

7DOI: 10.7500/AEPS20130703002

基于时序仿真的风电年度计划制定方法

刘 纯¹, 曹 阳¹, 黄越辉¹, 李 鹏¹, 孙 勇², 袁 越³

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 100192; 2. 国网吉林省电力有限公司, 吉林省长春市 130021;
3. 河海大学能源与电气学院, 江苏省南京市 210098)

摘要: 国内风电发展迅猛,但“三北”地区电力系统调峰能力有限,造成风电“弃风”现象严重。现有风电年度计划方法只能将风电电量预测结果纳入年度计划,与风电运行受阻的实际情况偏差较大,年度计划难以执行。文中提出一种基于时序仿真的风电年度计划方法,综合考虑风电出力特性、负荷特性、机组调峰特性、电网送出能力等因素,逐时段优化全网含风电的电力平衡,建立了用于研究省级电网年度风电计划的优化模型。以某省级电网为例,对比分析了时序仿真法和典型日分析法的风电平衡能力及其节能减排效益,研究了不同开机方式对风电平衡能力的影响。结果表明,采用滚动 3 d 优化风电平衡模型符合电网调度实际情况,计算速度快,且能够提高年度风电上网电量,为年度计划制定提供了参考。

关键词: 风力发电; 时序仿真; 年度计划; 机组组合

0 引言

近年来,中国风电发展迅速。2012 年新增装机容量 13 GW,全国累计风电并网容量已达到 60.8 GW,均居世界第 1 位^[1-2]。风电成为继火电、水电之后中国的第三大电源。

然而,随着风电并网容量持续快速增长,占全网电源的比例不断攀升,大规模风电并网给电网功率平衡、发电计划制定、电网调峰调频带来了很大困难。为了最大限度地提高风电上网电量^[3],必须从年度、月度、日前、日内和实时多个时间尺度合理安排风电发电计划^[4-5]。其中,风电年度计划应以年度风电预测为基础,重构得到风电时间序列,然后根据全网运行方式进行电力平衡优化,最终得到可纳入电力系统运行的计划电量^[6]。通过制定风电年度计划,可以在年度运行方式中预留合理的风电接纳空间,保证年度计划的可执行性,同时可优化系统运行方式和检修安排,提高常规机组运行效益,对于优化风电管理、提高电力系统风电利用率具有重要的指导作用,对区域电网和风电的建设也具有指导性意义。

由于“三北”地区系统调峰能力有限以及受电网送出能力约束的影响,风电“弃风”现象严重,风电实

际上网电量与预测电量会有较大偏差,直接按照年度预测结果安排风电年度计划显然不合理。准确制定风电年度计划需要采用时序电力平衡的方法,考虑年度风电运行特性、系统调峰能力、电网送出能力以及火电机组的开机方式,对全网各时段进行电力平衡分析,优化常规机组和风电运行方式。然而,受到建模复杂性以及计算时间等因素影响,目前风电年度计划的研究较少。现有方法多采用基于典型日的电力平衡方法^[7],该方法是在最严重情况下的风电平衡情况,不能体现每日风电出力特性以及全网应如何优化机组启停和检修安排,如果将其用来指导全年的风电调度方式,计算结果必将过于保守,不利于提高风电实际上网电量。

目前已有大量文献对含风电的电力平衡模型进行了研究^[8-13]。文献[8]基于风电机组出力随机特性的深入分析及其可能被高估和低估的概率计算,构建了含风电场的电力系统静态环境经济调度随机优化模型,并设计了多目标优化求解算法及决策方法,得到一些有益结论。然而,由于未将风力发电可信容量纳入常规机组开机计划,易造成常规机组运行容量过大,导致火电机组负荷率下降,在负荷低谷时期风电被限的可能性增加。文献[9]将风电功率区间预测信息纳入日前计划中,建立了考虑风电不确定性的日前机组组合模型,基于风电功率区间预测的机组组合模型可使每小时提供的备用量分布更加合理。然而,在建立数学模型时,并未考虑火电机组的启停机特性,导致火电机组的运行结果与实际

