

基于可再生能源可信容量的电网运行模拟仿真软件实现

梁 钢¹, 曹继雷², 孙传帅², 宋新甫¹, 余中平¹

(1. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 随着可再生能源并网需求越来越大, 可再生能源的接入给电网运行模拟仿真带来了很大挑战。提出了一种基于可再生能源可信容量的电网运行模拟仿真模型, 该模型以系统发电成本最小为目标, 基于风光出力模型、风光合成可信容量及网络安全约束, 建立日运行模拟模型, 并通过粒子群算法求解。同时, 针对当前可再生能源入网研究多侧重于理论方面, 开发了基于C++及QT可视化界面软件的可再生能源接入电网精细化运行模拟仿真软件。最后, 以新疆南部典型日负荷及风光数据为例进行了仿真验证。结果表明, 可再生能源接入电网精细化运行模拟软件可以将风电场、光伏电站和常规机组各个时段的有功出力形象且具体地以曲线的形式表现出来, 并证明了该软件人机界面友好, 对工程实践意义重大。

关键字: C++; QT; 可再生能源; 运行模拟

Operation simulation of power grid based on trusted capacity of renewable energy realization of simulation software

LIANG Gang¹, CAO Jilei², SUN Chuanshuai², SONG Xinfu¹, YU Zhongping¹

(1.State Grid Xinjiang Institute of Economic Research Technology, Urumqi 830002, China;

2.College of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: With the increasing demand for renewable energy grid-connected, the access of renewable energy brings many challenges to the simulation of power grid operation. This paper presents a simulation model of power grid operation based on the trusted capacity of renewable energy. The model aims at minimizing the generation cost of the system, establishes a daily operation simulation model based on the wind power output model, wind photosynthesis credible capacity and network security constraints, and solves it by particle swarm optimization (PSO). At the same time, in view of the current research on renewable energy access, which focuses on theoretical aspects, a simulation software for fine operation of renewable energy access grid is developed based on C++ and QT visual interface software. Finally, the typical daily load and wind data in southern Xinjiang are simulated and verified. The results show that the fine operation simulation software of renewable energy connected to power grid can visualize the active power output of wind farm, photovoltaic power station and conventional units in various periods and show it concretely in the form of curves. It also proves that the software has friendly human-machine interface and is of great significance to engineering practice.

Key words: C++; QT; renewable energy; operation simulation

国家重点研发计划 (2017YFB0903500); 国家电网公司科技项目(5229DK18000H); 国家电网公司总部科技项目 (SGNXDK000DWJS1800016); 国网新疆电力有限公司科技项目 (SGXJY00GHJS1800017)

0 引言

当前,人们对能源安全和环境恶化的担忧日益增加,为了解决能源短缺和环境恶化等问题,风力发电和光伏发电等可再生能源的大规模并网已成为必然^[1-2]。然而,受气候、环境和光照等方面的影响,风电、光伏发电具有很强的不确定、不易预测的特性,其出力变化对电网运行冲击较大,大规模并网后对电网安全稳定运行造成很大威胁^[3-5]。

目前,国内外对风电场、光伏电站并网做了大量的研究,并取得了一定的理论成果。文献[6]针对风电出力波动性、不稳定的特点建立源-网规划模型,最后用算例验证了模型的实用性。文献[7]以排污最少和运行成本最低为目标函数,构建经济调度优化模型,以一个含大规模风电场的电力系统为例进行仿真,得出了所提方法的有效性。不确定特性的可再生能源接入电网,使得网源规划变得困难。文献[8]提出了可再生能源并网后的电网规划问题及展望。由于可再生能源出力具有间歇性、随机性,在电力系统调度和规划中同样容量的可再生能源与常规机组相比存在很大差距。文献[9]针对大规模风电并网,提出了一种基于风电容量可信度的电力电量平衡方法。文献[10]提出了一种针对大规模风/光并网的综合容量可信度方法。同时可再生能源并网后对电网优化运行带来了新的挑战。针对可再生能源并网的模型及模型求解方法研究方面,文献[11]建立了含有风/光互补电力的动态经济调度模型,并应用改进的粒子群算法对所建立模型进行求解。文献[12]基于功角特性,并综合考虑火力发电机组的环境效益和风电并网的成本,建立含风电的电网优化模型。然而,以上所述的文献大都研究构建风电、光伏发电系统接入电力系统的优化模型、规划方法,很少涉及可再生能源并网后的运行模拟仿真及具体的软件平台开发,在实际应用方面仍需要进一步研究。

