

考虑风电集群接入电网分区的多元优化控制方法

吕良¹, 刘文颖¹, 张临建², 汪宁渤³, 拜润卿⁴

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 国网北京市电力公司城区供电公司, 北京 100031;
3. 国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730050; 4. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:随着风电大规模、高比例并网运行,在风电集群区域建立多元相济的电力系统控制模式是提高系统调峰能力、缓解风电消纳困境的有效途径。在分析风电受阻主要因素的基础上,提出以集群风电的送出断面划分控制区域,综合考虑各区域内负荷的调节特性及各类型电源的调峰特性,以风电受阻电量最小为目标,建立分区多元优化控制模型并进行求解,形成火电、水电、风电、可调节负荷的优化控制方法。以某地区电网为例,验证所提分区多元优化控制方法的有效性。

关键词:高比例风电;新能源消纳;协调控制;多元优化;分区控制

中图分类号:TM 73;TM 614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.004

0 引言

我国的电源结构相对单一,在日内时间尺度上能够迅速、灵活启停的机组数量较少,系统的调峰能力有限,而随着风电接入电网的规模不断扩大,对电网调峰能力的要求愈加苛刻,电网调峰面临的压力日益突出^[1-3],仅依靠常规电源应对风电的随机性、波动性,在风电比例增大到一定的程度时,即使常规机组频繁启停或运行在深度调峰状态,也很难满足系统的调峰需求^[4-5],造成严重的弃风现象,尤其是风电资源丰富的西北地区更为严重。以甘肃为例,其2017年的风电利用小时数仅为1 469 h,弃风率高达33%。因此,在风电大规模并网的形势下,在风电集群区域进行分区并建立包含火电、水电、负荷、风电的多元优化控制的系统控制模式是提高系统调峰能力、缓解风电消纳困境的有效途径^[6-7]。

目前已有不少关于多元调峰优化控制技术的研究。文献[8]将具有可调节特性的高载能负荷作为消纳风电的重要手段,将其与常规电源共同参与电网的优化调度,形成源荷协调优化运行的调度模式;文献[9]提出了以风电消纳为目标的规模集群可再生能源有功分层的协调分配方法;文献[10]基于风电场与热电联产联合运行的调度模式,提出了考虑风电出力不确定性的联合系统优化调度模型;文献[11]建立了考虑风电外送的省级系统调峰分析模

型;文献[12]建立了水电调峰效益模型,并结合风、火电运行价格机制,构建了考虑机组组合的新型多目标动态优化调度模型;文献[13]从电网调峰能力的角度分析了电网的风电接纳能力;文献[14]提出了考虑负荷需求的风、水、火电短期成本最小联合优化控制;文献[15]利用各个省级电网的负荷互补特性以及常规水电、抽水蓄能、火电等电源调节性能的差异,建立了网省两级调度多电源联合调峰方法以协调电网间的电力分配。上述研究在优化方法和调峰控制方面取得了一定的成果,但未涉及大规模风电接入电网后风电送出通道制约下协调通道内侧调峰资源消纳风电的情况。

本文在研究风电接入对系统调峰特性影响的基础上,分析了风电受阻的主要因素;基于集群风电送出通道约束对风电集中接入的电网进行分区,将系统调峰压力进行分解;在区域内,综合考虑负荷及各类型电源的调节特性,以受阻风电电量最小为目标,建立分区多元优化控制模型并进行求解,提出火电、水电、风电、可调节负荷的优化控制方法,以缓解因调峰能力不足造成风电送出受阻的问题。最后以甘肃河西电网为例进行仿真,验证了所提方法的有效性。

1 分区多元控制消纳受阻风电分析

1.1 风电接入增加了电网的调峰压力

在研究风电集群接入对电网调峰的影响时,可将风电作为负的负荷叠加到原始负荷曲线上,形成等效负荷曲线。如图1所示,将风电叠加到原始负荷曲线后形成的等效负荷的峰谷差大于原始负荷的峰谷差,常规电源下的调峰能力不能满足系统的调峰需求,风电送出受阻。为此,常规电源侧采取了诸多措施以增加常规电源的下调峰能力,但仍不能满足高比例风电接入电网增加的调峰压力。

收稿日期:2018-12-25;修回日期:2019-05-16

基金项目:国家科技支撑计划项目(2015BAA01B04);国家电网公司科技项目(SGSKY00FJJS1700007);国网甘肃省电力公司科技项目(SGSKY00JNJS1700152)

Project supported by the National Key Technology Research and Development Program of China (2015BAA01B04), the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China (SGSKY00FJJS1700007) and the Science and Technology Program of State Grid Gansu Electric Power Company (SGSKY-00JNJS1700152)