收稿日期: 2013-07-03; 修回日期: 2014-02-07。

国家科技支撑计划资助项目(2013BAA02B01); 国家电网公司科技项目。

电力系统偏差较大,影响最终的风电平衡能力。文献[10]利用实际火电机组、水电机组、风电出力以及负荷数据,构建了含风电场的电力系统经济环境联合调度模型。但模型中并未考虑“三北”地区供热期供热机组特性,导致计算结果与实际偏差较大,不能为实际电网规划和调度运行提供有效的技术支持。同时,上述文献均是针对日前时间尺度风电优化调度开展的研究,其研究方法和优化模型均无法直接应用于年度风电计划制定。

基于此,本文提出了一种基于时序仿真的风电年度计划方法。采用时序仿真的方法,以年度最大可平衡风电为目标,综合考虑风电出力特性、负荷特性、机组调峰特性、不同种类供热机组热电耦合特性、开机方式和电网送出能力等因素,优化全年运行方式,科学、合理地将风电纳入电网年度运行方式安排^[14]。

1 时序仿真方法和数学模型

1.1 时序仿真方法概述

时序生产模拟对发电系统的运行和决策都起着重要作用,其中短时间尺度的生产模拟时间一般为几小时到几十小时,可以为优化系统运行方式、提高风电平衡能力提供真实的场景模拟,为调度部门提供合理的发电计划;长时间尺度的生产模拟时间可以是数月或数年,可模拟不同的装机规模、电网架构等条件下的年度风电电力平衡情况,为风电年度运行方式、产业发展规划及电网建设规划提供参考依据^[15]。时序仿真法已被国内外广泛用于电力平衡和发电生产计划安排中。然而,由于该方法建模复杂、模型涉及变量众多,长时间尺度仿真计算时间长,限制了其在含风电的电网优化调度中的应用。

由于风电的年、月、日出力变化均较大,为了更好地表征风电出力变化特性,在考虑年度风电电力平衡问题时更加全面,本文采用时序生产模拟仿真方法。根据负荷和风电预测出力序列,模拟各发电机组的运行状况;将系统负荷、风电出力、发电机组出力作为随时间变化的时间序列;系统负荷与机组出力之间的平衡关系作为平衡约束,得到最优风电年度计划指标。

1.2 基于时序仿真的风电电力平衡模型

1.2.1 数学模型概述

风电年度电力平衡主要有以下两个制约因素:
①电网结构约束;②电网调峰能力约束。为充分考虑这两种约束条件,实现尽可能多地接纳风电的目标,为电网新能源发电规划和优化调度运行提供技

术支持,本文建立了一套完备的风电电力平衡数学模型。

中国省级电网覆盖面积大、电网结构复杂,建立详细的电网拓扑结构开展长时间尺度时序生产模拟仿真耗时巨大,难以应用于生产实际,且电力系统实际运行中主要受制于少量断面送出能力。考虑实际电网运行中的制约因素,本文针对电网结构约束,模型中采用了分区的建模思想。综合考虑风电分布情况及电网结构,对电网进行划分。在考虑电网拓扑和面临的运行问题分区原则下,根据实际电网情况确定每个分区的风电装机容量、用电负荷、常规机组情况及各分区间的传输容量限制。将一个省级电网按区域划分为几个小型电网计算的建模思想,不仅能够显著提高模型计算效率,而且能够反映出电网的实际运行情况。

其次,风力发电集中的“三北”地区火电装机比重大,其调峰能力对风电平衡能力产生巨大影响。因此,本文模型重点考虑不同类型火电机组的运行特性,特别是供热机组的建模,而对供热机组的建模也是一般的经济调度数学模型经常忽略的问题。本文模型考虑的火电机组类型包括凝气式机组、背压式机组、抽气式机组。特别注意的是,背压式机组和抽气式机组一般运行在“以热定电”模式下,此类热电联产机组供热期和非供热期的建模对年度风电平衡至关重要,需重点考虑其供热期内的热电耦合特性。

最后,数学模型中还应综合考虑系统平衡约束、电网安全约束、系统备用约束、电量约束等约束条件。实际应用中,可根据实际电网条件对部分约束条件进行取舍。

1.2.2 目标函数

为尽可能平衡更多的风电,基于时序仿真的风电年度电力平衡方法的目标函数如下式所示:

$$\max \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N P_{w,n}(t) \quad (1)$$