鉴于以上情况,本文利用QT在可视化界面编写上的强大功能以及人机界面美观的特性,以系统发电成本最小为目标,基于研究得到的风/

光出力模型、风/光合成可信容量及网络安全约束,建立日运行模拟模型,并通过粒子群算法求解。开发可再生能源接入电网精细化运行模拟软件。并以新疆南部典型日负荷及风/光数据为例,对基于QT的可再生能源接入电网精细化运行模拟软件进行仿真验证,结果证明了该软件人机界面友好、对工程实践及电网规划软件的发展意义重大。

1 风/光出力模型

1.1 风电场出力模型

针对风速的随机性、不可控性和波动性等问题,建立风速概率密度函数。然后,基于风机出力与风速的关系,导出风电机组出力的概率密度函数。

风速的随机性通常可近似认为服从双参数威布尔分布,则风速的概率密度函数可表示为

$$f_v(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

经过研究得到由非线性分段函数简化表示的风电出力与风速的关系^[7],即

$$P^w = \begin{cases} 0 & (v < v_{in}) U(v < v_{out}) \\ P_r^w \frac{v^3 - v_{in}^3}{v_r^3 - v_{in}^3} & v_{in} \leq v \leq v_r \\ P_r^w & v_r \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad (2)$$

式中, P^w 为风电出力; P_r^w 为风机的额定功率; v_{in} 为风机的切入风速; v_{out} 为风机的切出风速; v_r 为风机的额定风速; P_r^w 为风机的额定功率。

当给定风速数据超过风机的切入风速 v_{in} 时,风机启动并网,出力随风速增加而线性递增;当风速数据等于或大于风机的额定风速 v_r 时,风机出力以额定功率输出;当风速数据小于风机的切入风速 v_{in} 或者大于风机的切出风速 v_{out} 时,风机停机并与电网解列。

风电的出力概率密度函数为

$$f_w(P^w) = \frac{kLv_{in}}{c} \left(\frac{(1+\eta L)v_{in}}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{(1+\eta L)v_{in}}{c}\right)^k\right] \quad (3)$$

$$\eta = \frac{P_r^w}{P_r^w} \quad (4)$$

$$L = \frac{v_r - v_{in}}{v_{in}} \quad (5)$$

式中, $f_w(P^w)$ 为风电机组出力的概率密度函数; η 为风机出力效率; L 为额定风速 v_r 和切入风速 v_{in} 之差与切入风速 v_{in} 之比。

1.2 光伏电站出力模型

通过大量研究发现太阳能辐照度在一段时间范围内可简化为Beta分布^[13]

$$f(r) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\left(\frac{r}{r_{\max}} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r}{r_{\max}} \right)^{\beta-1} \right) \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{2\beta}{1 - \mu_2} \quad (7)$$

$$\beta = (1 - \theta) \left[\frac{\theta(1 - \theta)}{\delta^2} - 1 \right] \quad (8)$$

式中, $f(r)$ 为太阳辐照度概率分布函数; r 、 $r_{\max}$ 分别为该时段的太阳实际辐照度和最大辐照度; Γ 为伽马函数; α 、 β 为Beta分布形状参数; θ 为太阳辐照度的均值; δ 为太阳辐照度的标准差。

在式(5)~式(7)研究的基础上, 光伏发电系统的出力 P_{pv} 表示为

$$P_{pv} = rS\eta_2 \quad (9)$$

式中, P_{pv} 为光伏电站出力; S 为光电转换有效面积; η_2 为光电转换效率。

光伏发电系统的出力概率密度函数为

$$f_p(P_{pv}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\left(\frac{P_{pv}}{P_{pv\max}} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_{pv}}{P_{pv\max}} \right)^{\beta-1} \right) \quad (10)$$