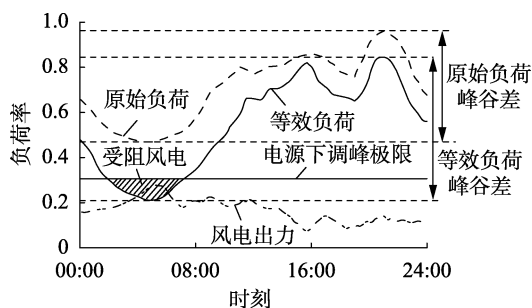


图 1 风电集群有功出力的反调峰特性示意图

Fig.1 Schematic diagram of reverse peak-shaving characteristic of wind power group active output power

1.2 分区多元优化控制消纳受阻风电分析

将风电接入电网按照送出通道的约束进行分区,将整体的调峰压力分解到各区域进行化解,再将各区域内的可调节负荷纳入调节,采用分区多元优化控制方法对常规电源和可调节负荷进行优化控制,可有效降低系统的调峰压力,提升系统整体的风电消纳水平。

分区多元优化控制在消纳受阻风电问题上具有以下优势:

(1) 对系统进行分区将系统整体的峰谷差分散到各个区域进行消化分解,可以降低系统整体的调峰压力,增加风电消纳能力;

(2) 区域内对水电、火电、风电、负荷进行优化控制可以充分挖掘区域内的各种调峰资源并进行优化控制,提高系统整体消纳风电的能力;

(3) 多元优化控制涉及复杂电网、各类电源、负荷运行约束^[11],本质上是多维的大规模非线性多目标优化问题,模型的求解较为复杂,对系统进行分区可以减少模型优化及求解中变量的维数,有效降低求解规模、提高求解速度。

2 多元调节能力分析

(1) 火电调节能力分析。

火电机组的出力受到出力约束和爬坡约束的制约。火电调节特性如图 2 所示,其正常发电出力范围在最小技术出力和最大技术出力之间,一般约为额定容量的 60%~70%,目前可达到 40%~50%。火力发电机组升/降负荷的速率受锅炉和汽轮机两方面的影响,一般大中型机组的升负荷速率控制在每分钟 1%~2%。

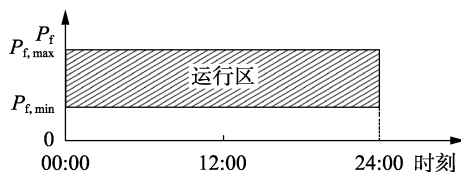


图 2 火电调节特性示意图

Fig.2 Schematic diagram of regulation characteristic of thermal power

(2) 水电调节能力分析。

水电调节特性如图 3 所示。水轮机在实际运行中会出现振动,因此在安排水电机组出力时必须考虑水轮机的振动,避免其在振动区工作。负荷在 $[0, 35\%P_h]$ 范围内为许可运行区间;负荷在 $(35\%P_h, 75\%P_h]$ 范围内为振动区间,禁止长时间运行;负荷在 $(75\%P_h, P_h]$ 范围内为稳定运行区间^[16]。

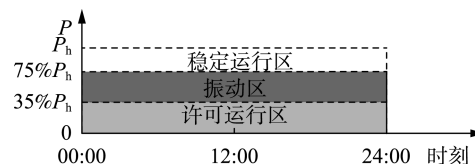


图 3 水电调节特性示意图

Fig.3 Schematic diagram of regulation characteristic of hydropower

(3) 风电调节能力分析。

风电的调节是半可控的,风电调节特性如图 4 所示,其实际运行区间在风电预测出力曲线之下,即在优化控制过程中若电网无法完全消纳来风,则可降低风电功率。

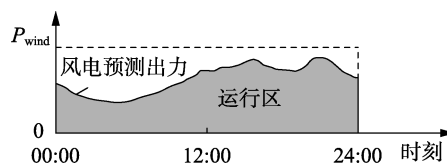


图 4 风电调节特性示意图

Fig.4 Schematic diagram of regulation characteristic of wind power

(4) 可调节负荷调节能力分析。

a. 可离散调节负荷。

典型的可离散调节负荷为高载能负荷,主要包括电解铝、碳化硅、铁合金等类型,其调节特性如图 5 所示。可离散负荷的调节容量较大,可以通过离散的分组投切实现对负荷功率的调节,离散调节时间间隔最小为 4 h。