式中: N 为系统分区总数; n 表示某一分区; T 为调度时间的总长度; t 为仿真时间步长; $P_{w,n}(t)$ 为分区 n 在时段 t 的风电出力。

1.2.3 约束条件

1) 机组优化功率及总功率约束

$$0 \leq P_j(t) \leq (P_{j,\max}(t) - P_{j,\min}(t)) X_j(t) \quad (2)$$

$$P_{T_j}(t) = P_{j,\min}(t) X_j(t) + P_j(t) \quad (3)$$

式中: j 为机组台数; P_j 为机组 j 参与优化的功率; P_{T_j} 为第 j 台机组总功率; $P_{j,\max}$ 和 $P_{j,\min}$ 分别为机组 j 的出力上限和出力下限; $X_j(t)$ 表示机组 j 在

时段 t 的运行状态,为二进制变量,0 表示机组已停机,1 则表示机组正在运行。

2) 机组优化功率爬坡率约束

$$P_j(t+1) - P_j(t) \leq \Delta P_{j,\text{up}} \quad (4)$$

$$P_j(t) - P_j(t+1) \leq \Delta P_{j,\text{down}} \quad (5)$$

式中: $\Delta P_{j,\text{up}}$ 和 $\Delta P_{j,\text{down}}$ 分别为机组 j 的上爬坡率和下爬坡率。

3) 机组最小启停机时间约束

$$Y_j(t) + Z_j(t+1) + Z_j(t+2) + \dots + Z_j(t+k) \leq 1 \quad (6)$$

$$Z_j(t) + Y_j(t+1) + Y_j(t+2) + \dots + Y_j(t+k) \leq 1 \quad (7)$$

式中: $Y_j(t)$ 和 $Z_j(t)$ 表示机组 j 在时段 t 是否正在启机和停机,均为二进制变量,前者为 0 表示不处于启动过程,为 1 表示正在启动,后者为 0 表示不处于停机过程,为 1 表示正在停机; k 由机组最小启机或停机时间参数决定,其反映了最小启机或停机的时间步长。此约束的考虑,主要是由于受到机组的物理特性及机组能耗和运行成本的制约,机组不能频繁启停。

4) 供热机组供热期出力特性约束

$$P_{j,\text{BY}}(t) = C_{j,\text{b}} H_j(t) \quad (8)$$

$$H_j(t) C_{j,\text{b}} \leq P_{j,\text{CQ}}(t) \leq P_{j,\text{max}} - H_j(t) C_{j,\text{v}} \quad (9)$$

式中: $C_{j,\text{b}}$ 和 $C_{j,\text{v}}$ 为热电比系数; H_j 为热出力; $P_{j,\text{BY}}$ 为背压式机组供热期出力; $P_{j,\text{CQ}}$ 为抽气式机组供热期出力。

背压式机组和抽气式机组的热电耦合特性如图 1 所示。根据此特性,建立供热期内的供热机组出力特性如式(8)、式(9)所示^[16]。

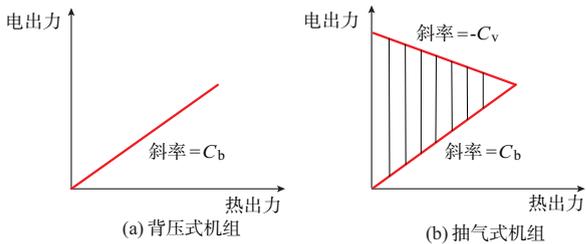


图 1 背压式机组和抽气式机组热电出力关系曲线
Fig.1 Relation curves between heat output and electricity output of back pressure turbine and extraction turbo-generator

5) 区域间线路传输容量约束

$$-L_{i,\text{max}} \leq L_i \leq L_{i,\text{max}} \quad (10)$$

式中: L_i 为第 i 条传输线的输电功率; $L_{i,\text{max}}$ 和 $-L_{i,\text{max}}$ 分别为第 i 条传输线传输容量上下限。设定电流参考方向为流入区域为正方向、流出区域为

