·电网技术·

考虑时空互补特性的风光水火多能源基地联合优化调度

夏新华[1]，高宗和[2]，李恒强[3]，徐　帆[2]，王　刚[2]
（1. 国网浙江省电力公司经济技术研究院，浙江 杭州 310008；2. 南瑞集团（国网电力科学研究院），江苏 南京 211106；3. 国网四川省电力公司检修公司，四川 成都 610041）

摘　要：为促进风能、光能等新能源发电的消纳，实现风光水火多能源基地联合优化调度的调峰效益、经济效益以及环保效益的最大化，本文在分析风、光、水、火多能源介质时空特性的基础上，提出了一种以最小化火电机组运行成本、弃风量、弃光量、弃水量为优化目标的考虑风光水火时空互补特性的多能源基地联合优化调度模型，为特高压输电背景下送端多能源基地联合优化调度问题提供了一种参考方案。文中算例以时空差异特征显著的新疆地区和东部某区域的多能源基地为研究对象，通过实际算例的计算分析，验证了文中模型理论上能够促进新能源发电的消纳，降低火电机组的运行成本。

关键词：多能源基地；时空互补特性；新能源消纳；联合调度；混合整数规划
中图分类号：TM734　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2096-3203(2017)05-0059-07

0　引言

风能、太阳能、水能等清洁能源是当前世界上最具大规模商业化开发潜力的可再生能源。大规模开发利用风能、太阳能以及水力发电已经成为世界各国改善能源结构，解决能源和环境问题，保证国民经济可持续发展的有效措施之一。近年来，随着能源危机和环境污染问题的日益严重，风力发电、太阳能发电等清洁能源发电得到了大力的发展。但是风/光能等清洁能源不仅在时间分布上波动性大、季节特征明显，而且在空间分布上，同样呈现出分布不平衡的特点。因此这类电源的并网发电具有不可控性，会对电网的安全稳定运行产生冲击[1,2]。

为解决具有随机、间歇特性的新能源发电并网对电网运行产生的影响，文献[2]通过提高风光预测的精确性、发展储能技术以及利用不同能源形式之间的互补特性，合理配置风/光发电与常规能发电的容量比例来应对新能源发电的不可控特点。文献[3]提出以光伏发电系统为基本电源，风力发电系统为补充电源的思想，给出了风光互补发电系统的整体模型，为各个子系统的协调和功率补偿提供了良好的思路。文献[4]利用太阳能和风能的互补性，有效减少系统输出功率周期频谱分量的幅值。文献[5]通过分析巴西陆上/近海水力资源和风力资源的时间地域特性，研究不同区域风风、水水、风水的相关性和互补性，讨论了巴西陆上水力、风力资源以及近海的风力资源之间的互补发电方式。文献[6]在“风光水”微电网结构的基础上，选取冬季典型日进行仿真研究。文献[7]以最优潮流为理论指导，针对含风电、太阳能发电等新能源发电的电力系统调度，考虑不同电源出力特点，建立包含风、光、水、火电系统的多电源联合优化调度模型。文献[8]对塔城地区和新疆阿勒泰地区风、光、水、火出力特性进行分析，找出各电源出力特性规律，为有效提高区域电网清洁能源的消纳能力，实现风光水火电力优化提供有效依据。

综上所述，虽然风电、太阳能发电、水电、火电等发电方式在时间和空间上存在很大差异，但同时也具有互补的特点。通过分析风、光、水、火等不同能源基地输出功率在不同区域、不同时间周期内的波动特点，掌握区域电网多基地输出功率在各时间尺度下的波动规律，整合多种能源基地在不同地域范围、不同时间周期内的互补特性，研究风、光、水、火等多基地运行控制方式，建立涵盖风、光、水、火多种能源形式机组的时空互补模型，能够有效解决资源互补、时空关联的矛盾；实现多种资源的互补协同利用；增加可再生能源发电的投入，减少火电投入比重，一定程度上缓解日益加重的能源危机和环境污染问题。因此，如何在节能环保以及满足不断上升的负荷需求的前提下，制定合理的风、光、水、火等多能源形式的联合调度策略，适当增大风电和太阳能发电量，降低火电输出功率，借助水电的调节能力保证电力系统的功率平衡是电网发展亟需解决的问题。

收稿日期：2017-04-09；修回日期：2017-05-28
基金项目：国家电网公司科技项目（考虑多基地和直流外送的新能源消纳调度决策分析和评价方法研究及应用）