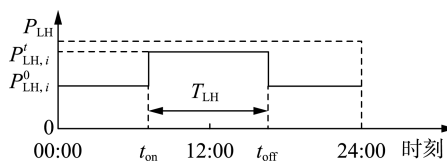


图 5 可离散负荷调节特性示意图

Fig.5 Schematic diagram of regulation characteristic of discrete load

b. 可连续调节负荷。

高载能负荷除了具有离散投切调节特性外,部分高载能负荷(如铁合金负荷)还具有小范围内的连续调节特性,如图 6 所示。根据实际生产数据显示,在额定容量的 $\pm 5\%$ 范围内,铁合金负荷可以实现短时间尺度内对风电的连续追踪控制。

c. 可时移负荷。

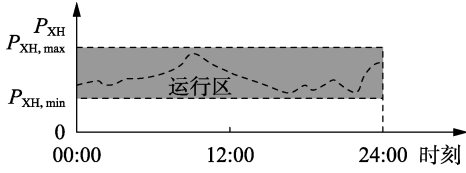


图6 可连续负荷调节特性示意图

Fig.6 Schematic diagram of regulation characteristic of continuous load

可时移负荷一般指具有储能特性的用电负荷,如电动汽车、蓄热电锅炉、空调冷库等,其调节特性如图7所示。图中时段 T_1 的负荷可转移至时段 T_2 ,在不改变用电量的前提下,将负荷高峰期的用电改为负荷低谷期的用电,实现负荷的转移,响应电网的调峰需求。

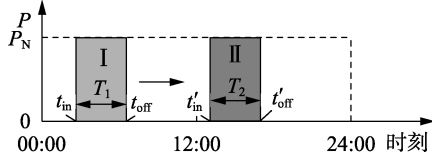


图7 可时移负荷调节特性示意图

Fig.7 Schematic diagram of regulation characteristic of time shiftable load

3 以消纳风电为目标的分区多元优化控制优化方法

3.1 分区多元优化控制模式

各风电基地的运行情况表明,风电资源丰富的地域一般以若干个风电集群接入电网,各风电集群再通过不同区域的输电通道将风电送出。但是目前大多风电集群地区的风电送出通道的容量较小,通过送出实现风电的完全消纳较为困难。风电大发期间送出通道被完全利用,此时仍存在大量受阻风电,在这种情况下通道外的调峰资源已经无法帮助内侧进行调峰消纳,为了增加风电消纳量,以各个风电集群的送出通道作为分界线,逐一考虑集群通道内侧区域的调峰资源,将其纳入调峰模型中进行优化。

在传统的分区分区协调中,受优化计算规模及速度的制约,无法直接调度系统中的全部电源、负荷。而在分区优化中,以送出通道为界限划分区域,在各个区域内对该地区内的全部负荷及电源进行逐一建模,并将其纳入协调体系中,因此能够深度挖掘各个区域的消纳潜力,达到更优的消纳效果。

分区优化计算后得到各个区域送出通道的送出计划,然后再由电网调度中心统一根据各通道上报的送出计划协调电网侧电源出力,完成全网的优化控制过程。

因此本文以风电集群出力送出通道为分界线进

行分区,区内基于风、火、水电以及负荷等的多元特性进行优化控制,在约束条件下以风电受阻电量最小为目标,通过优化求解确定常规电源、可调节负荷、风电出力水平,提高风电消纳能力,减少受阻风电。图8为分区多元优化控制模式示意图,将某一地区按照风电送出通道的网架约束划分为 N 个区域,然后在各区域内部进行多元优化控制。

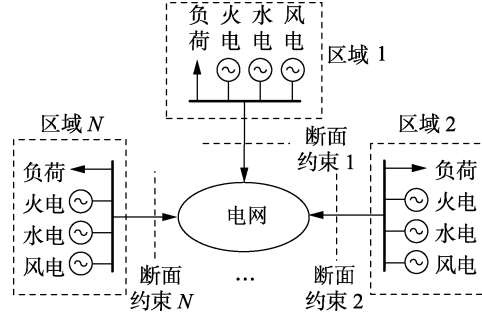


图8 分区多元优化控制示意图

Fig.8 Schematic diagram of partition multivariate optimal control

3.2 区内多元优化控制模型

分区多元控制的主要任务是基于区域内多种类型电源以及负荷的调节特性,对区内多元调峰资源进行优化控制,从而达到降低受阻风电的目的。

因此,对于区域 k ,基于受阻风电,将火电、水电、可调节负荷作为独立的控制变量,并考虑各变量调节特性约束,以区内受阻风电电量最小的目标函数为:

$$F_1 = \min \left\{ \sum_{t=1}^T \Delta P'_{\text{wind}} \Delta t \right\} \quad (1)$$

其中, T 为系统调度周期内的总时段数; $\Delta P'_{\text{wind}} = P'_{\text{wind,fore}} - P'_{\text{wind}}$ 为时段 t 的受阻功率, $P'_{\text{wind,fore}}$ 为时段 t 的风电预测功率, P'_{wind} 为时段 t 的风电实际发电功率; Δt 为各时段时长,取值为1 h。

