

# 计及电动汽车充电负荷的电力系统中长期生产模拟方法研究

陶星宇, 杨健维, 牛牧童, 向悦萍, 廖 凯, 何正友

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756)

**摘 要:** 日益增长的电动汽车充电负荷将给电力系统经济性、可靠性带来影响。电力系统生产模拟作为系统生产成本分析和可靠性评估的重要手段, 有必要充分考虑电动汽车充电负荷。首先, 利用蒙特卡洛抽样法, 重点考虑气温对电动汽车的影响, 建立电动汽车充电负荷预测模型。然后, 充分考虑电动汽车充电负荷, 并采用持续负荷模型, 以系统全年生产运行成本最低为目标, 计及各发电机组检修计划、启停成本、运行成本约束, 建立电力系统中长期生产模拟优化模型。最后, 利用 CPLEX 求解器求解优化模型, 实现电力系统生产模拟, 可模拟出各机组生产运行参数、机组检修方案、系统总发电量、系统运行总成本。基于修改的 IEEE-RTS 79 测试系统进行算例分析, 验证所提方法的可行性, 并分析电动汽车充电负荷对电力系统的影响。

**关 键 词:** 电动汽车; 中长期生产模拟; 蒙特卡洛法; 优化模型

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.01.003

中图分类号: TM743

文章编号: 1673-9140(2023)01-0018-09

## A mid/long-term power system production simulation approach considering charging load of electric vehicles

TAO Xingyu, YANG Jianwei, NIU Mutong, XIANG Yueping, LIAO Kai, HE Zhengyou

(School of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

**Abstract:** The increasing charging load of electric vehicles will have an impact on the economy operation and reliability of the power system. Power system production simulation is an important analysis method of cost and reliability, and it is necessary to consider such charging loads. Firstly, based on the impact of the temperature, the charging load prediction model of electric vehicles is established by the Monte Carlo sampling method. Then, in a continuous load model for electric vehicles to pursuit the lowest annual production and operation cost of the system. The factors such as maintenance plan, start and stop cost, and operation cost constraints of each generator are incorporated, an optimization model of mid/long-term power system production is built. Finally, the CPLEX is used to solve this optimization model to realize the simulation of power system productions, which can modeling the factors like production and operation parameters of each generator, maintenance scheme, total system power generation and total system operation cost. Based on the modified IEEE-RTS 79 test system, a case study is presented to verify the feasibility of the proposed method, and the influence of electric vehicle charging load on power systems is also analyzed.

**Key words:** electric vehicle; mid/long-term power system production simulation; Monte Carlo method; optimization model

收稿日期: 2021-11-29; 修回日期: 2022-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(51977180)

通信作者: 杨健维(1983—), 女, 博士, 副教授, 主要从事新能源电力系统保护与控制、电动汽车并网研究; E-mail: jwyang@swjtu.cn

电力系统生产模拟是一种通过优化发电机组,模拟发电机组生产发电情况,满足系统中负荷需求,从而确定最优运行方式下各发电机组发电量、生产成本等系统生产指标的重要手段,广泛应用于电力系统的成本分析、规划运行发展以及可靠性评估等方面<sup>[1]</sup>。当前,电动汽车因其低碳环保的优势,将得到广泛的应用<sup>[2-3]</sup>。随着城市中电动汽车保有量的增长,大规模电动汽车接入电网,其充电行为具有时空分布随机性,将显著影响传统电网负荷特性,从而影响电网的经济性和可靠性<sup>[4-5]</sup>。因此,在电动汽车接入的电力系统经济性、可靠性评估中,有必要考虑电动汽车用能情况与发展趋势所带来的影响。这对传统的电力系统生产模拟提出了新的要求。

电力系统生产模拟方法主要分为基于启发式原则的模拟方法与基于优化模型的模拟方法。在早期的研究中,基于启发式原则的生产模拟方法研究占据主要地位。文献[6-7]中介绍等效电量函数法在生产模拟中的应用原理及计算流程;文献[8]基于等效电量函数法,分时段对含有光伏的电力系统进行随机生产模拟;文献[9]利用等效电量函数法,对含有供热的电力系统生产模拟方法进行了研究;文献[10-11]为表达模拟过程中新能源和储能的时序状态变化,基于时序负荷曲线,采用在传统等效电量函数基础上修正的生产模拟方法进行研究;文献[12]在考虑需求侧响应的基础上,利用等效电量函数法进行生产模拟。基于此方法的生产模拟,计算复杂度低、速度快、效率高,具有较为准确的精度。但是,当模型中需要引入多个如机组启停、天气温度等复杂约束条件时,此方法不能直观、方便地加以考虑。

基于优化模型的生产模拟方法,主要特征是实现了对发电机组的最优化运行模拟,具有良好的适应性。文献[13]以生产成本最小化为目标,建立电力系统生产成本模型;文献[14]考虑新能源发电、火电、水电、抽水蓄能等多种发电形式,并采用混合整数规划方法对生产模拟优化模型进行求解;文献[15]提出以运行时间内新能源出力最大为优化目标的生产模拟方法,考虑输电网线性潮流约束,并简化求解模型,提高时序生产模拟模型的求解效