1 风光水火时空互补特性分析

风力发电受自然条件的影响,功率输出具有间歇性、随机波动性等特点。在空间上表现为分布不平衡,我国风能资源丰富的地区主要分布在“三北”(华北、东北、西北)地区、东部沿海及附近岛屿,背离我国主要负荷中心区域。三北地区的新能源发电在空间上与我国主要负荷中心区域形成互补。时间上,风力资源在不同的时间尺度下,其随机波动性不同:分钟级时间尺度大幅波动概率较小,而小时级以上时间尺度则具有较大的波动性,且夜间风力常大于白天风力;此外,风电出力特性具有明显的季节特性,总体呈现为冬春季大,秋季次之,夏季最小的特征[9,10]。

我国太阳能资源的可用量十分丰富,陆地表面每年接收的太阳能辐射约为 1.47×10^8 亿千瓦时,相当于 4.9 万亿吨标准煤。我国太阳能空间分布为:太阳能辐射西部地区总体高于东部地区,北部地区高于南部地区。时间上,太阳能发电只能在白天进行,这与风力夜大昼小的自然特性具有很好的时间互补性;而且,由于时差因素,新疆的太阳能发电与我国中东部地区的太阳能发电在时间上具有很好的空间互补性,随着特高压直流外送的运行,这种互补性能够得到更好的利用[11,12]。

我国水力资源蕴藏量丰富,约占世界水资源总量的六分之一,具有良好的开发前景。不过,由于我国的季风气候特点,我国水力资源在时间和空间分布上极不均匀。在时间分布上,大多河流径流分布不均,丰、枯季节流量相差较大,呈现为夏秋季多、冬春季少的特点,这与风电冬春季大、夏秋季小的自然特性在时间上具有很好的互补特性。考虑风电、水电等清洁能源的时间互补特性,合理规划各季度的电力调度计划,有助于清洁能源的合理利用,提高清洁能源发电在全网中所占比例。在空间分布上,京广铁路以西的水力资源占全国的 90%以上,其中西南地区最多,占全国的 70%;其次为中南和西北地区,分别占 10%及 13%左右;华北、东北和华东地区所占比例很小。西南等地区丰富的水力资源与华东、华北等大负荷中心地区在空间上具有互补性,借助特高压交直流输电技术能够实现大区域间的电力输送,促进清洁能源发电的消纳。2010 年投运的向家坝—上海±800 kV 特高压直流输电工程,年输送清洁电能 320 亿 kW·h,最大输送功率约占上海高峰负荷的三分之一,可节省原煤 1500 万 t,减排二氧化碳超过 3000 万 t,具有显著的经济效益和环境效益。

当前,火电机组依然是我国电力供应的主力。火力发电具有不受季节、气候影响,发电可控性高,发电稳定等优点,不过由于大多机组为燃煤机组,存在能耗量多、污染大的问题。我国火电机组在总电力供应中所占比重大,承担着基荷、调频、调峰及备用任务。为使火电机组经济运行,在电网调度中,通常希望火电承担基本负荷,同时减少调频和调峰任务[7]。总体来说,火电属于稳定电源,对考虑时空互补特征的风光水等清洁能源发电调度起到支撑作用,能够平抑新能源发电的随机波动性对电网的冲击,保障电力的安全供应和电力系统的稳定运行。

2 风光水火联合优化调度模型

风光水火联合优化调度是一个多目标、多变量、多约束的非线性混合整数规划问题,对于大规模系统,其求解非常困难。鉴于此,文中对非线性条件进行线性化,在分析风光水火各能源形式的时空特性基础上,考虑系统的负荷平衡约束及风光水火各发电机组运行的相关约束,建立以最小化火电机组运行成本、弃风量、弃光量、弃水量为优化目标的考虑时空互补特性的联合优化调度模型,以期利用风、光、水、火不同能源形式之间的时空互补差异,提高风能、光能等可再生能源的发电量,减少联合区域火电机组的运行成本。需要特别指出的是,该模型中对最小化弃风量、弃光量、弃水量的处理,是以最小化能源基地发电能力预测值与考虑系统消纳能力后的各能源基地发电计划值之间的偏差的方式表述在目标函数中。偏差越小,表示该能源基地实际发电与预测值越接近,清洁能源的弃量越小。