$\Delta P'_{\text{wind}}$ 满足如下约束:

$$\Delta P'_{\text{wind}} = \sum_{i=1}^{N_f} P'_{f,i} + \sum_{j=1}^{N_h} P'_{h,j} + P'_{\text{wind,fore}} - \left(D^t + P'_{\text{out}} + \sum_{a=1}^{N_{\text{LH}}} P'_{\text{LH},a} + \sum_{b=1}^{N_{\text{XH}}} P'_{\text{XH},b} + \sum_{c=1}^{N_{\text{SY}}} P'_{\text{SY},c} \right) \quad (2)$$

其中, N_f 为火电机组数量; N_h 为水电机组数量; N_{LH} 为可离散调节负荷数量; N_{XH} 为可连续调节负荷数量; N_{SY} 为可时移负荷数量; $P'_{f,i}$ 为时段 t 火电机组 i 的出力; $P'_{h,j}$ 为时段 t 水电机组 j 的出力; D^t 为时段 t 的常规负荷功率; P'_{out} 为时段 t 联络线的送出功率; $P'_{\text{LH},a}$ 为时段 t 第 a 个可离散调节负荷的功率; $P'_{\text{XH},b}$ 为时段 t 第 b 个可连续调节负荷的功率; $P'_{\text{SY},c}$ 为时段 t 第 c 个可时移负荷的功率。

此外,模型还需满足以下约束。

(1) 备用容量约束。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_f} (P_{f,i}^c - P_{f,i}^t) + \sum_{j=1}^{N_h} (P_{h,j}^c - P_{h,j}^t) \geq r P_{d,\max} + \delta P_{\text{wind,fore}}^t \\ \sum_{i=1}^{N_f} (P_{f,i}^t - P_{f,i}^{\min}) + \sum_{j=1}^{N_h} (P_{h,j}^t - P_{h,j}^{\min}) \geq \delta P_{\text{wind,fore}}^t \end{cases} \quad (3)$$

其中, $P_{f,i}^c$ 为火电机组 i 的装机容量; $P_{h,j}^c$ 为水电机组 j 的装机容量; $P_{d,\max}$ 为系统的最大负荷; r 为负荷的旋转备用率; δ 为风电功率的预测误差, 在传统负荷备用的基础上考虑风电预测误差, 以应对风电的随机性; $P_{f,i}^{\min}$ 为火电机组 i 的最小技术出力; $P_{h,j}^{\min}$ 为水电机组 j 的最小技术出力。

(2) 火电机组调约束。

a. 最小技术出力和最大发电约束。

$$P_{f,i}^{\min} U_{f,i}^t \leq P_{f,i}^t \leq P_{f,i}^{\max} U_{f,i}^t \quad (4)$$

b. 爬坡速度约束。

$$-R_{f,i}^{\text{down}} \Delta t \leq P_{f,i}^{t+1} - P_{f,i}^t \leq R_{f,i}^{\text{up}} \Delta t \quad (5)$$

c. 最小启停时间约束。

$$\begin{cases} (T_{f,i}^{\text{on}} - U_{f,i}^t)(S_{f,i}^{t-1} - S_{f,i}^t) \geq 0 \\ (T_{f,i}^{\text{off}} - D_{f,i}^t)(S_{f,i}^t - S_{f,i}^{t-1}) \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $P_{f,i}^{\max}$ 分别为火电机组 i 的最大发电功率; $R_{f,i}^{\text{down}}$ 和 $R_{f,i}^{\text{up}}$ 分别为火电机组 i 的下爬坡和上爬坡速度; $T_{f,i}^{\text{on}}$ 和 $T_{f,i}^{\text{off}}$ 分别为火电机组 i 在时段 t 的持续开机和关机时间; $U_{f,i}^t$ 和 $D_{f,i}^t$ 分别为火电机组 i 所要求的最小持续开机和关机时间; $S_{f,i}^t$ 为火电机组 i 在时段 t 的启停状态变量, 开启时取值为 1, 停机时取值为 0。

(3) 水电机组调约束。

对于参与调峰的水电机组, 其具体运行约束如下。

a. 爬坡速率约束。

$$-R_{h,j}^{\text{down}} \Delta t \leq P_{h,j}^{t+1} - P_{h,j}^t \leq R_{h,j}^{\text{up}} \Delta t \quad (7)$$

b. 出力上下限约束。

$$P_{h,j}^t \in (0, c_1 P_{h,j}) \cup (c_2 P_{h,j}, P_{h,j}) \quad (8)$$

其中, $R_{h,j}^{\text{down}}$ 和 $R_{h,j}^{\text{up}}$ 分别为水电机组 j 的下爬坡和上爬坡速度; c_1 为震动区起始功率比率; c_2 为震动区结束比率。在水电站的实际运行中, 其调峰能力不仅受到可发出力和基荷计划出力的约束, 同时还受到水电站日电量约束的影响, 即:

