　算例系统

本文的算例系统为通过 1 条直流联络线相联的两区域互联电热联合系统，2 个区域分别称为送端、受端子系统。送端子系统有 2 座火电厂（各有 3 台火电机组）、2 座热电厂（分别有 3 台、4 台热电机组）、1 座风电场（装机容量为 500 MW），2 座热电厂分别配置容量为 13、16 MW 的电锅炉；受端子系统有 2 座火电厂（各有 4 台火电机组）、2 座热电厂（分别有 3 台、4 台热电机组）、1 座风电场（装机容量为 180 MW）。机组参数见附录 A 表 A1—A3，仿真中涉及的其余参数见附录 A 表 A4。

送端子系统的电负荷及风电预测出力、热负荷分别见附录 A 图 A1、A2，受端子系统的电负荷及风电预测出力、热负荷分别见附录 A 图 A3、A4，本文采用 Gurobi 9.0.3 进行优化求解。

3.2　联络线电价影响分析

若取联络线电价为 305 元／(MW·h)，则是否考虑交换功率费用的仿真结果对比情况如表 1 所示。

表 1　是否考虑交换功率费用的仿真结果对比

Table 1　Comparison of simulative results between with and without exchanging power cost

仿真情景	两端子系统总运行成本／万元	送端弃风量／(MW·h)	送端弃风率／%
不考虑交换功率费用	2 595.87	144.32	2.84
考虑交换功率费用	2 594.25	115.76	2.28

由表 1 可知，在考虑交换功率费用后，送端子系统的弃风率下降，多消纳了 28.56 MW·h 风电，两端子系统总运行成本节约了 1.62 万元，这说明在目标函数中计及交换功率费用有利于降低送端子系统弃风率和全系统的总运行成本。

交换功率费用与联络线电价成正比，进一步分析可得送端子系统弃风率与联络线电价之间的关系曲线如图 2 所示。

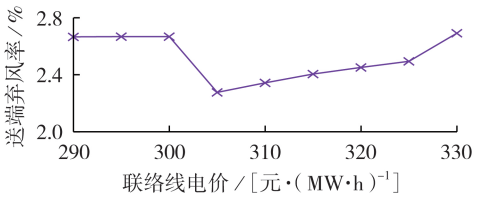


图 2　送端子系统弃风率与联络线电价间的关系曲线

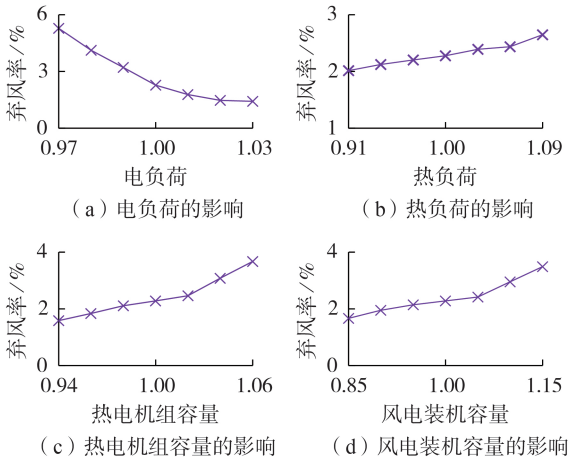
Fig.2　Curve of relationship between abandoned wind rate of sending-end subsystem and electricity price of tie-line

由图 2 可知，随着联络线电价的不断增加，送端子系统弃风率呈现两端高、中间低的变化趋势，记子系统运行成本除以子系统总发电量（包括火电机组与热电机组供电量、热电机组供热量通过热电比转换的“电量”以及风电实际上网电量）为该子系统的综合发电单位成本，且联络线电价在送端子系统的综合发电单位成本（298.08 元／(MW·h)）与受端子系统的综合发电单位成本（318.46 元／(MW·h)）之间时，送端子系统的弃风率处于较低水平。这是因为若联络线电价低于送端子系统综合发电单位成本，则送端子系统送电没有积极性，弃风率会增加，若联络线电价高于受端子系统综合发电单位成本，则受端子系统受电没有积极性，弃风率也会增加。