2.1 目标函数

考虑联合区域风、光、水、火多能源形式的时空互补特性的联合优化调度模型优化目标数学表示为:

$$\min z = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}[c_i^{\mathrm{p}}(t) + C_{\mathrm{u},i}y_i^t] + \sum_{t=1}^{T}\sum_{k=w,s,h}^{K}\xi_k(P_{k,\mathrm{f}}^t - P_k^t) \tag{1}$$

式中,第一项为火电机组的运行成本,$c_i^{\mathrm{p}}(t)$ 为机组 i 在 t 时段运行的燃料成本;$C_{\mathrm{u},i}$ 为机组 i 的开机成本;y_i^t 为由二进制表示的机组开机状态变量,机组 i 在 t 时段开机,则 $y_i^t=1$,否则 $y_i^t=0$。第二项是风、光、水的弃量,w,s,h 分别为风电基地、光伏基地、水电厂

的编号;ξ_k 分别为风、光、水弃量的惩罚系数;$P_{k,\mathrm{f}}^t$ 为 t 时段发电单位 k 的发电预测值;P_k^t 为 t 时段发电单位 k 日前调度计划发电量。

需要特别说明的是,火电机组的运行成本是一个凸性的非线性二次函数[13]:

$$c_i^{\mathrm{p}}(t) = a_i u_i^t + b_i p_i^t + c_i (p_i^t)^2 \tag{2}$$

式中,a_i,b_i,c_i 分别为机组 i 二次燃料成本函数的系数;u_i^t 为二进制变量,表示机组 i 在 t 时段的运行状态,表示机组处于运行状态,$u_i^t=0$ 则表示机组处于停机状态。为加快收敛,建模过程中常对其进行分段线性化处理[14]。

2.2 约束条件分析

模型的约束条件包括系统运行功率平衡相关约束、火电机组运行相关约束、水电机组运行相关约束、风电机组运行相关约束、光伏发电运行相关约束以及对火电机组耗能特性进行分段线性化而产生的相关定义约束等。

2.2.1 系统平衡相关约束

(1) 系统负荷平衡约束。为保证电力系统安全运行,首先需要保证系统运行的负荷平衡约束:

$$\sum_{i=1}^{N} p_{i,t} + \sum_{k=w,s,h}^{K} P_k^t = D_t \tag{3}$$

式中,$p_{i,t}$ 为 t 时段火电机组 i 的出力值;D_t 为 t 时段系统的基本负荷需求。

(2) 旋转备用约束。在保证系统负荷平衡的基础上,为尽量减弱负荷波动性和风/光电随机波动性对负荷平衡的影响,要求运行机组具有一定的旋转备用约束:

$$\sum_{i=1}^{N} (\bar{p}_i - p_i^t) u_i^t + \sum_{h=1}^{H} (P_h^{\max} - P_{h,t}) \geqslant R_t \tag{4}$$

式中,$\bar{p}_i$ 为机组 i 的最大出力;$P_h^{\max}$ 为水电机组 h 的最大出力;R_t 为 t 时段的旋转备用需求量。

2.2.2 火电机组运行相关约束

(1) 火电机组出力约束。火电机组的运行需要满足机组的出力上下限限制:

$$u_i^t \underline{p}_i \leqslant p_i^t \leqslant u_i^t \bar{p}_i \tag{5}$$

式中,$\underline{p}_i$ 是机组 i 的最小出力。

(2) 火电机组爬坡约束。相邻调度时段内,机组出力的变化量具有一定的范围约束,这与火电机组的物理性能有关,需要满足:

$$p_i^t - p_i^{t-1} \leqslant u_i^{t-1} Ru_i + y_i^t SU_i \tag{6}$$

$$p_i^{t-1} - p_i^t \leqslant u_i^t Rd_i + z_i^t SD_i \tag{7}$$

式中,Ru_i,Rd_i 分别为机组 i 功率变化的爬坡限制和滑坡限制;SU_i,SD_i 分别为机组 i 开机时最大出力变化量和停机时最大出力变化量;z_i^t 为机组 i 停机时刻的二进制状态变量,机组 i 在 t 时段停机,则 $z_i^t=1$,否则 $z_i^t=0$。