式中, $f_p(P_{pv})$ 为光伏发电系统的出力概率密度函数; P_{pv} 为光伏发电系统的出力; $P_{pv\max}$ 为光伏发电系统的最大出力。

2 风/光发电可信容量评估

2.1 发电可信容量定义

可再生能源并网将提高电网的供电可靠性, 帮助常规机组分担负荷需求。但由于可再生能源的出力特性, 导致其能承担的负荷小于其装机

容量, 因此提出可信容量。目前可信容量的研究大多数是针对风电场的, 主要分成两类: 一类是从系统可靠性角度考虑的, 如等效可靠容量(Equivalent Firm Capacity, EFC)、等效常规机组容量(Equivalent Convective Generation Capacity, ECGC)、带负荷能力(Equivalent Load-Carrying Capability, ELCC)和从发电侧不确定性角度考虑的一定置信度下的保证出力(Guaranteed Capacity, GC)。比较四种方法, ECGC和GC计算结果与实际偏差较大, EFC相比与ELCC更适合反应风电所能代替的常规机组容量^[14]。

相比风力发电特性, 光伏发电具有明显的昼夜变化。白天可能有光照, 夜晚后光照完全消失。无法提高系统供电可靠性。因此, 提出风/光合成可信容量, 风/光合成出力为风/光单独出力之和。在风电可信容量的基础上, 定义风/光合成可信容量为在风/光并网前后, 在等可靠性下, 风/光合成系统能够代替常规机组的容量。

风/光合成系统可信容量计算准则可表示为

$$\sum_{t \in T} R_t \left\{ P_{w,t} + \sum_{g \in G} C_g, d_t \right\} = \sum_{t \in T} R_t \left\{ C_{wl} + \sum_{g \in G} C_g, d_t \right\} \quad (11)$$

式中, C_g 为常规机组 g 的容量; d_t 为系统 t 时刻负荷水平; $P_{w,t}$ 为风/光合成系统 w 在 t 时刻的出力; G 、 W 分别为常规机组与风/光合成机组的集合; $R_t\{a, b\}$ 为系统 t 时刻下在机组容量 a 以及负荷水平 b 下系统的可靠性; 设风/光合成系统可信容量为 C_{wl} , 可信容量评估时间范围为 T 。

2.2 发电可信容量计算

基于可靠性计算方法可以实现精细化计算可信容量。根据定义, 风/光合成系统可信容量主要基于可靠性指标求得, 本文选取系统电力不足频率(LOLF)作为系统可靠性指标。电力不足频率是指一段时间内电力系统由电力充裕状态变为电力不足状态的平均次数, 单位为次/年。

$$F_{LOLF} = \frac{8760}{T} N_i \quad (12)$$

式中, F_{LOLF} 为电力不足频率; N_i 为系统中电力不足的状态数 (切负荷次数)。

以电力不足频率为等可靠性准则, 确定原电力系统可靠性水平, 风/光合成系统可信容量是通过向不含新能源和常规机组的等效系统中添加虚拟机组容量, 并反复试探确定的。

3 考虑运行成本与电网约束的运行模拟模型

3.1 目标函数

建立以风/光/火混合发电系统总发电成本最小为目标, 考虑风/光发电容量可信度、电网安全约束、环境惩罚及弃风弃光成本的日内电网优化运行模拟模型。

系统发电成本包括火电发电经济成本、风电场经济成本和光伏电站经济成本, 各项成本如下。

(1) 火电发电经济成本^[11]

常规的火力发电成本在一定可利用小时范围内具有良好的经济性, 但燃煤对环境造成的影响成本也是不可忽略的, 火力发电经济成本包括燃料成本和环境成本, 在此研究基础上, 火力发电经济成本可以表示为

$$V_{\text{Gr}} = F_{\text{Gr}} + F_{\text{NEPr}} \quad (13)$$

$$F_{\text{Gr}} = \sum_{i=1}^m (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \quad (14)$$

$$F_{\text{NEPr}} = \sum_{i=1}^m C_{\text{NEPr}} (\gamma_i P_i^2 + \beta_i P_i + \alpha_i) \quad (15)$$