负方向,因此, L_i 可以取正负值,其正负代表了功率传输的方向。

6) 分区负荷平衡约束

$$P_{\text{all},n}(t) + P_{w,n}(t) + L_i(t) = P_{l,n}(t) \quad (11)$$

式中: $P_{\text{all},n}(t)$ 为分区 n 在时段 t 的所有常规机组的总功率之和; $P_{l,n}(t)$ 为分区 n 在时段 t 的电力负荷。

7) 系统正/负旋转备用容量约束

$$\begin{cases} -\sum_{j=1}^J P_{j,\text{max}} X_j(t) - C_{\text{pw}}(t) \leq -P_l(t) - R_p \\ \sum_{j=1}^J P_{j,\text{min}} X_j(t) + C_{\text{pw}}(t) \leq P_l(t) - R_N \end{cases} \quad (12)$$

式中: J 为火电机组总台数; R_p 和 R_N 分别为正旋转备用和负旋转备用; $P_l(t)$ 为时段 t 整个系统的负荷; C_{pw} 为风力发电各时段的可信容量。将各时段风力发电可信容量纳入常规机组开机容量计算范畴,减小其开机容量,能够更好地平衡风电出力。

8) 风电出力约束

$$0 \leq P_{w,n}(t) \leq P_{w,n}^*(t) \quad (13)$$

式中: $P_{w,n}^*(t)$ 为风电装机容量一定时的风电理论出力。

综合目标函数(式(1))和约束条件(式(2)至式(13)),得到基于时序仿真的风电年度电力平衡模型。

2 实例计算

本文对中国某省级电网进行了风电年度电力平衡研究。该省风电占总装机容量的 14.6%,火电占 84.2%,风电占最大负荷的 23.7%。其中,年度负荷序列采用负荷预测结果,风电年度预测基于风电电量预测结果,并采用文献[17]中的风电时间序列建模方法获得风电时间序列,仿真时间步长为 1 h,全年共 8 760 个时间断面。

全省负荷日最大峰谷差出现在第 328 日,为 1 322 MW。火电机组的调峰能力为其装机容量的 40%,供热期热电机组出力为其装机容量的 70%~85%。系统备用容量选取网内最大一台火电机组的容量,即为 1 000 MW。该省供热期为每年的 10 月 25 日至次年 4 月 15 日。

由于研究区域内部分风电送出受电网断面输送极限约束,因此,按照电网运行约束分区原则,本文将该省网系统分为区域 1、区域 2、区域 3 这 3 个区域。其中,3 个分区的用电负荷特性见表 1,分别占全网负荷的比例为 96%,3.5%,0.5%;风电场分布情况见表 2,3 个分区的风电装机容量占全网风电装机容量的比例分别为 59.82%,12.81%,27.37%;统

调机组分布情况见附录 A。电网分区示意图如图 2 所示,其中区域 1 到区域 2 和区域 3 的传输容量极限分别为 432 MW 和 216 MW;区域 2 与区域 3 之间没有联络线。

表 1 3 个区域的负荷特性
Table 1 Load characteristics of three regions

区域	最高负荷/MW	最低负荷/MW	占全网比例/%
1	10 960.420	5 184.378	96.0
2	371.377	159.486	3.5
3	65.537	28.145	0.5

表 2 3 个区域的风电装机情况
Table 2 Installed wind energy capacities of three regions

区域	风电装机容量/MW	占全网风电装机容量的比例/%
1	1 612.7	59.82
2	345.2	12.81
3	738.0	27.37

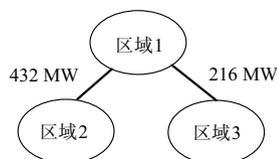


图 2 电网分区示意图
Fig.2 Partition diagram of power grid

本文分别建立了 3 种开机方式的数学模型,具体参数设定如表 3 所示。

表 3 3 种开机方式优化参数设定
Table 3 Tuning parameters of three kinds of startup modes

开机方式	策略名称	每次优化小时数/h	总优化次数	总优化小时数/h
1	年度逐周优化	168	52	8 736
2	滚动 3 d 优化	72	365	26 280
3	滚动 7 d 优化	168	365	61 320