$$\Delta t \sum_{t=1}^T P_{h,j}^t \leq W_r + W_b \quad (9)$$

其中, W_r 为水电可发电量; W_b 为水电基荷计划电量。

(4) 可调节负荷约束。

a. 可离散调节负荷。

可离散调节负荷包括电解铝、碳化硅、铁合金等, 可采用离散投切的方式进行调节, 调节过程中需满足式 (10) 所示负荷功率上下限约束和式 (11) 所示调节持续时间约束。

$$P_{\text{LH},a}^{\min} \leq P_{\text{LH},a}^t \leq P_{\text{LH},a}^{\max} \quad (10)$$

$$T_{\text{LH}}^{\min} \leq T_{\text{LH}} \leq T_{\text{LH}}^{\max} \quad (11)$$

其中, $P_{\text{LH},a}^{\min}$ 、 $P_{\text{LH},a}^{\max}$ 分别为第 a 个可离散调节负荷的最小、最大容量限制; T_{LH} 为可离散调节负荷的调节持续时间; $T_{\text{LH}}^{\min}$ 、 $T_{\text{LH}}^{\max}$ 分别为调节持续时间的最小值、最大值。

b. 可连续调节负荷。

部分高载能负荷具有小范围内的连续调节特性, 即满足如下约束:

$$P_{\text{XH},b}^{\min} \leq P_{\text{XH},b}^t \leq P_{\text{XH},b}^{\max} \quad (12)$$

其中, $P_{\text{XH},b}^{\min}$ 、 $P_{\text{XH},b}^{\max}$ 分别为第 b 个可连续调节负荷的最小、最大容量限制。

c. 可时移负荷。

可时移负荷调节需满足式 (13) 所示负荷有功功率约束和式 (14) 所示电量约束。

$$P_{\text{SY},c}^{\min} \leq P_{\text{SY},c}^t \leq P_{\text{SY},c}^{\max} \quad (13)$$

$$W_{\text{SY},c}^{\min} \leq W_{\text{SY},c}^t \leq W_{\text{SY},c}^{\max} \quad (14)$$

其中, $P_{\text{SY},c}^{\min}$ 和 $P_{\text{SY},c}^{\max}$ 分别为第 c 个可时移负荷功率的下限、上限; $W_{\text{SY},c}^t$ 为时段 t 第 c 个可时移负荷的总储存电量; $W_{\text{SY},c}^{\min}$ 、 $W_{\text{SY},c}^{\max}$ 分别为第 c 个可时移负荷储存电量的下限、上限。

(5) 风电出力约束。

风电出力功率受来风情况及风机容量的限制, 出力上限为风电预测功率, 应控制风电出力不大于预测功率, 因此本文模型中的风电出力满足以下约束:

$$0 \leq P_{\text{wind}}^t \leq P_{\text{wind,fore}}^t \quad (15)$$

(6) 外送通道约束。

外送功率需要满足如下送出通道功率约束:

$$P_{\text{out}}^t \leq P_{\text{out,max}} \quad (16)$$

其中, $P_{\text{out,max}}$ 为送出通道的功率上限。

3.3 区内多元优化控制模型求解

本文在建立分区多元协调控制优化模型的基础上, 借助 MATLAB 进行求解, 由于模型中含有非线性约束, 因此调用 Optimization Toolbox 中的非线性优化模块进行求解, 该模块采用的优化算法为序列二次规划 (SQP) 算法。该算法具有较好的全局收敛性和局部超线性收敛性。以上建立的多元控制优化模型 (式 (1) — (16)) 可以表示为:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} & h_i(\mathbf{x}) = 0 \quad i \in \{1, 2, \dots, m_1\} \\ & g_i(\mathbf{x}) \geq 0 \quad i \in \{1, 2, \dots, m_2\} \end{cases} \quad (17)$$

其中, $\mathbf{x}$ 为模型中的自变量, 即常规电源及可调节负荷的功率水平; $f(\mathbf{x})$ 为目标函数(式(1)); $h_i(\mathbf{x})$ 为等式约束(式(2)); $g_i(\mathbf{x})$ 为不等式约束(式(3)—(16)); m_1 为等式约束的数量; m_2 为不等式约束的数量。

3.4 以消纳风电为目标的分区多元优化控制方法

分区多元优化控制方法的求解流程如图9所示。

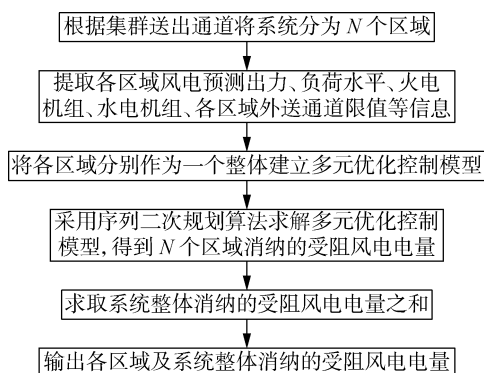


图9 分区多元优化控制方法的求解流程

Fig.9 Solving procedure of partition multivariate optimal control method

4 算例分析

本文以大规模风电接入的甘肃河西地区电网为背景,采用2016年某典型日的运行数据对多元分区优化控制方法进行仿真验证,该地区电网的接线示意图如附录中图A1所示。

在进行传统协调调度前,对该风电集群区域利用本文所提分区优化方法进行以下仿真计算。2016年甘肃河西地区电网某典型日的最大负荷为2 560 MW,最小负荷为1 854 MW,风电预测最大出力为2 125 MW,最小出力为350 MW,该地区常规电源下调峰能力为1 054 MW,全天受阻风电如图10中阴影部分所示。