式中, i 为发电机组号; m 为发电机组总数; V_{Gr} 、 F_{Gr} 和 F_{NEPr} 分别为火电机组 i 的发电经济成本、燃料成本及环境成本; a_i 、 b_i 和 c_i 为火电机组 i 单位出力的燃料成本系数; α_i 、 β_i 和 γ_i 为单位火电机组出力环境污染系数; P_i 为在单位时间里火电机组的出力值; C_{NEPr} 为环境成本系数。

(2) 风电经济成本

由于风电出力的波动性和不稳定特性, 并网后对电力系统安全运行造成很大影响。在常规的发电成本的基础上, 还需要考虑旋转备用容量和弃风手段调节风电出力稳定性, 在此基础

上引入风电不平衡代价使 C_s 电网运行在安全裕度内^[12]。

基于风电出力概率密度函数建立风电场经济成本, 即

$$V_{\text{Wt}} = F_{\text{Wt}} + F_{\text{St}} \quad (16)$$

$$F_{\text{Wt}} = \sum_{i=1}^n C_w P_i^w \quad (17)$$

$$F_{\text{St}} = \sum_{i=1}^n C_s \int_0^{P_{r,i}^w} (P_i^w - P_{a,i}^w) f_{w,i}(P_{a,i}^w) dP_{a,i}^w \quad (18)$$

式中, n 为风电机组总数; 风电场经济成本包括常规发电成本 F_{Wt} 、风电不平衡成本 F_{St} ; C_w 为风电机组的费用系数; P_i^w 为第 i 台风电机组计划出力; 若该风机停止运行, 风能一般不产生成本消耗, 则将 C_w 设为 0; 当各风机计划出力 P_i^w 确定后, 考虑各自被高估概率, 按照式 (18) 计算出总的风电高估不平衡代价 F_{St} ; 其中, C_s 为风电机组的高估不平衡代价系数; $P_{r,i}^w$ 、 $P_{a,i}^w$ 和 $f_{w,i}(P_{a,i}^w)$ 分别为第 i 台风电机组额定功率、实际有效出力和出力概率密度函数。

(3) 光伏经济成本

光伏和风电出力特性相似, 都具有波动性和不稳定性。基于风电场经济成本建立常规发电成本与光伏不平衡代价成本相结合的光伏电站经济成本, 即

$$V_{\text{Lt}} = F_{\text{Lt}} + F_{\text{LSLt}} \quad (19)$$

$$F_{\text{Lt}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{pw}} P_i^l \quad (20)$$

$$F_{\text{LSLt}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{ps}} \int_0^{P_{r,i}^l} (P_i^l - P_{a,i}^l) f_{p,i}(P_{a,i}^l) dP_{a,i}^l \quad (21)$$

式中, k 为光伏机组总数; 光伏电站经济成本包括常规发电成本 F_{Lt} 、光电不平衡成本 F_{LSLt} ; C_{pw} 为光伏机组的费用系数; P_i^l 为第 i 台光伏机组计划出力; 若该光伏发电机组归属于本系统, 太阳能一般不产生成本消耗, 则将 C_{pw} 设为 0; 当各光伏发电机组计划出力 P_i^l 确定后, 考虑各自被高估概率, 按式 (21) 计算出总的光电高估不平衡代价 F_{LSLt} ; 其中, C_{ps} 为光电机组的高估不平衡代价系数; $P_{r,i}^l$ 、 $P_{a,i}^l$ 和 $f_{p,i}(P_{a,i}^l)$ 分别为第 i 台光伏发电机组额定功率、实际有效出力和出力概率密度函数。

目标函数表达式为

$$\min F = V_{Gr} + V_{Wt} + V_{Lt} \quad (22)$$

式中, $\min F$ 为以发电总成本为最小的经济调度的目标函数; F 为总发电成本。

3.2 约束条件

模型约束包括功率平衡约束、机组运行约束。

(1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^m P_i + \sum_{i=1}^n P_{a,i}^w + \sum_{i=1}^k P_{a,i}^l = L_{load} + L_{loss} \quad (23)$$