(3) 火电机组最小启、停时间约束。

$$y_i^t + \sum_{k=t+1}^{t+UT_i-1} z_i^t \leqslant 1 \tag{8}$$

$$z_i^t + \sum_{k=t+1}^{t+DT_i-1} y_i^t \leqslant 1 \tag{9}$$

式中:UT_i,DT_i 为最小启、停时间。约束(8)是机组最小开机时间约束,保证了机组 i 一旦在 t 时段开机,即 $y_i^t=1$,则机组在 $t+1$ 到这 $t+UT_i-1$ 这段时间内,机组不能关机;约束(9)是最小停机时间约束,同样确保机组一旦关机 $z_i^t=1$,在 $t+1$ 到这 $t+DT_i-1$ 这段时间内,机组不能再开机。此外,最小启、停时间约束应该考虑机组的初始状态,这更符合实际工程中的要求[14]。

2.2.3 水电机组运行约束

为方便讨论,将水电站多台机组等效为一台,那么水电站需要满足如下约束[15]。

(1) 水电机组出力约束。水电机组的运行需要满足机组的出力上下限限制:

$$P_h^{\min} \leqslant P_h^t \leqslant P_h^{\max} \tag{10}$$

式中,$P_h^{\min}$ 表示水电站的最小出力。

(2) 水-电转换能力约束。

$$P_h^t = A\xi_h Q_h^t h_h^t \tag{11}$$

式中,A 为水-电能量转换常数,常取 9.81;ξ_h 为水电站的转换效率;Q_h^t 为水电站在 t 时段的流量,为一平均值;h_h^t 为水电站在 t 时段上游的水头。

(3) 日流量限制约束。为保证上下游的水流安全,水电站的发电用水量需要在上级用水调度部门的安排下进行,需要满足日流量限制约束:

$$Q_h^{\min} \leqslant \sum_{t=1}^{T} Q_h^t \leqslant Q_h^{\max} \tag{12}$$

式中,$Q_h^{\min}$,$Q_h^{\max}$ 分别为水电站的日发电用水量上下限值。

2.2.4 风电机组运行约束

$$0 \leqslant P_w^t \leqslant \zeta_w^t \bar{p}_w \tag{13}$$

式中,$\bar{p}_w$ 为正常运行的风电基地 w 装机容量;ζ_w^t 为 t 时段风电基地 w 的风能利用系数。

2.2.5 光伏发电运行约束

$$0 \leqslant P_s^t \leqslant \zeta_s^t \bar{p}_s \tag{14}$$

式中,$\bar{p}_s$ 为正常运行的光伏基地 s 装机容量;ζ_s^t 为 t 时段光伏基地 s 的太阳能利用系数。

2.2.6 其他约束

在模型中,为方便求解并加快其收敛,常将火电机组非线性的耗能特性曲线线性化,如图 1 所示。

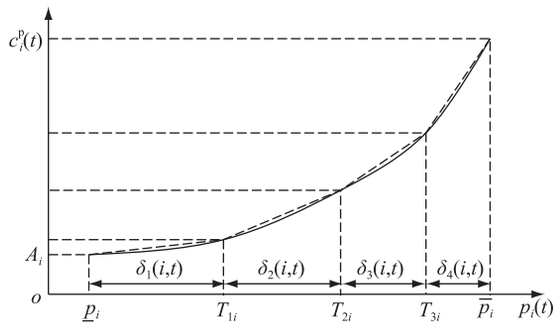

图 1　火电机组燃料成本曲线分段线性化

Fig.1　Piecewise linear fuel cost curve of thermal units

在模型中对火电机组非线性燃料成本函数进行分段线性化，可以通过以下几个定义约束进行表述：

$$c_i^p(t) = A_i u_i^t + \sum_{l=1}^{L_i} F_{l,i}\delta_l(i,t) \tag{17}$$

$$p_i(t) = \sum_{l=1}^{L_i} \delta_l(i,t) + \underline{p}_i u_i^t \tag{18}$$

$$\delta_1(i,t) \leqslant T_{1,i} - \underline{p}_i \tag{19}$$

$$\delta_l(i,t) \leqslant T_{l,i} - T_{l-1,i} \tag{20}$$

$$\delta_{L_i}(i,t) \leqslant \bar{p}_i - T_{L_i-1,i} \tag{21}$$

$$\delta_l(i,t) \geqslant 0 \tag{22}$$

其中，$A_i = a_i + b_i \underline{p}_i + c_i \underline{p}_i^2$；$F_{l,i}$为分段线性化曲线中机组 i 在 l 段的微增成本；$\delta_l(i,t)$为机组 i 在 t 时段分段成本函数 l 段的出力；$T_{l,i}$为机组 i 在 l 段的上限；L_i 为分段线性化的分段数。