3.3　受端子系统特性对送端子系统弃风率的影响

以受端子系统的初始电负荷为基准，每次同步变化 1%，则送端子系统弃风率与受端子系统电负荷关系曲线如图 3(a)所示；以受端子系统中 2 座热

电厂的初始热负荷为基准，每次同步变化3%，则送端子系统弃风率与受端子系统热负荷之间的关系曲线如图3(b)所示；以受端子系统的初始热电机组容量为基准，当热电机组容量变化时，送端子系统弃风率与受端热电机组容量的关系曲线如图3(c)所示；以受端子系统风电场的初始风电装机容量为基准，当风电装机容量变化(风电预测出力与装机容量同步变化)时，送端子系统弃风率与受端子系统风电装机容量的关系曲线如图3(d)所示。图3中，电负荷、热负荷、热电机组容量、风电装机容量均为标幺值。



(a) 电负荷的影响　(b) 热负荷的影响　(c) 热电机组容量的影响　(d) 风电装机容量的影响

图3　送端子系统弃风率与受端子系统特性间的关系曲线

Fig.3　Curves of relationship between abandoned wind rate of sending-end subsystem and characteristics of receiving-end subsystem

由图3(a)可知，送端子系统弃风率随着受端子系统电负荷的增大而减小，其原因是受端子系统的电负荷增加后可为送端子系统的风电提供更大的异地消纳空间，从而提高风电消纳率；由图3(b)可知，送端子系统弃风率随着受端子系统热负荷的增大而增大，其原因是受端子系统热负荷增大使热电机组的“以热定电”功率相应提高，风电异地消纳的空间随之减小；由图3(c)可知，受端子系统中热电机组比重越大，送端子系统的弃风率越高，其原因是热电机组容量增加引起受端子系统的最小技术出力提升，并进一步导致风电的异地消纳空间减小；由图3(d)可知，随着受端子系统风电装机容量的增大，送端子系统的风电消纳率下降，其原因是风电装机容量增大后，受端子系统有效电负荷(特别是在夜间低谷期间)降低，留给送端子系统的风电异地消纳空间减小。

3.4　受端子系统内弃风消纳措施的影响分析

配置电锅炉已是区域内消纳弃风的重要措施，但受端子系统内配置电锅炉对送端子系统的风电消纳率有何影响，则有待进一步研究。

本节首先对以下3种场景进行仿真，然后分析场景3下受端子系统内电锅炉容量与送端子系统弃风率之间的关系：场景1，联络线功率维持不变(相当于不考虑多区协调消纳，仅考虑调度的独立性)；场景2，联络线功率可变；场景3，联络线功率可变，且受端子系统的2座热电厂分别配置容量为9、12 MW的电锅炉。

送端子系统风电预测出力及3种场景下风电实际出力如图4所示。

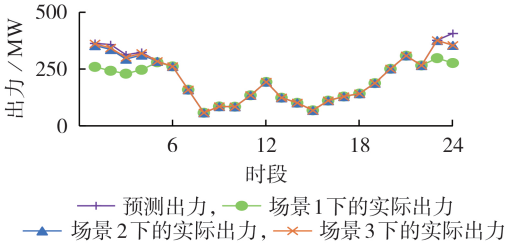


图4　送端子系统风电预测出力及3种场景下风电实际出力

Fig.4　Wind power forecasting output of sending-end subsystem and wind power actual output under three scenes

3种场景下仿真结果对比如表2所示，场景2、3的联络线功率对比如图5所示。

表2　3种场景下仿真结果对比

Table 2　Comparison of simulative results under three scenes

场景	两端子系统总运行成本/万元	送端弃风量/(MW·h)	送端弃风率/%
1	2607.52	592.58	11.65
2	2594.25	115.76	2.28
3	2592.71	85.32	1.68