式中, L_{load} 为负荷需求; L_{loss} 为输电损耗。

功率平衡约束是为了保证日运行电力平衡, 保证系统电压, 频率稳定。

(2) 机组运行约束

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (24)$$

$$P_{i,w}^{\min} \leq P_{a,i}^w \leq P_i^w \quad (25)$$

$$P_{i,l}^{\min} \leq P_{a,i}^l \leq P_i^l \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^m P_{a,i}^w + \sum_{i=1}^n P_{a,i}^l \leq C_{wl} \quad (27)$$

$$P_i \leq P_i l_i \quad (28)$$

式 (24) 为火电机组出力上、下限约束, 其中, $P_i^{\min}$ 、 $P_i^{\max}$ 分别为第 i 台火电机组的出力下限值与上限值; 式 (25) 为风电机组出力上、下限约束, 其中, $P_{i,w}^{\max}$ 为第 i 台风电机组的出力下限值; 式 (26) 为光伏机组出力上、下限约束, 其中, $P_{i,l}^{\min}$ 为第 i 台光伏机组的出力下限值; 式 (27) 为风光实际总出力小于风光合成可信容量; 式 (28) 为机组爬坡约束, 其中, ΔP_i 为第 i 台火电机组的功率变化; l_i 为第 i 台机组爬坡率。

4 可再生能源接入电网精细化运行模拟软件

4.1 数据读取、处理模块

首先将风速大小、辐照度的预测数据和负荷数据导入到软件中。然后, 将预测数据带入到风/光出力模型中对风电机组和光伏发电机组进行出力预测。风/光数据显示界面如图1所示。数据读取、处理模块基于QT软件编写。在QT平台

下, 数据以Excel形式导入, 可实现对数据的快速、准确读取。

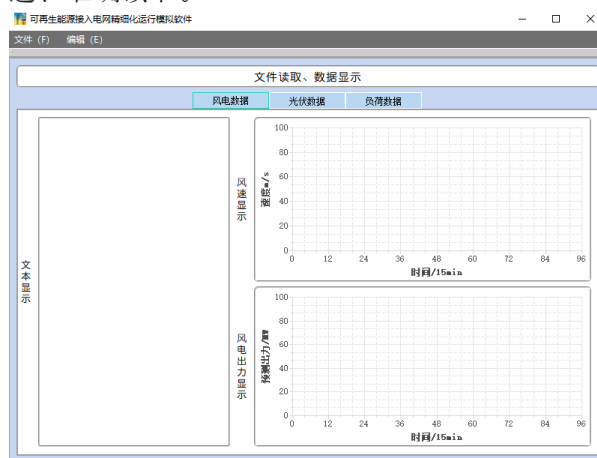


图1 数据读取界面

Fig. 1 Data loading interface

4.2 运行模拟模块

运行模拟模块界面包括粒子群初始化模块, 运行模拟计算模块及计算结果显示模块。“仿真”利用粒子群算法^[15]以系统发电成本最小为目标函数, 虑及网络安全约束、风电合成系统可信容量对风电、光电和火电机组进行多时段机组组合, 点击“仿真”按钮通过运行计算得到风机机组、光伏发电机组及火力发电机组的多时段组合。运行模拟计算流程图如图2所示, 运行模拟输出界面如图3所示。

5 可再生能源接入电网精细化运行模拟软件实例仿真

本研究以新疆南部96点负荷数据及风/光的预测数据相结合, 以系统发电成本最小为目标, 虑及网络安全约束的优化经济调度模型中, 并与搭建的软件平台相结合, 进行仿真计算。风速、辐照度预测数据及负荷数据曲线如图4~图6所示。风电场切入风速 $v_{in}=3.5$ m/s, 额定风速 $v_r=12$ m/s, 切出风速 $v_{out}=25$ m/s, 额定功率为1 000 MW; 接入的太阳能光伏电站容量为600 MW的多晶硅太阳能电池组件 (10 000 m²)。