3　算例分析

3.1　CPLEX 求解器

文中所建的混合整数线性规划模型（MILP）采用 CPLEX 求解器进行求解。CPLEX 求解器是由 IBM 领先开发的，基于分支切割法，能够解决带有成千上万个变量和约束的问题，具有求解实际应用中大规模优化问题的能力，可用于求解线性规划（LP）、混合整数规划（MIP）、二次约束规划（QP）以及混合整数二次约束规划（MIQP）等问题[16,17]。

3.2　模型参数

以包含风电、光伏、水电、火电等多电源形式的 A，B 两区域电网为例。设置两区域均有 10 台火电机组，机组参数参见文献[18]中的 IEEE 标准 10 机测试系统；A 区域水电站机组相关参数参考文献[14]中情景 2 的数据，该情境下，水库有丰富的可调度水量，机组具有一定的调节能力，可以不满发；A 区域配以装机容量为 1000 MW 的风电基地和 600 MW 的光伏基地，B 区域配以 1500 MW 的风电基地和 1000 MW 的光伏基地。模型调度时长采用传统的 24 h 日调度。以夏季某典型日数据为例，两区域的负荷需求曲线如图 2 所示；两区域风能利用系数和太阳能利用系数分别如图 3、图 4 所示。

由 A，B 两区的风能、太阳能利用系数预测值可以看出，B 区域的太阳能利用时间相对 A 区域有一定的滞后性；若联合考虑 A，B 两区域的风能利用系数，能够降低并网风电量的随机波动性，降低风电的随机波动性对电网的冲击。

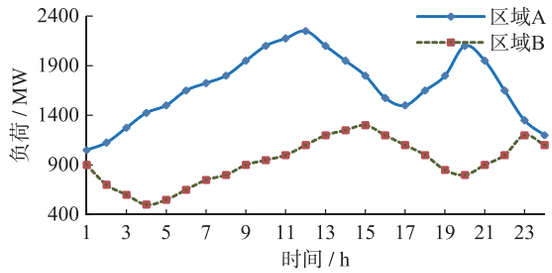

图 2　某典型日各时段的负荷需求曲线

Fig.2　The curve of load demand at each time

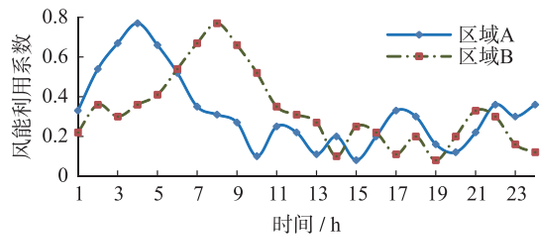

图 3　某典型日风能利用系数

Fig.3　The utilization coefficient of wind power at a typical day

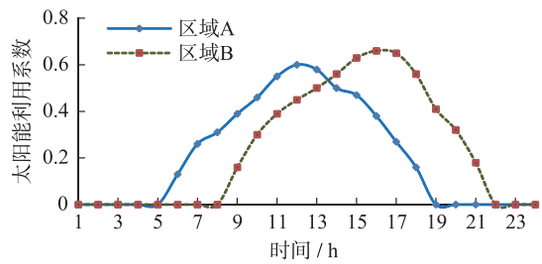

图 4　某典型日太阳能利用系数

Fig.4　The utilization coefficient of solar power at a typical day

基于两区域风力发电和光伏发电所具有的时空互补特性，模型分别考虑 2 种情景下风电和光伏的发电量，以验证考虑时空互补特性的风光水火多能源基地能够促进风、光等新能源发电消纳的特点。其中情景 1 为不考虑时空互补特性情况下 A，B 两区域的调度情况；情景 2 为考虑时空互补特性情况下 A，B 两区域的调度情况。

3.3　优化结果分析

根据风、光、水、火各机组相关参数及区域负荷预测值，在情景 1 和情景 2 下，应用文中所提的风光

水火联合优化调度模型,并采用 CPLEX 求解器对两种情景模式下混合整数线性规划模型(MILP)进行求解。

由求解结果可知,考虑时空互补特性的风光水火多能源基地联合优化调度能够增加风电和光伏发电的消纳量,减少弃风量和弃光量。考虑时空互补特性前后,A,B 两区域的风电基地出力情况分别如图 5、图 6 所示。