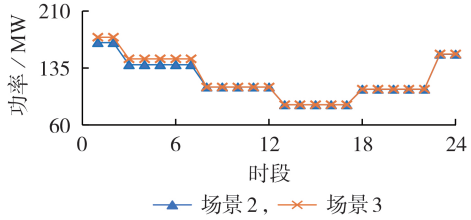


图5　场景2和场景3的联络线功率对比

Fig.5　Comparison of tie-line power between Scene 2 and Scene 3

根据图4、表2和图5可知，采用多区电热联合系统分散协调调度可提高送端电热联合系统的风电消纳率，且受端子系统配置电锅炉后，弃风时段内联络线功率增加，弃风率由2.28%进一步降至1.68%，更加有利于送端子系统的风电异地消纳。

若以受端子系统配置的初始电锅炉容量为基准，则当电锅炉容量变化时，送端子系统弃风率与受端子系统电锅炉容量之间的关系曲线如图6所示，图中电锅炉容量为标幺值。

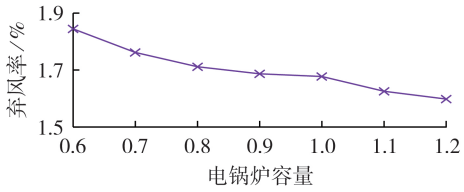


图6　送端子系统弃风率与受端子系统电锅炉容量间的关系曲线

Fig.6　Curve of relationship between abandoned wind rate of sending-end subsystem and electric boiler's capacity of receiving-end subsystem

由图6可知，送端子系统弃风率与受端子系统电锅炉容量有关。当电锅炉容量增大时，其在热负荷高峰（一般也是风电大发）时段消耗的电功率也会增加，若联络线电价低于受端子系统的综合发电单位成本，则受端子系统将更加愿意用送端子系统的电来供热，而不是增加自身的发电功率，因此受端子系统的电锅炉容量越大，送端子系统的弃风率越低。

4　结论

本文针对区域间以特高压直流为主要输送通道的发展格局，对远距离、大容量异地消纳弃风问题进行了详细分析，并得出了如下结论：

1）基于区域解耦及ATC，在考虑区域子系统信息保密、调度独立性的基础上，建立了多区互联电热联合系统分散协调消纳弃风调度模型，该模型仅需传递联络线功率信息，即可求出优化结果，且便于研究热力系统协助电力系统消纳弃风；

2）分散协调调度模型应计及交换功率费用，计及交换功率费用可提升系统风电消纳率，且合理选择联络线电价能够进一步降低弃风率；

3）风电富裕区域应优先选择与电负荷较高、热负荷和热电机组比重较低、风电渗透率较低的区域互联，以提高风电的异地消纳能力，在互联区域内采用消纳弃风措施也有利于降低风电富裕区域的弃风率。

本文研究成果可供系统规划、运行调度及电价制定等部门参考借鉴。

附录见本刊网络版（http://www.epae.cn）。

参考文献：

[1] 崔雪，邹晨露，王恒，等．考虑风电消纳的电热联合系统源荷协调优化调度[J]．电力自动化设备，2018，38(7)：74-81.
CUI Xue，ZOU Chenlu，WANG Heng，et al. Source and load coordinative optimal dispatching of combined heat and power system considering wind power accommodation[J]. Electric Power Automation Equipment，2018，38(7)：74-81.

[2] 李国庆，庄冠群，田春光，等．基于大规模储能融合蓄热式电锅炉的风电消纳多目标优化控制[J]．电力自动化设备，2018，38(10)：46-52，59.
LI Guoqing，ZHUANG Guanqun，TIAN Chunguang，et al. Multi-objective optimization control of wind power consumption based on regenerative electric boiler system integrated with large-scale energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment，2018，38(10)：46-52，59.