仿真结果如图7所示, 其中最浅色的曲线为常规火力发电机组出力, 稍深色的曲线为风电机组出力, 最深色的曲线为光伏发电机组出力。

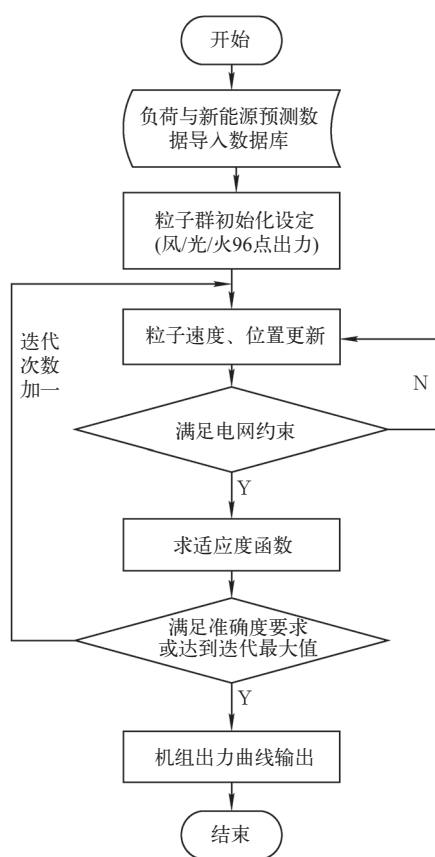


图2 运行模拟计算流程图

Fig. 2 Running simulation flow chart

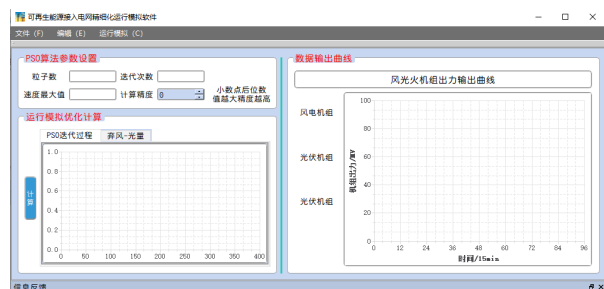


图3 日运行模拟主界面

Fig. 3 Running simulation main interface

6 结束语

针对以上情况，利用QT函数库丰富、人机界面友好等优点以及数据库的数据存储功能，对“可再生能源接入电网精细化运行模拟软件”加以软件实现。基于QT在可视化界面编写上的强大功能以及人机界面美观的特性，实现了对风电、光伏发电和火力发电机组进行多时段机组组合曲线的可视化。基于数据库的数据存储功能，对