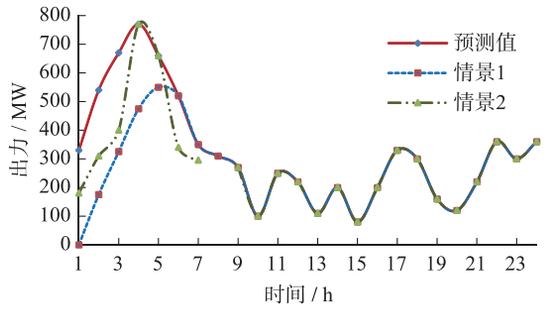

图 5 考虑时空互补特性前后 A 区域风电出力情况

Fig.5 The power output of A region before and after considering the time-space complementary characteristics

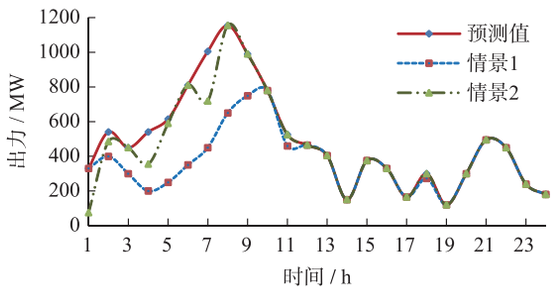

图 6 考虑时空互补特性前后 B 区域风电出力情况

Fig.6 The power output of B region before and after considering the time-space complementary characteristics

情景 1 不考虑时空互补特性情况下,A 区域弃风量 1445 MW,B 区域弃风量 2848 MW;情景 2 考虑时空互补特性情况下,A 区域弃风量 1195 MW,弃风量相对减少 17.3%;B 区域弃风量 1680 MW,相对减少了 41%。此外,情景 1 下,A 区域无弃光,B 区域弃光量 440 MW;情景 2 下,A 区域无弃光,B 区域亦无弃光;相对于情景 1 不考虑时空互补特性,光伏发电量增加了 440 MW。由此可见,考虑时空互补特性的风光水火联合优化调度模型能够显著的提高风、光等新能源电力的消纳量。

并且由图 7,图 8 可以看出,情景 2 考虑时空互补特性后,火电机组的出力曲线相对情景 1 更加平稳,平缓了火电机组的出力波动;此外,在一定时间尺度范围内,情景 2 中的风电出力较情景 1 更加平缓,说明考虑时空互补特性后,联合优化调度模型能够利用两区域风能时空互补差异,综合调度,平缓风功率随机波动性对电网的冲击,提高供电可靠性。

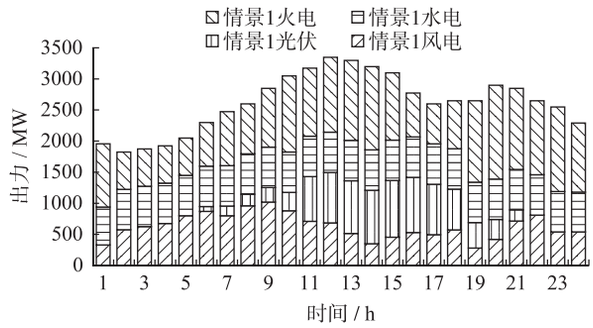

图 7 情景 1 风光水火电出力

Fig.7 Outputs of wind-solar-hydro-thermal power in case 1

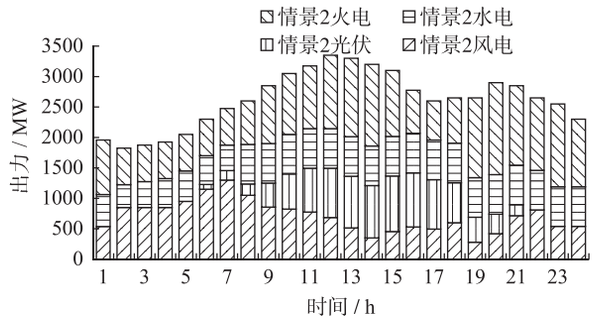

图 8 情景 2 风光水火电出力

Fig.8 Outputs of wind-solar-hydro-thermal power in case 2

同时,考虑时空互补特性的多能源基地联合优化调度,降低了火电机组的运行费用。情景 1 下,为满足负荷需求及备用需求,A 区域火电机组运行费用为 338 535 元,B 区域运行费用为 186 594 元,两区域总运行费用 525 129 元;情景 2 下,同样在保证负荷需求和备用需求的情况下,两区域火电机组总运行费用为 466 743 元,相对减少 11.12%,如果将这部分减少的费用,折合到火电机组燃烧的标准煤以及释放的 SO_2、CO_2等气体,那么采用情景 2 考虑时空互补特性的多能源基地联合优化调度方式则具有可观的经济效益和环境效益。