[3] 潘扬，石立宝，姚诸香，等．考虑多风电场出力耦合特性的热电联合优化调度[J]．电力自动化设备，2019，39(8)：232-238.
PAN Yang，SHI Libao，YAO Zhuxiang，et al. Optimal scheduling of combined heat and power system considering coupling characteristics of multiple wind farm outputs[J]. Electric Power Automation Equipment，2019，39(8)：232-238.

[4] 吕泉，胡炳廷，王海霞，等．风热冲突下热电厂供热问题研究[J]．电力自动化设备，2017，37(6)：236-244.
LÜ Quan，HU Bingting，WANG Haixia，et al. Heat-supply of thermal power plant in wind-heat conflict[J]. Electric Power Automation Equipment，2017，37(6)：236-244.

[5] XIA Y H，LIU J Y，HUANG Z W，et al. Carbon emission impact on the operation of virtual power plant with combined heat and power system[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering，2016，17(5)：479-488.

[6] ZHANG N，LU X，MCELROY M B，et al. Reducing curtailment of wind electricity in China by employing electric boilers for heat and pumped hydro for energy storage[J]. Applied Energy，2016，184：987-994.

[7] 施泉生，丁建勇，刘坤，等．含电、气、热3种储能的微网综合能源系统经济优化运行[J]．电力自动化设备，2019，39(8)：269-276，293.
SHI Quansheng，DING Jianyong，LIU Kun，et al. Economic optimal operation of microgrid integrated energy system with electricity，gas and heat storage[J]. Electric Power Automation Equipment，2019，39(8)：269-276，293.

[8] 李东森，高赐威，赵明．计及电转气热回收的综合能源系统蓄热罐容量规划与运行策略[J]．电力自动化设备，2019，39(8)：161-168.
LI Dongsen，GAO Ciwei，ZHAO Ming. Capacity planning and operating strategy of heat accumulator for integrated energy system considering heat recovery of power-to-gas[J]. Electric Power Automation Equipment，2019，39(8)：161-168.

[9] 兰贞波，冯万兴，胡军峰，等．基于可变误差多面体算法的储能融合电锅炉提升风电消纳控制技术[J]．电力自动化设备，2020，40(5)：47-54.
LAN Zhenbo，FENG Wanxing，HU Junfeng，et al. Usage of combined energy storage electric boiler to enhance wind power accommodation based on flexible tolerance polyhedron method[J]. Electric Power Automation Equipment，2020，40(5)：47-54.

[10] QI Y，DONG W J，DONG C G，et al. Understanding institutional barriers for wind curtailment in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2019，105：476-486.

[11] CHEN X Y，KANG C Q，O'MALLEY M，et al. Increasing the flexibility of combined heat and power for wind power integration in China：modeling and implications[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2015，30(4)：1848-1857.

[12] 谢华宝，戴赛，许丹，等．热网特性对弃风消纳效果的影响研究[J]．电力自动化设备，2020，40(5)：24-31.
XIE Huabao，DAI Sai，XU Dan，et al. Influence of heat network characteristics on abandoned wind absorption effect[J]. Electric Power Automation Equipment，2020，40(5)：24-31.

[13] CAI Z，ZHANG G F，XU D，et al. Multi-area joint scheduling model considering peak load regulating of nuclear power[J]. Energy Reports，2021，7(Supplement 1)：1-9.

[14] 董存，梁志峰，礼晓飞，等．跨区特高压直流外送优化提升新能源消纳能力研究[J]．中国电力，2019，52(4)：41-50.
DONG Cun，LIANG Zhifeng，LI Xiaofei，et al. Study on power

optimization of the trans-regional UHVDC delivery channels in promoting renewable energy accommodation capacity[J]. Electric Power,2019,52(4):41-50.

[15] KARGARIAN A, YONG F, LI Z. Distributed security-constrained unit commitment for large-scale power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2015,30(4):1925-1936.