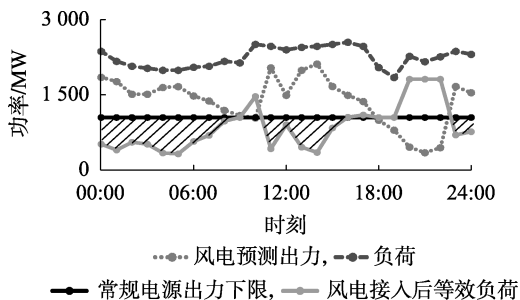


图10 河西电网典型日的受阻风电

Fig.10 Obstructed wind power of Hexi Power Grid in a typical day

该地区电网风电送出的主要断面为酒钢—河西断面和玉门—嘉峪关断面,其稳定控制功率限值分别为680、520 MW。该地区风电送出通道的容量较小,通过送出实现风电的完全消纳较为困难,根据本文所提方法,以玉门—嘉峪关以及酒泉—嘉峪关断

面送出通道为约束将河西地区电网划分为2个区域,控制区域1的功率出控制断面为酒钢—嘉峪关断面,控制区域2的功率出控制断面为玉门—嘉峪关断面,如附录中图A1所示。分别对2个区域建立多元分区优化控制模型并进行求解。区域1优化后的可调节负荷用电曲线如图11所示,各类型电源的出力情况如图12所示,日消纳受阻风电电量为1 248 MW·h,优化求解时间为93 ms。

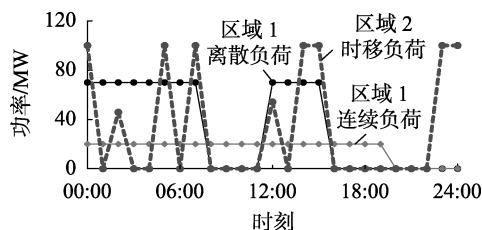


图11 优化后区域1的可调节负荷用电曲线

Fig.11 Adjustable load curve of Area 1 after optimization

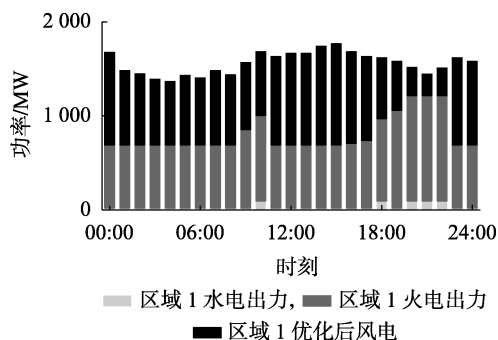


图12 优化后区域1各类型电源的出力情况

Fig.12 Output power of each type of power supply in Area 1 after optimization

区域2优化后的日消纳受阻风电电量为672 MW·h,求解时间为67 ms。由于篇幅限制,区域2的其他优化结果此处不再详细展示。

区域1与区域2进行优化控制后消纳的受阻风电电量总和为1 920 MW·h。

将采用分区多元优化控制方法前、后消纳的受阻风电电量进行对比,分区前的总受阻风电电量为7 463.2 MW·h,分区后区域1、区域2的受阻风电电量分别为3 603.1、1 904.2 MW·h,分区后总受阻风电电量为5 543.3 MW·h,消纳效果明显。分区优化前、后地区电网的风电出力情况对比如图13所示。

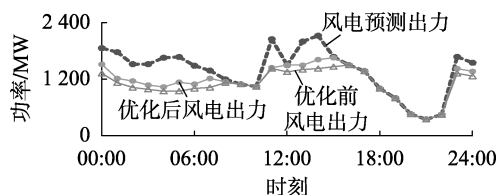


图13 优化前、后地区电网风电出力曲线对比

Fig.13 Comparison of wind power output curve of regional power grid before and after optimization

在计算时间方面,河西地区电网全网的优化求解时间为 360 ms,2 个区域的分区优化求解时间分别为 93、67 ms,可知对系统进行分区可显著降低模型及求解中变量及约束的数量,从而减少求解时间。