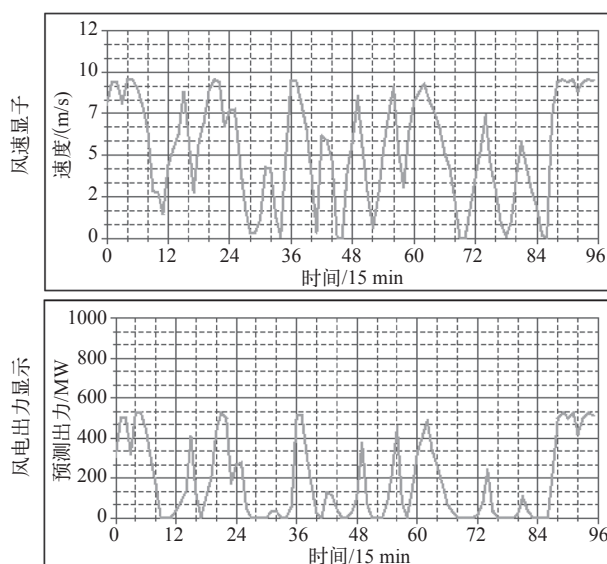


图4 风速预测数据曲线

Fig. 4 Prediction data curve of wind speed

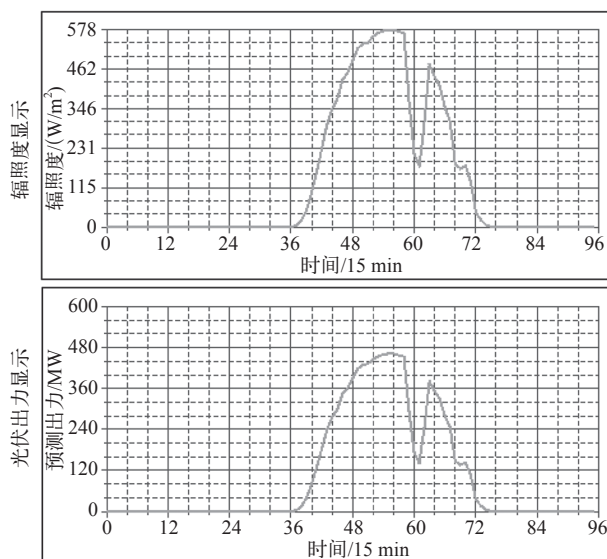


图5 光伏预测数据曲线

Fig. 5 Prediction data curve of irradiance

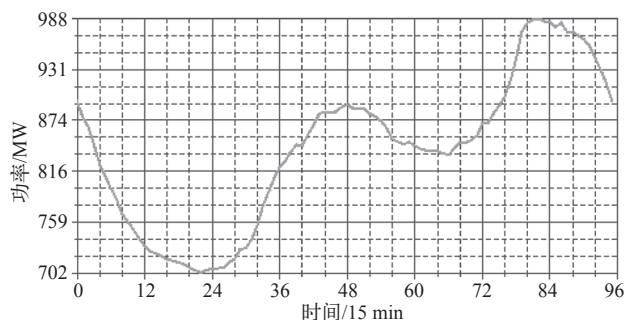


图6 负荷数据曲线

Fig. 6 Curve of load data

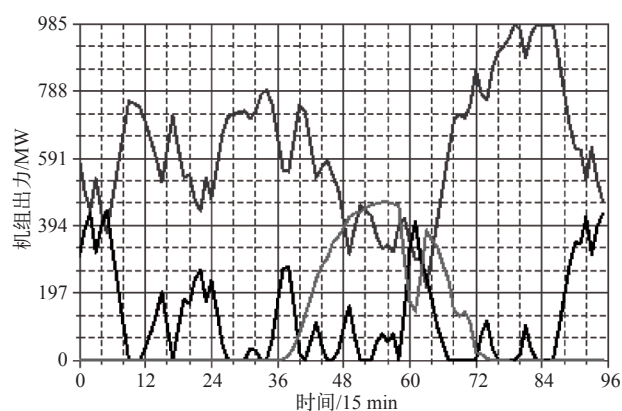


图7 日运行模拟机组出力曲线

Fig. 7 Generating force curve of simulated generating unit for daily

负荷数据,风电场和光伏电池阵列的有功出力实现了数据存储,并实现了对运行模拟数据的管理。同时,基于此软件平台,提出了一种运行模拟方法。因此,本文工作对运行模拟仿真软件的开发利用以及对未来新能源并网的日运行模拟和电力电量平衡的研究都具有积极意义。