[16] 周明,翟俊义,任建文,等. 含风电并网的直流互联电网分散协调调度方法[J]. 电网技术,2017,41(5):1428-1434.
ZHOU Ming, ZHAI Junyi, REN Jianwen, et al. A decentralized coordinated dispatch approach for interconnected power grid with wind power via HVDC tie-line[J]. Power System Technology,2017,41(5):1428-1434.

[17] 黄瀚燕,周明,李庚银. 考虑多重不确定性和备用互济的含风电互联电力系统分散协调调度方法[J]. 电网技术,2019,43(2):381-389.
HUANG Hanyan,ZHOU Ming,LI Gengyin. Coordinated decentralized dispatch of wind-power-integrated multi-area interconnected power systems considering multiple uncertainties and mutual reserve support[J]. Power System Technology,2019,43(2):381-389.

[18] 夏云睿,朱建全. 基于目标级联分析法的多区域电力系统分散优化调度[J]. 电工电气,2020(11):10-15.
XIA Yunrui, ZHU Jianquan. Decentralized optimal dispatch of multi-area power systems based on analytical target cascading[J]. Electrotechnics Electric,2020(11):10-15.

[19] 文云峰,郭创新,郭剑波,等. 多区互联电力系统的分散协调风险调度方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3724-3733.
WEN Yunfeng, GUO Chuangxin, GUO Jianbo, et al. Coordinated decentralized risk-based dispatch of multi-area interconnected power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3724-3733.

[20] 周升彧,戴赛,许丹,等. 考虑源侧灵活性改造及可调节电热负荷的电热联合调度模型[J]. 电网技术,2020,44(6):2254-2262.
ZHOU Shengyu, DAI Sai, XU Dan, et al. Optimal dispatching model of combined heat and power system considering source-side flexibility improvement and controllable heat-power load[J]. Power System Technology,2020,44(6):2254-2262.

作者简介:

刘书彦

刘书彦(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为电热联合系统优化调度(**E-mail**:327008059@qq.com);

胡林献(1966—),男,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统经济调度、区域综合能源系统(**E-mail**:linxian_hu@163.com)。

(编辑 李玮)

Coordinated abandoned wind accommodation analysis of multi-area interconnected combined heat and power system considering exchanging power cost

LIU Shuyan[1], LIAO Yang[1], CHAI Qingxuan[2], HU Linxian[1], LI Yansong[2]

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: With the increase of grid-connected wind power capacity and abandoned wind power, the long-distance and large-capacity wind power trans-area accommodation has become an effective strategy to reduce the abandoned wind rate. In view of the inter-area development pattern taking UHVDC(Ultra High Voltage Direct Current) as the main transmission channel, the inter-area DC tie-line model is established. Then, considering the information confidentiality and dispatching independence of each areal combined heat and power system, the dispatching problem is divided into the upper-level main optimization problem and lower-level sub optimization problem based on analytical target cascading. And taking the tie-line power as the coordinated variable, the decentralized coordinated abandoned wind accommodation dispatching model of multi-area interconnected combined heat and power system considering exchanging power cost of tie-line is established. The influences of electricity price of tie-line, system characteristics of interconnected areas and abandoned wind accommodation measures on the wind power accommodation rate of multi-area interconnected combined heat and power system are analyzed in detail by case simulation. The research shows that considering exchanging power cost of tie-line and selecting electricity price of tie-line reasonably, giving priority to being interconnected with the areas with high electric load, low proportion of heat load and thermal power unit, and low penetration of wind power, and taking abandoned wind accommodation measures in the interconnected areas are beneficial to wind power accommodation of areal combined heat and power system in which wind power is rich.