仿真结果证明了本文所提分区多元优化控制方法的有效性。

5 结论

本文在分析风电受阻主要因素的基础上,提出以集群风电的送出断面划分控制区域,综合考虑各区域内负荷的调节特性及各类型电源的调峰特性,以风电受阻电量最小为目标的分区多元优化控制方法。以甘肃河西地区电网为例,验证了分区多元优化控制方法的有效性,所得结论如下:

(1) 针对高比例风电接入电网由于下调峰能力不足造成风电受阻的问题,分析了风电受阻的主要因素以及各类电源、可调节负荷的运行及调节特性,提出了以风电送出断面进行分区,区内综合考虑源、荷多元调节特性,以风电受阻电量最小为目标,建立了分区多元优化控制模型并进行求解,形成了火电、水电、风电、可调节负荷等多元优化控制方法;

(2) 所提方法将系统的整体峰谷差分散到各个区域进行消化分解,在区域内调动电源、负荷的调节能力以提高区域内的调峰能力,进而提升系统整体的风电消纳能力,同时分区优化控制方法降低了优化模型变量的维数,减少了求解时间;

(3) 以甘肃河西地区电网的实际运行数据进行仿真计算,结果表明采用本文所提分区多元优化控制方法后,可多消纳受阻风电电量 1 920 MW·h,同时降低了优化求解计算时间。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 丁明,楚明娟,毕锐,等.基于序贯蒙特卡洛随机生产模拟的风电接纳能力评价方法及应用[J].电力自动化设备,2016,36(9):67-73.
DING Ming,CHU Mingjuan,BI Rui,et al. Wind power accommodation capability evaluation based on sequential Monte Carlo probabilistic production simulation and its application[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(9):67-73.
- [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 Tiejuan,et al. Wind power penetration capacity considering peak regulation characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(12):13-18,25.
- [3] 陈国平,李明节,许涛,等.关于新能源发展的技术瓶颈研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):20-27.
CHEN Guoping,LI Mingjie,XU Tao,et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(1):20-27.
- [4] 林俐,邹兰青,周鹏,等.规模风电并网条件下火电机组深度调峰的多角度经济性分析[J].电力系统自动化,2017,41(7):21-27.
LIN Li,ZOU Lanqing,ZHOU Peng,et al. Multi-angle economic analysis on deep peak regulation of thermal power units with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(7):21-27.
- [5] 张宏宇,印永华,申洪,等.大规模风电接入后的系统调峰充裕性评估[J].中国电机工程学报,2011,31(22):26-31.
ZHANG Hongyu,YIN Yonghua,SHEN Hong,et al. Peak-load regulating adequacy evaluation associated with large-scale wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(22):26-31.
- [6] 牛林华,龚庆武,黄炳翔,等.大规模风电上网下的风光火电力系统联合优化调度[J].电力自动化设备,2015,35(11):52-58.
NIU Linhua,GONG Qingwu,HUANG Bingxiang,et al. Optimal dispatch of wind-gas-coal power generation system with large-scale wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(11):52-58.
- [7] 甘伟,艾小猛,方家琨,等.风-火-水-储-气联合优化调度策略[J].电工技术学报,2017,32(增刊1):11-20.
GAN Wei,AI Xiaomeng,FANG Jiakun,et al. Coordinated optimal operation of the wind,coal,hydro,gas units with energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(Supplement 1):11-20.
- [8] 刘文颖,文晶,谢昶,等.考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J].中国电机工程学报,2015,35(5):1079-1088.
LIU Wenying,WEN Jing,XIE Chang,et al. Multi-objective optimal method considering wind power accommodation based on source-load coordination[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(5):1079-1088.
- [9] 施贵荣,孙荣富,徐海翔,等.大规模集群可再生能源有功分层协调控制策略[J].电网技术,2018,42(7):2160-2167.
SHI Guirong,SUN Rongfu,XU Haixiang,et al. Active power stratification coordination control strategy for large-scale cluster of renewable energy[J]. Power System Technology,2018,42(7):2160-2167.
- [10] 戴远航,陈磊,闵勇,等.风电场与含储热的热电联产联合运行的优化调度[J].中国电机工程学报,2017,37(12):3470-3479,3675.
DAI Yuanhang,CHEN Lei,MIN Yong,et al. Optimal dispatch for joint operation of wind farm and combined heat and power plant with thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(12):3470-3479,3675.
- [11] 吴雄,王秀丽,李骏,等.考虑风电外送的省级系统调峰分析模型[J].电网技术,2013,37(6):1578-1583.
WU Xiong,WANG Xiuli,LI Jun,et al. A model to analyze peak load regulation of provincial power system considering sending-out of wind power[J]. Power System Technology,2013,37(6):1578-1583.
- [12] 李茜,刘天琪,李兴源.大规模风电接入的电力系统优化调度新方法[J].电网技术,2013,37(3):733-739.
LI Qian,LIU Tianqi,LI Xingyuan. A new optimized dispatch method for power grid connected with large-scale wind farms[J]. Power System Technology,2013,37(3):733-739.
- [13] 王芝茗,苏安龙,鲁顺.基于电力平衡的辽宁电网接纳风电能力分析[J].电力系统自动化,2010,34(3):86-90.
WANG Zhiming,SU Anlong,LU Shun. Analysis on capacity of wind power integrated into Liaoning power grid based on power balance[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(3):86-90.