由表 3 可知:方式 1(年度逐周优化模型)下,考虑未来 7 d 的负荷和风电出力,每次制定一周(7 d)的火电机组开机方式及出力,该周优化完成后,将该周的优化信息提取并保存,传递到下一周,作为下一周的优化初始值,依次优化 52 周;方式 2(年度滚动优化模型(3 d 联合优化))下,滚动考虑未来 3 d 的负荷和风电出力进行优化,优化结果用来制定该周期首日的电网运行方式,并将该日的机组信息传递到下一周期,作为优化的初始值,滚动更新计算 365 次;方式 3(年度滚动优化模型(7 d 联合优化))下,滚动考虑未来 7 d 的负荷和风电出力进行优化,优化结果用来制定该周期首日的电网运行方式,并将该日的机组信息传递到下一周期,作为优化的初始值,滚动更新计算 365 次。

由于本文所求解的是大型复杂电力系统模型,涉及变量众多,且包含机组启停优化,是一个混合整数规划(MIP)问题,采用广泛应用且稳定的 CPLEX^[18]求解器进行求解。计算环境为曙光天阔服务器,系统配置如下:CPU 为 AMD Opteron Processor 6212 32 核,内存为 31.9 GB,操作系统为 Windows XP。

3 结果与分析

3.1 时序仿真法与典型日分析法对比分析

采用传统的典型日分析方法,选择负荷峰谷差最大的一日作为典型日进行计算,进而再推算全年电力电量平衡结果。与本文所提出的时序仿真法 3 种策略的优化结果进行比较,结果如表 4 所示。

表 4 时序仿真法与典型日分析法计算结果对比分析
Table 4 Comparative analysis of calculating results between time sequence simulation method and typical day analysis method

方法	风电平衡总量/(MW·h)	弃风总量/(MW·h)	风电限电率/%
典型日分析法	3 690 938	690 398.0	15.76
时序仿真法年度逐周优化	3 901 175	480 161.0	10.96
时序仿真法滚动 3 d 优化	3 956 893	424 443.3	9.69
时序仿真法滚动 7 d 优化	3 955 730	425 606.1	9.71

由表 4 可知:基于时序仿真的风电年度电力平衡方法的风电平衡总量均大于典型日分析法;尤其是采用滚动 3 d 的开机方式,其限电率仅为 9.69%,远小于典型日分析法的 15.76%。基于典型日提出的调度方式,是考虑在最严重情况下风电的平衡情况。如果将其用于指导全年的风电调度方式,计算结果必将偏于保守。另外,基于时序仿真的风电年度电力平衡方法与典型日分析法相比,更能体现出风电的年度特性,且更适用于实际电力系统调度。

不同风电电力平衡方法的节能减排效益对比如图 3 所示。

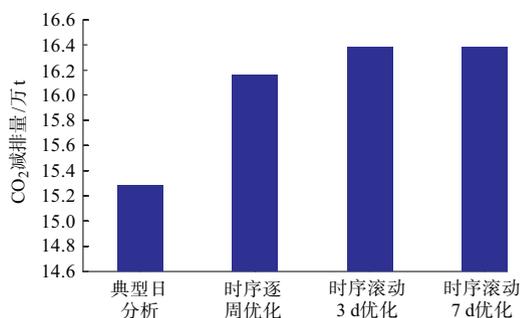


图 3 不同方法的节能减排效益
Fig.3 Energy conservation and emission reduction under different methods

由图 3 可知,采用时序仿真法的 CO₂ 减排量明显高于典型日分析法。其中,采用滚动优化开机方式的减排效果最好,符合当前“节能调度”这一理念。

3.2 3 种开机方式优化策略对比分析

在时序仿真法的基础上,采用 3 种开机方式,年度风电电力平衡后的风电消纳总量、风电电量如图 4 所示。图 5 所示为在全年 8 760 个时间序列中,任意连续抽取一周的平衡风电出力曲线,图 6 所示为任意连续抽取一个月的平衡风电出力曲线。