Key words: multi-area interconnection; combined heat and power system; decentralized coordinated dispatching; exchanging power cost; abandoned wind accommodation

附录 A

表 A1 各机组技术参数

Table A1 Technical parameters of each unit

机组编号		送端子系统			受端子系统		
		电功率范围/MW	抽汽速率范围/($t\ h^{-1}$)	爬/滑坡率/($MW\ h^{-1}$)	电功率范围/MW	抽汽速率范围/($t\ h^{-1}$)	爬/滑坡率/($MW\ h^{-1}$)
热电机组	1-1	[50,100]	[30,120]	20	[50,100]	[30,120]	20
	1-2	[50,100]	[30,120]	20	[50,100]	[30,120]	20
	1-3	[50,100]	[30,120]	20	[50,100]	[30,120]	20
	2-1	[50,100]	[30,120]	20	[50,100]	[30,120]	20
	2-2	[50,100]	[30,120]	20	[50,100]	[30,120]	20
	2-3	[50,100]	[30,120]	20	[50,100]	[30,120]	20
	2-4	[50,100]	[30,120]	20	[50,100]	[30,120]	20
纯凝火电机组	3-1	[100,200]	[0,0]	40	[100,200]	[0,0]	40
	3-2	[100,200]	[0,0]	40	[100,200]	[0,0]	40
	3-3	[100,200]	[0,0]	40	[100,200]	[0,0]	40
	3-4	—	—	—	[100,200]	[0,0]	40
	4-1	[100,200]	[0,0]	40	[100,200]	[0,0]	40
	4-2	[100,200]	[0,0]	40	[100,200]	[0,0]	40
	4-3	[100,200]	[0,0]	40	[100,200]	[0,0]	40
	4-4	—	—	—	[100,200]	[0,0]	40

表 A2 送端子系统各机组耗量特性拟合系数

Table A2 Consumption characteristic fitting coefficients of sending-end subsystem's each unit

机组编号		e_0	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5
热电机组	1-1	3.204	0.4192	0.121	0.0007	0.00016	0.00026
	1-2	3.212	0.4176	0.119	0.0007	0.00017	0.00027
	1-3	3.215	0.4134	0.118	0.0007	0.00018	0.00028
	2-1	2.986	0.4133	0.121	0.0009	0.00018	0.00022
	2-2	3.183	0.4194	0.124	0.0008	0.00016	0.00033
	2-3	3.235	0.4032	0.112	0.0006	0.00021	0.00031
	2-4	3.231	0.4056	0.114	0.0007	0.00019	0.00029

机组编号		a_0	a_1	a_2
纯凝火电机组	3-1	2.3298	0.3101	0.0015
	3-2	5.9769	0.2548	0.0007
	3-3	3.0044	0.3058	0.0009
	4-1	4.9369	0.2762	0.0011
	4-2	4.4499	0.2947	0.0012
	4-3	5.8582	0.2616	0.0008

表 A3 受端子系统各机组耗量特性拟合系数

Table A3 Consumption characteristic fitting coefficients of receiving-end subsystem's each unit

机组编号		e_0	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5
热电机组	1-1	3.000	0.4195	0.123	0.0008	0.00017	0.00029
	1-2	3.235	0.4032	0.112	0.0006	0.00021	0.00031
	1-3	3.136	0.3833	0.131	0.0007	0.00015	0.00025
	2-1	2.987	0.4125	0.120	0.0009	0.00018	0.00022
	2-2	3.164	0.4210	0.125	0.0008	0.00016	0.00033
	2-3	3.212	0.4176	0.119	0.0007	0.00017	0.00027
	2-4	2.987	0.4125	0.120	0.0009	0.00018	0.00022

机组编号		a_0	a_1	a_2
纯凝火电机组	3-1	4.9369	0.2762	0.0011
	3-2	5.9653	0.2608	0.0008
	3-3	5.4572	0.2684	0.0009
	3-4	5.9653	0.2608	0.0008
	4-1	3.0000	0.3200	0.0004
	4-2	2.3298	0.3101	0.0015
	4-3	5.3757	0.2702	0.0010
	4-4	2.3298	0.3101	0.0015