综上分析可知,考虑时空互补特性的风光水火多能源基地联合优化调度,可以利用不同区域、不同时区之间的风、光能的自然差异,平抑风、光能发电的随机波动性对电网的冲击,减少联合区域火电机组的运行成本,具有良好的经济效益和环境效益。

4 结语

本文在分析风、光、水、火各种能源介质形式时空互补特性的基础上,提出了考虑多能源基地的联

合优化调度混合整数线性规划模型(MILP)。通过对算例的求解分析,验证了该模型在保证系统负荷和备用需求的情况下,不仅能够减少联合区域的风、光能的弃量,增加其发电量,减少火电机组的运行成本;而且能够利用风、光能的时空互补差异,平缓联合区域风光能发电的波动性,减缓风电,光电的随机波动性对电网的冲击,对提高电网安全稳定运行具有重要意义。

参考文献:

[1] 秦旭东. 大规模风电接入江苏电网调频影响与对策研究[J]. 江苏电机工程,2013,32(4):6-9.
QIN Xudong. Influence and strategy study the frequency regulation of Jiangsu power grid with large-scale wind power integration[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2013,32(4):6-9.

[2] WOYTE A,VAN V,BELMANS R,et al. Voltage fluctuations on distribution level introduced by photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2006,21(1):202-209.

[3] NIKOLAOS S T,FRANCISCO J S,SANTOS A,et al. Optimal management of wind and solar energy resources[J]. Computers & Operations Research,2016, 66(66):284-291.

[4] 李劲彬,陈 隽. 风光互补可再生能源发电的综合效益优化研究[J]. 电气自动化,2013,35(5):24-26.
LI Jinbin,CHENG Jun. Research on the optimization of comprehensive benefits of wind-solar hybrid renewable generation system[J]. Electrical Automation,2013,35(5):24-26.

[5] ALLAN R S, FELIPE M P, ARCILAN T A, et al. Complementarity of Brazil's hydro and off shore wind power[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 56(12): 413-427.

[6] 余志勇,万术来,明志勇,等. "风光水"互补微电网的运行优化[J]. 电力建设,2014,35(6):50-56.
YU Zhiyong, WAN Shulai, MING Zhiyong, et al. Optimal operation of complementary microgrid with hybrid wind solar hydro power[J]. Electric Power Construction,2014,35(6):50-56.

[7] 张婷雨. 风光水火短期联合调度的动态模型建立及算法研究[D].西安:西安理工大学,2015.
ZHANG Tingyu. Study on model and method for dynamic optimal power flow of wind-photovoltaic-hydro-thermal power joint operation[D].Xi'an:Xi'an University of Technology,2015.

[8] 周 专,常喜强,吕 盼,等. 新疆阿勒泰地区可再生能源发电的出力特性分析[J]. 电力与能源,2014,35(2):218-223.
ZHOU Zhuan,CHANG Xiqiang,LYU Pan,et al. Analysis of renewable energy output characteristics of Altay region [J]. Energy Technology,2014,35(2):218-223.

[9] 肖创英,汪宁渤,陆 晶,等. 甘肃酒泉风电出力特性分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(17):64-67.
XIAO Chuangying,WANG Ningbo,LU Jing,et al. Power characteristics of Jiuquan wind power base [J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(17):64-67.

[10] 于大洋,韩学山,梁 军,等. 基于 NASA 地球观测数据库的区域风电功率波动特性分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(5):77-81.
YU Dayang,HAN Xueshan,LIANG Jun,et al. Study on the profiling of China's regional wind power fluctuation using GEOS-5 data assimilation system of National Aeronautics and Space Administration of America[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(5):77-81.

[11] MARK Z J,MARK A D,GUILLAUME B,et al. A 100% wind, water, sunlight(WWS) all-sector energy plan for Washington State[J]. Renewable Energy,2016,86:75-88.