参考文献

- [1] 袁铁江,陈洁,刘沛汉,等.储能系统改善大规模风电场出力波动的策略[J].电力系统保护与控制,2014(4): 47-53.
YUAN TIEjiang, CHEN Jie, LIU Peihan, et al. Strategy of energy storage system to improve the fluctuation of large scale wind Farm [J]. Power System Protection and Control, 2014 (4): 47-53.
- [2] 丁明,王伟胜,王秀丽,等.大规模光伏发电对电力系统影响综述[J].中国电机工程学报,2014, 34(1): 2-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review of the influence of large-scale photovoltaic power generation on power system [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2014, 34 (1): 2-14.
- [3] 李碧辉,申洪,汤涌,等.风光储联合发电系统储能容量对有功功率的影响及评价指标[J].电网技术,2011, 35(4): 123-128.
LI Bihui, SHEN Hong, TANG Yong, et al. The influence of energy storage capacity on active power and its evaluation index in combined wind-storage power generation system [J]. Grid Technology, 2011, 35 (4): 123-128.
- [4] 高赐威,何叶,胡荣.考虑大规模风电接入的电力规划研究[J].电网与清洁能源,2011, 27(10): 53-59.
GAO Ciwei, HE Ye, HU Rong. Study on power planning considering large-scale wind power access [J]. Grid and Clean Energy, 2011, 27 (10): 53-59.
- [5] 熊传平,张晓华,孟远景,等.考虑大规模风电接入的系统静态电压稳定性分析[J].电力系统保护与控制,2012(21): 132-137.
XIONG Chuanping, ZHANG Xiaohua, MENG Yuanjing, et al. Static voltage stability analysis of system considering large-scale wind power access [J]. Power System Protection and Control, 2012 (21): 132-137.
- [6] 高赐威,吴天婴,何叶,等.考虑风电接入的电源电网协调规划[J].电力系统自动化,2012, 36(22): 30-35.
GAO Ciwei, WU Tianying, HE Ye, et al. Coordinated planning of power grid considering wind power access [J]. Power System Automation, 2012, 36 (22): 30-35.
- [7] CHIANG J S, HSIA C H, LI H T. High density QR code with multi-view scheme [J]. Electronics Letters, 2013, 49(22): 1381-1383.
- [8] 程浩忠,李隽,吴耀武,等.考虑高比例可再生能源的交直流输电电网规划挑战与展望[J].电力系统自动化,2017, 41(9): 19-27.
CHENG Haozhong, LI Jun, WU Yaowu, et al. Challenges and prospects of AC/DC Transmission network planning considering high proportion of renewable energy [J]. Power System Automation, 2017, 41 (9): 19-27.
- [9] 魏聪,白帆,方开俊,等.基于风电容量可信度的电力电量平衡优化模型[J].智慧电力,2018,

- 46(8): 25-31.
- WEI Cong, BAI Fan, FANG Kaijun, et al. Power balance optimization model based on the reliability of wind power capacity [J]. Intelligent Power, 2018, 46 (8): 25-31.
- [10] 李轩, 张家安, 吴林林, 等. 可再生能源汇集地区风电与光伏发电的综合容量可信度评估[J]. 太阳能学报, 2017, 38(3): 707-714.
- LI Xuan, ZHANG Jiaan, WU Linlin, et al. Comprehensive capacity reliability assessment of wind power and PV power generation in renewable energy collection area[J]. Journal of Solar Energy, 2017, 38(3): 707-714.
- [11] 池喜洋, 竺炜, 刘长富, 等. 含大型风电场的电网安全经济优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 125-131.
- CHI Xiyang, ZHU Wei, LIU Changfu, et al. Optimal dispatching of power grid safety and economy with large wind farm [J]. Journal of Power Science and Technology, 2018, 33 (1): 125-131.
- [12] 林虹江, 周步祥, 胡庆有, 等. 基于风光互补电力入网的电力系统动态经济调度[J]. 可再生能源, 2014, 32(11): 1671-1678.
- LIN Hongjiang, ZHOU Buxiang, HU Qingyou, et al. Dynamic economic dispatching of power system based on wind complementary power network [J]. Renewable Energy, 2014, 32 (11): 1671-1678.
- [13] KARKI R, HU P, BILLINTON R. Reliability evaluation considering wind and hydro power coordination[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 685-693.
- [14] 张宁, 康重庆, 肖晋宇, 等. 风电容量可信度研究综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 82-94.
- ZHANG Ning, KANG Chongqing, XIAO Jinyu, et al. Summary and prospect of research on reliability of wind power capacity [J]. Proceedings of The CSEE, 2015, 35 (1): 82-94.
- [15] 杨维, 李歧强. 粒子群优化算法综述[J]. 中国工程科学, 2004(5): 87-94.
- YANG Wei, LI Qiqiang. A review of particle swarm optimization algorithms [J]. Chinese Engineering Science, 2004 (5): 87-94.



梁钢

作者简介

梁钢 (1971-), 男, 高级工程师, 国网新疆电力有限公司经济技术研究院副院长, 从事电网规划、电力系统方面的研究工作。

(收稿日期: 2019-06-08) **EA**