率。基于此方法的生产模拟,可以更方便地考虑各种约束条件,其适用范围广,结果精确,但是计算复杂,计算时间较长。

然而目前电力系统生产模拟研究中,鲜有文献考虑电动汽车充电负荷和发电机组的启停成本。因此,本文提出一种计及电动汽车充电负荷的电力系统中长期生产模拟方法。所提方法充分考虑电动汽车充电负荷对电网的影响,以系统运行成本最低为目标,以发电机组运行、检修、启停以及系统电量平衡为约束,采用蒙特卡洛抽样法对电动汽车负荷大小进行预测,利用持续负荷模型进行负荷建模,实现了考虑电动汽车充电负荷的电力系统中长期生产模拟,最后通过算例分析验证了所提方法的有效性。

## 1 电动汽车充电负荷模型

电动汽车充电负荷具有较强的随机性。基于温度对电动汽车的影响,本文利用蒙特卡洛抽样法,模拟电动汽车充电负荷。模型主要包括:开始充电时刻和日行驶里程、行程耗电量、电池状态、充电负荷总量4个部分。本文仅考虑私家电动汽车。

### 1.1 开始充电时刻和日行驶里程

电动汽车开始充电时刻和日行驶里程具有随机性并受用户行为影响,本文采用蒙特卡洛法对上述两参数进行抽样取值<sup>[16-17]</sup>。其中,电动汽车每日开始充电时刻 $T_s$ 服从正态分布,概率密度函数为

$$f_t(x_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \delta_s} e^{-\frac{(x_s - \mu_s)^2}{\delta_s^2}} \quad (1)$$

式中,自变量 $x_s$ 为开始充电时刻。正态分布的对称轴 $\mu_s$ 和方差 $\delta_s$ 作如下规定:公共充电时,工作日 $\mu_s=9, \delta_s=1.5$ ,周末 $\mu_s=12, \delta_s=1.5$ ;家庭充电时,工作日 $\mu_s=18, \delta_s=1.5$ ,周末 $\mu_s=22, \delta_s=2.5$ 。

日行驶里程 $S$ 服从 $S \sim N(\mu, \delta^2)$ 的对数正态分布,概率密度函数为

$$f_s(x_m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \delta_m x} e^{-\frac{(\ln x - \mu_m)^2}{2\delta_m^2}} \quad (2)$$

式中,自变量 $x_m$ 为日行驶里程。对数正态分布的平均值 $\mu_m$ 和标准差 $\delta_m$ 做如下规定:工作日时, $\mu_m=15.98, \delta_m=1.14$ ;周末时, $\mu_m=18.55, \delta_m=0.84$ 。

## 1.2 行程耗电量

行程耗电量主要包括行驶里程耗电与空调耗电两部分<sup>[17-18]</sup>。单位里程耗电量主要取决于车辆行驶速度,然而在不同天气条件下,电动汽车行驶速度有所不同。所以,需确定电动汽车具体某一时速的单位里程耗电量,由以下公式确定:

$$x_e = 0.21 - 0.001v + \frac{1.534}{v} \quad (3)$$

$$H = x_e \cdot S \quad (4)$$

式中, $v$ 为车速; $x_e$ 为车速为 $v$ 情况下电动汽车的单位里程耗电量; $S$ 为电动汽车行驶里程; $H$ 为电动汽车总里程耗电量。

空调耗电是电动汽车行程耗电的重要部分。考虑气温对空调耗电量的影响,电动汽车在不同气温下行驶的空调耗电量表示为

$$K_T = \frac{H}{1 - \theta} \cdot \theta \quad (5)$$

式中, $K_T$ 为温度为 $T$ 时的空调耗电量; $\theta$ 为空调耗电量占比,制热时, $\theta = 35\%$ ,制冷时, $\theta = 32.5\%$ 。并且规定空调启动原则服从正态分布,概率密度函数为

$$f_a(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \delta_i} e^{-\frac{(x-u_i)^2}{2\delta_i^2}} \quad (6)$$

式中,自变量 $x_i$ 为环境温度; $u_i$ 、 $\delta_i$ 均为启动系数。制热启动时, $u_i = 10.82$ , $\delta_i = 2.14$ ;制冷启动时 $u_i = 29.4$ , $\delta_i = 1.75$ 。

## 1.3 电池状态

同一车辆不同电池容量下的充电需求有所不同。气温对电动汽车电池容量影响很大<sup>[17]</sup>,本文中不同温度条件下车辆电池的实际最大容量为

$$C_T = b_T \cdot C_{20} \quad (7)$$

式中, $C_T$ 为温度为 $T$ 时的电池实际最大容量; $C_{20}$ 为温度为 $20^\circ\text{C}$ 时的电池最大容量; $b_T$ 为温度为 $T$ 时的电池容量系数。