[12] 刘振亚.特高压交直流电网[M].北京:中国电力出版社,2013.
LIU Zhenya. Ultra high voltage AC-DC grid[M]. Beijing: China Electric Power Press,2013.

[13] LYU J K,KIM M K,YOON Y T,et al. A new approach to security-constrained generation scheduling of large-scale power systems with a piecewise linear ramping model[J]. Electrical Power and Energy Systems,2012,34(1):121-131.

[14] 夏新华,高宗和,徐 帆,等. 改进的混合整数算法求解机组组合问题[J]. 电力学报,2016,31(3):202-210.
XIA Xinhua, GAO Zonghe, XU Fan, et al. Unit commitment using an improved mixed integer programming[J]. Journal of Electric Power,2016,31(3):202-210.

[15] 王开艳,罗先觉,吴 玲,等. 清洁能源优先的风-水-火电力系统联合优化调度[J]. 中国电机工程学报,2013,33(13):27-36.
WANG Kaiyan, LUO Xianjue, WU Ling, et al. Optimal dispatch of wind-hydro-thermal power system with priority given to clean energy[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(13):27-36.

[16] The ILOG CPLEX Website.CPLEX optimizer[EB/OL].http://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer/index.html,[2016-07-20]:

[17] FRANGIONI A,GENTILE C. Tighter approximated MILP formulations for unit commitment problems [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2009,24(1):105-113.

[18] GOVARDHAN M,ROY R. Economic analysis of unit commitment with distributed energy resources [J]. International Journal of Electrical Power and Energy System, 2015, 71: 1-14.

作者简介:

夏新华

夏新华(1991—),男,河南信阳人,工程师,从事电力系统运行与优化研究工作(E-mail:120348863@qq.com);

高宗和(1962—),男,江苏南京人,研究员级高级工程师,从事电力系统调度自动化研究工作;

李恒强(1992—),男,甘肃定西人,工程师,从事电力需求侧管理研究工作;

徐 帆(1984—),男,河北廊坊人,高级工程师,从事电力系统运行与优化工作;

王 刚(1992—),男,江苏淮安人,工程师,从事电力系统及其自动化工作。

Combined Optimization Dispatching of Multi-source Hybrid Power Bases Considering the Time-space Complementary Characteristics

XIA Xinhua[1], GAO Zonghe[2], LI Hengqiang[3], XU Fan[2], WANG Gang[2]

(1. Power Economic Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310008, China;
2.NARI Group Corporation, Nanjing 211106, China;
3. State Grid Sichuan Province Power Company Maintenance Branch, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to promote the power generation absorption of new energy like wind/light energy, and realize the maximization of pitch peak benefit, economic benefit and environmental protection benefit of combined optimization dispatching of multi-source hybrid power bases, based on the analysis of time-space characteristics of multi-source hybrid power, we put forward a combined optimization dispatching model of multi-source hybrid power that takes the minimum of operating cost, wind curtailment volume, light curtailment volume and water curtailment volume of thermal power unit as the optimization goal, and provide a reference method for the sending system combined optimization dispatching of multi-source hybrid power bases under the background of ultra-high voltage power transmission. The example takes multi-source hybrid power bases in the Xinjiang region and in the eastern part of a region as study abject, which have significant temporal and spatial differences. Through the calculation and analysis of practical examples, the model is verified theoretically can promote the absorption of new energy and reduce the operation cost of thermal power units.

Key words: multi-source hybrid power bases; time-space complementary characteristics; renewable integration; combined dispatching; mixed-integer programming

(编辑 方 晶)

(上接第 34 页)

Cooperative Game-based Energy Consumption Technology Considering Household Distributed Generators

CHEN Bin

(Electric Power Research Institute, Fujian Electric Power Company Limited, Fuzhou 350007, China)

Abstract: In smart grid, residential users who participate in demand side management can schedule household energy consumption appropriately according to the real-time energy price. This paper proposes a kind of energy consumption technology based on cooperative game by considering the participation of household distributed generators. Based on the presented power consumption model, energy cost model, and household load control model, energy consumption among residential users is formulated as a cooperative game; where players are residential users and strategies are their daily consumption schedule. The energy cost of all users is minimized at Nash equilibrium solution. Simulation result shows that users' cost is decreased and further decreased with distributed generators when users participate in energy consumption scheduling with game approach.

Key words: demand side management; cooperative game; energy consumption scheduling; household distributed generators

(编辑 方 晶)