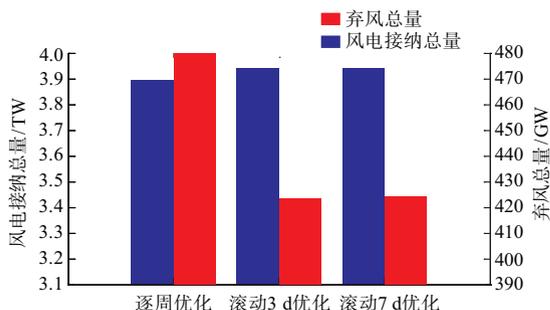


图 4 3 种开机方式下的风电接纳总量和弃风总量
Fig.4 Total accommodation and curtailment of wind power under three kinds of start-up mode

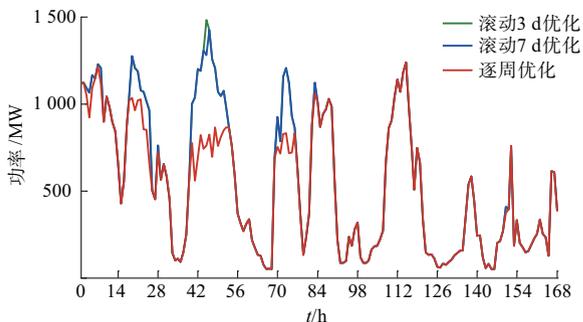


图 5 随机一周的风电平衡序列
Fig.5 Wind power balance sequence of one random week

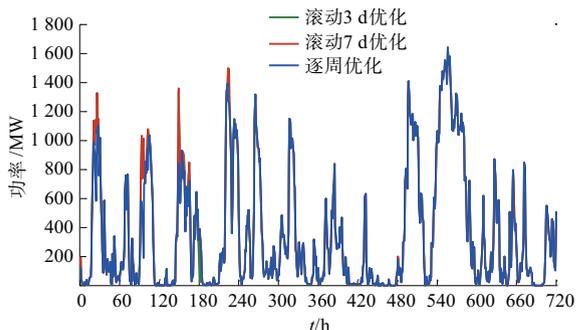


图 6 随机一个月的风电平衡序列
Fig.6 Wind power balance sequence of one random month

由图 4 至图 6 可知,3 种开机方式中,方式 2 和方式 3 均采用滚动优化开机,电网年度接纳风电能力

较强,弃风量较少。其通过滚动调整常规机组的启停机计划和机组出力,从而可平衡更多的风电出力。而对于方式 1(逐周优化),系统机组组合调整频率小于滚动优化,不能得到最优的常规机组开机方式,增加了风电的弃风量。

基于时序仿真法的 3 种开机方式下的计算时间分别为:39.8,37.6,240.7 min。可见,方式 1 和方式 2 的计算时间小于 40 min,能够满足实际年度分析时间要求。

综合上述指标,基于时序仿真法的风电年度计划方法,采用 3 d 滚动优化的开机方式更加符合实际电网规划和调度运行,不仅能提高风电实际上网电量,而且能够保证计算效率。

现进一步对滚动 3 d 优化的开机方式进行分析,其供热期电力分布图如图 7 所示,非供热期电力分布图如图 8 所示。

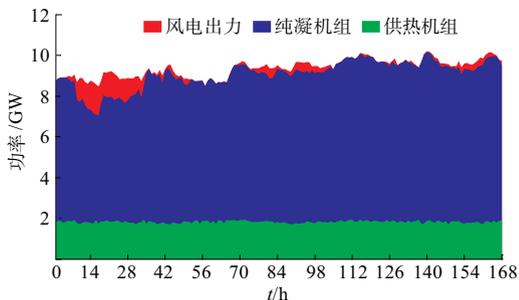


图 7 滚动 3 d 优化供热期一周电力分布
Fig.7 Power distribution of rolling optimization of 3 days in a week of heating period

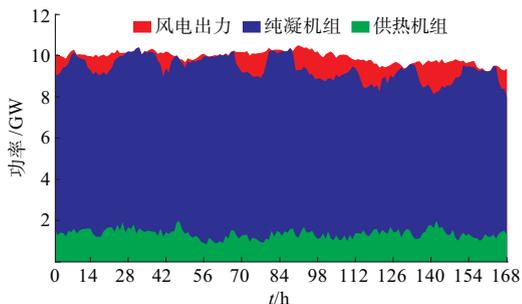


图 8 滚动 3 d 优化非供热期一周电力分布
Fig.8 Power distribution of rolling optimization of 3 days in a week off heating period