表 A4 其他参数

Table A4 Other parameters

参数	数值
蒸汽焓降 ΔH /(kJ·kg^{-1})	2327.53
煤价 C^{coal} /(元·t^{-1})	680
最大凝气工况斜率 b_{H} /(MW·h·t^{-1})	-0.05
最小凝气工况斜率 b_{L} /(MW·h·t^{-1})	0.18
电热转换效率 η	0.95
调度总时段数 T	24
单位调度周期的时间 Δt /h	1
联络线功率上限 $T_{xy}^{\max}$ /MW	240
联络线功率下限 $T_{xy}^{\min}$ /MW	50
联络线调整量上限 $d_{xy}^{\max}$ /MW	50
联络线调整量下限 $d_{xy}^{\min}$ /MW	10
控制最小调整间隔时段数的量 T_{N}	3
联络线调整次数最大值 L	8
传输电量最小值 Q /(MW·h)	1800
送端子系统弃风惩罚因数 C_1^{W} /[元·(MW·h)$^{-1}$]	616
受端子系统弃风惩罚因数 C_2^{W} /[元·(MW·h)$^{-1}$]	684
主问题协调变量初值 $T_{t,k,m,0}^{\mathrm{main}}$ /MW	75
偏差项平方项系数初值 $\lambda_{t,k,m,0}$	1
偏差项系数初值 $\mu_{t,k,m,0}$	1
误差 ε	10^{-8}

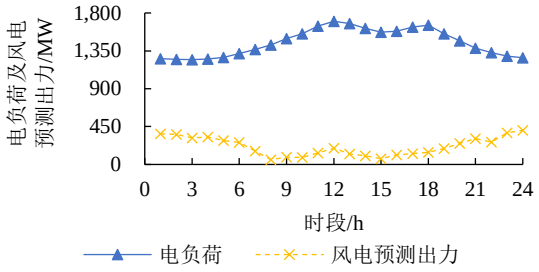


图 A1 送端子系统的电负荷及风电预测出力

Fig.A1 Electric load and wind power forecasting output of sending-end subsystem

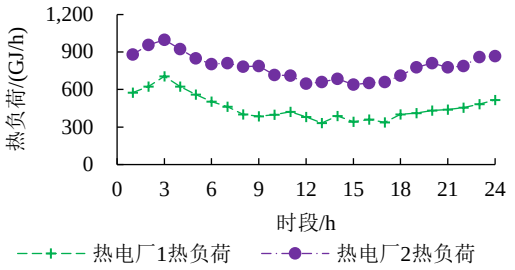


图 A2 送端子系统的热负荷

Fig.A2 Heat load of sending-end subsystem

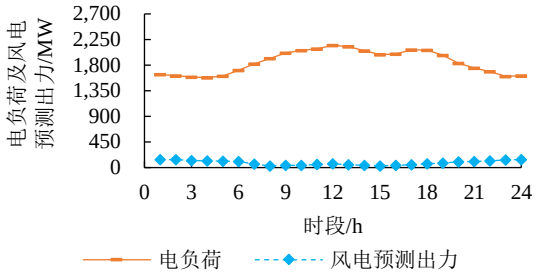


图 A3 受端子系统的电负荷及风电预测出力

Fig.A3 Electric load and wind power forecasting output of receiving-end subsystem

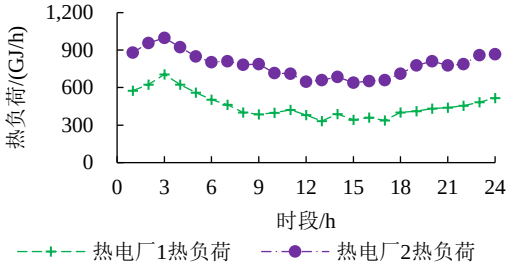


图 A4 受端子系统的热负荷

Fig.A4 Heat load of receiving-end subsystem