- [14] 龙军,莫群芳,曾建. 基于随机规划的含风电场的电力系统节能优化调度策略[J]. 电网技术,2011,35(9):133-138.
LONG Jun,MO Qunfang,ZENG Jian. A stochastic programming based short-term optimization scheduling strategy considering energy conservation for power system containing wind farms[J]. Power System Technology,2011,35(9):133-138.
- [15] 吴慧军,申建建,程春田,等. 网省两级调度多电源短期联合调峰方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(11):2743-2755.
WU Huijun,SHEN Jianjian,CHENG Chuntian,et al. Coordination method of regional and provincial grids for short-term peak shaving operation among hybrid energy sources[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(11):2743-2755.
- [16] 李文武,郑俊,吴稀西,等. 考虑振动区的水电机组组合优化研究[J]. 水电能源科学,2012,30(9):122-124,216.

LI Wenwu,ZHENG Jun,WU Xixi,et al. Unit commitment of hydro-power station considering vibration zone[J]. Water Resources and Power,2012,30(9):122-124,216.

作者简介:



吕良

吕良(1996—),女,安徽阜阳人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统调度(E-mail:lsberry1@163.com);

刘文颖(1955—),女,北京人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统分析、运行与控制(E-mail:liuwenyingls@sina.com)。

Multi-element optimization control method of power grid partition integrated with wind power cluster

LÜ Liang¹, LIU Wenying¹, ZHANG Linjian², WANG Ningbo³, BAI Runqing⁴

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Beijing Electric Power Company Urban Power Supply Bureau, Beijing 100031, China; 3. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China; 4. Electric Power Research Institute of State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China)

Abstract: With the large scale and high proportion of wind power connected to power grid, the establishment of multi-element control mode in the power system with wind power cluster is an effective way to improve the peak adjustment ability and alleviate the plight of wind power consumption. On the basis of analyzing the main factors of wind power blocking, the control area is divided based on the sending cross section of the cluster wind power. Comprehensively considering the load regulation characteristics and the peak regulating characteristics of various types of power supplies, the multi-element optimization control model of power grid partition is established and solved with the minimum blocked wind power as its objective, based on which, the optimization control method of thermal power, hydropower, wind power and adjustable load is formed. Taking a regional power grid as the example, the effectiveness of the proposed method is verified.

Key words: high proportion wind power; accommodation of renewable energy sources; coordinated control; multi-element optimization; zonal control

附 录

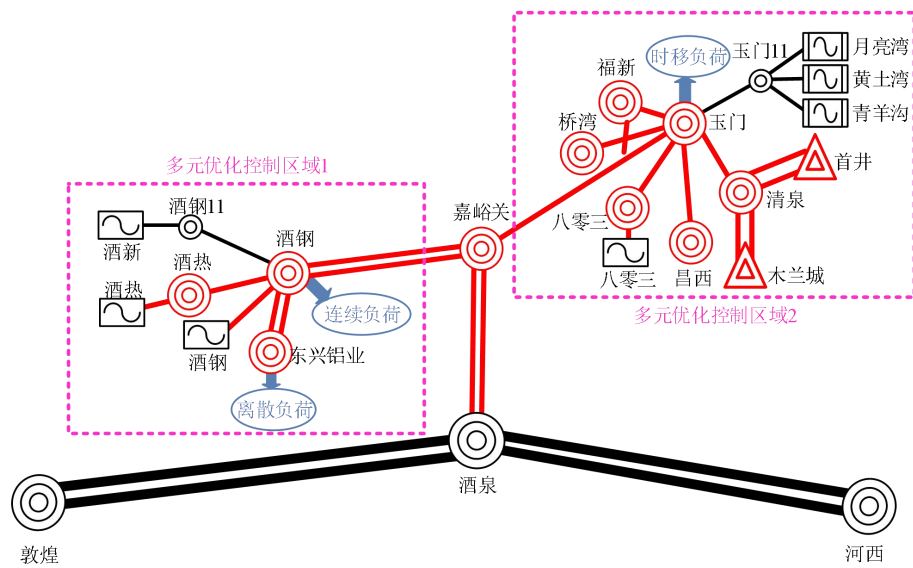


图 A1 甘肃省河西地区电网接线示意图

Fig.A1 Schematic diagram of Hexi area power grid connection in Gansu Province