由图 7 可知,采用本文所提出的年度风电平衡方法,供热机组在供热期内几乎均保持其最小出力运行,给风电平衡让出了最大的接纳空间,保证了模型的最优性。对比图 7 和图 8 可知,由于非供热期供热机组调峰能力的增强,系统在非供热期的风电平衡能力要强于供热期。根据此模型,可以对网内机组按不同季节进行规划和调度运行。

在滚动 3 d 优化的开机方式中,各区域风电平衡总量、弃风量以及风电的限电率如表 5 所示。

表 5 3 个区域的风电消纳总量、弃风总量和限电率
Table 5 Total accommodation, curtailment and abandon rate of wind power in three regions

区域	风电平衡总量/(MW·h)	弃风总量/(MW·h)	风电限电率/%
1	2 087 795.4	1 086.6	0.05
2	778 494.0	1 157.0	0.15
3	1 090 603.6	422 199.7	27.90
全省	3 956 893.0	424 443.3	9.69

由表 5 可知:区域 1 和区域 2 可平衡较多的风电,而区域 3 的限电率高达 27.90%,该省网的新能源限电量基本都来源于此地区。分析算例数据可知,区域 3 只有 2 台 330 MW 机组,最大负荷仅 65.5 MW,且外送传输容量极限仅为 216 MW,而该地区风电总装机容量多达 738 MW,这是造成风电被限的主要原因。因此,从风电规划的角度讲,在大规模发展风力发电的同时,需提前对电网建设和布局做好规划。

本文提出的方法具有普适性,不同地区的年度风电调度计划,可根据自身的电网结构、风电分布和电力系统运行约束,进行模型匹配获得。

4 结语

本文提出了一种基于时序仿真的风电年度计划方法,综合考虑风电出力特性、负荷特性、机组调峰特性、供热机组特性、电网送出能力等因素,建立了用于分析省级电网的年度风电计划优化模型,用于指导含风电的系统年度运行方式。通过与典型日分析法比较得出,本文所提出的基于时序仿真的风电计划制定充分考虑了风电年度出力特性,能准确制定风电年度计划,为风电预留合理的电量空间,从而提高风电的实际上网电量和电网的节能减排效益;尤其滚动 3 d 优化的开机方式,风电平衡效果最佳,计算时间短,更为符合实际电力系统的运行,对实际电力系统调度年运行方式安排,具有重要的指导意义。由于风电出力具有随机性,考虑风电电量预测的随机模拟年度计划制定方法将是下一步的工作。

附录见本刊网络版 (<http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] GWEC. 全球风电装机数据 2011[R]. Brussels: GWEC, 2012.
- [2] 李俊峰. 2012 中国风电发展报告[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012: 1-16.
- [3] 国家电网公司. 风电优先调度工作规范[R]. 北京: 国家电网公司, 2012: 1-15.
- [4] 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 to Liaoning power grid based on power balance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(3): 86-90.
- [5] 周景宏, 胡兆光, 田建伟, 等. 含能效电厂的电力系统生产模拟[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 27-31.
ZHOU Jinghong, HU Zhaoguang, TIAN Jianwei, et al. Power system production simulation including efficiency power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 27-31.
- [6] 王铮, 王伟胜, 刘纯, 等. 基于风过程方法的风电功率预测结果不确定性估计[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 242-247.
WANG Zheng, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Uncertainty estimation of wind power prediction result based on wind process method[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 242-247.
- [7] 陈海淼, 陈金富, 段耿忠. 含风电场电力系统经济调度的模糊建模及优化算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 14-17.
CHEN Haiyan, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong. Fuzzy modeling and optimization algorithm dynamic economic dispatch in wind power integrated system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 14-17.
- [8] 孙惠娟, 彭春华, 易洪京. 大规模风电接入电网多目标随机优化调度[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 123-128.
SUN Huijuan, PENG Chunhua, YI Hongjing, et al. Multi-objective stochastic optimal dispatch of power system with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 123-128.
- [9] 吴小珊, 张步涵, 袁小明, 等. 求解含风电场的电力系统机组组合问题的改进量子离散粒子群优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 33(4): 45-52.
WU Xiaoshan, ZHANG Buhuan, YUAN Xiaoming, et al. Solutions to unit commitment problems in power systems with wind farms using advanced quantum-inspired binary PSO[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 33(4): 45-52.
- [10] ZHAO Xiaoli, WU Longli, ZHANG Sufang, et al. Joint environmental and economic power dispatch considering wind power integration: empirical analysis from Liaoning Province of China[J]. Renewable Energy, 2013(52): 260-265.
- [11] 刘德伟, 黄越辉, 王伟胜, 等. 考虑调峰和电网约束的省级系统风电消纳能力分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 77-81.
LIU Dewei, HUANG Yuehui, WANG Weisheng, et al. Analysis on provincial system available capability of accommodating wind power considering peak load dispatch and transmission constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 77-81.
- [12] 张粒子, 周娜, 王楠. 大规模风电接入电力系统调度模式的经济性比较[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 105-110.
ZHANG Lizi, ZHOU Na, WANG Nan. Economic comparison for different generation schedulings with large scale wind power connected power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 105-110.

- [13] 徐致远,罗先觉,牛涛.综合考虑电力市场与节能调度的火电机组合方案[J].电力系统自动化,2009,33(22):14-17.
XU Zhiyuan, LUO Xianjue, NIU Tao. Thermal unit commitment scheme considering electricity market and energy-saving dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 14-17.
- [14] 王彩霞,鲁宗相.风电功率预测信息在日前机组组合中的应用[J].电力系统自动化,2011,35(7):13-18.
WANG Caixia, LU Zongxiang. Unit commitment based on wind power forecast [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 13-18.
- [15] ELA E, O' MALLEY M. Studying the variability and uncertainty impacts of variable generation at multiple timescales[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(3): 1324-1333.
- [16] 杜继成.基于线性规划的 Balmorel 模型及其在风电并网中的应用研究[D].北京:中国电力科学研究院,2011.
- [17] 刘纯,吕振华,黄越辉,等.长时间尺度风电出力时间序列建模

- 新方法研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(1):7-13.
LIU Chun, LÜ Zhenhua, HUANG Yuehui, et al. A new method to simulate wind power time series of large time scale [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 7-13.
- [18] CARRIÓN M, ARROYO J M. A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(3): 1371-1378.

刘 纯(1968—),男,高级工程师,主要研究方向:风电功率预测及优化调度运行技术。

曹 阳(1988—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:风电接纳能力评估及调度运行技术。E-mail: caoyang1988828@126.com

黄越辉(1979—),女,高级工程师,主要研究方向:新能源发电并网及调度运行技术。

(编辑 章黎)

An Annual Wind Power Planning Method Based on Time Sequential Simulations

LIU Chun¹, CAO Yang¹, HUANG Yuehui¹, LI Peng¹, SUN Yong², YUAN Yue³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. State Grid Jilin Electric Power Co. Ltd., Changchun 130021, China;

3. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: China's wind power industry has developed rapidly these years. Because of the limited peak demand regulation capability of the power systems in Northeast, North and Northwest China, the curtailment of wind power has been serious. If we only consider the prediction of wind power, the existing annual wind power plan differs from the real situation after wind curtailment and as such it is difficult to do wind power planning. Considering wind power output characteristics, load characteristics, transmission capacity and some other factors, an annual wind power planning method based on time sequential simulation is proposed. The method can optimize the power balance with wind power at each time period of a year. An optimization model is built for analyzing the wind power plan of provincial power grid. Based on an actual provincial power grid, capabilities in wind power balancing, energy-saving, and emission reduction between time sequence simulation method and typical day analysis method are studied. The impacts of different generating schedules on the wind power balance ability are also included. Case study results show that the model of a 3-day rolling optimization is appropriate for the actual grid dispatching with high computational efficiency. Moreover, the wind power accommodation ability can be improved by using this model to provide a reference for annual planning.

This work is supported by National Key Technologies R&D Program (No. 2013BAA02B01) and State Grid Corporation of China.

Key words: wind power generation; time sequential simulation; annual planning; unit commitment