## 1.4 充电需求

充电时间与用户的充电策略和习惯密切相关。本文假设电动汽车用户在终止行程后,在有充电设施的条件就一定进行充电。充电时长<sup>[19]</sup>为

$$T_c = \min\left(\frac{0.9C_T - E_n}{\eta_c P_c}, t_s\right) \quad (8)$$

式中, $T_c$ 为充电时长; $P_c$ 为充电功率; $\eta_c$ 为充电效率; $E_n$ 为当前电量; $t_s$ 为停留时间。

总体充电需求即每个电动汽车在每个时段的充电功率之和,即

$$P_{EV} = \sum_{m=1}^{T_m} \sum_{i=1}^N P_{i,m} \quad (9)$$

式中, $P_{EV}$ 为总体充电需求; $T_m$ 为总时长; $N$ 为电动汽车保有量; $P_{i,m}$ 为第 $i$ 辆电动汽车在第 $m$ 时段的充电功率。第 $m$ 时段以15 min作为基础单位时间。

充电需求计算需计算一年内的所有充电需求,以此作为生产模拟中的负荷数据。利用上述模型,可对电动汽车充电负荷进行预测,具体流程如图1所示,其中 $S_{oc}$ 为电池剩余容量。

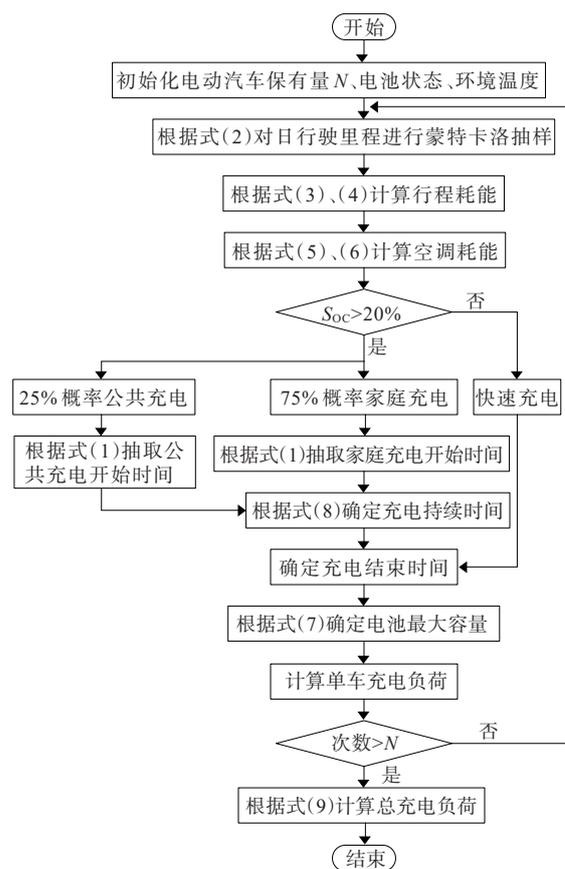


图1 电动汽车充电负荷计算流程

Figure 1 Flow chart of electric vehicle charging load calculation

## 2 持续负荷模型

在电力系统生产模拟研究中,常使用时序负荷模型和持续负荷模型进行负荷建模。由于中长期生产模拟时间跨度较长,本文采取持续负荷曲线进行负荷建模,具体步骤如下:

1) 获得系统中常规负荷的数据;

2) 基于文1中电动汽车充电负荷模型,计算出充电负荷数据,再将其与常规负荷叠加,获得时序综合负荷;

3) 对时序综合负荷按照负荷大小降序排列,形成精确持续负荷曲线;

4) 根据需要选择适当的分段数和相应的负荷水平,形成持续负荷曲线,建立所需持续负荷模型。

对于步骤4)的分段方法,有以下要求:分段数不小于3段;所有负荷段的负荷大小应选取在该时段最大和最小负荷之间;最终的持续负荷模型应满足电量平衡的要求,如以下公式:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^B L_{t,b} D_{t,b} = \sum_{t=1}^T L_t D_t \quad (10)$$

式中, $t$ 为单位时段; $T$ 为模拟总时长; $b$ 为某一持续负荷段; $B$ 为分段总数; $L_t$ 为 $t$ 时段中时序负荷大小; $D_t$ 为时序负荷数据中的单位时段长度; $L_{t,b}$ 为 $t$ 时段内持续负荷模型中第 $b$ 分段的负荷水平大小; $D_{t,b}$ 为 $t$ 时段内持续负荷模型中第 $b$ 个负荷水平的持续时间。

### 3 计及电动汽车充电负荷的电网中长期生产模拟优化模型

基于前文所述电动汽车充电负荷模型和持续负荷模型,建立计及电动汽车充电负荷的电网中长期生产模拟优化模型。

#### 3.1 目标函数

优化模型的目标函数以系统中生产运行成本最小为目标,并考虑机组启停成本,构建生产模拟优化目标函数,即

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^B [ \sum_{t_p} \sum_{g \in t_p} f_g(p_{g,t,b}) D_{t,b} ] + \sum_{t_p} \sum_{g \in t_p} C^{qt} n_{g,T}^{qt} \quad (11)$$

式中, $g$ 、 $t_p$ 分别为发电机组编号以及发电机组集合; $f_g$ 为第 $g$ 号发电机组输出功率 $p$ 时的运行成本; $p_{g,t,b}$ 为 $t$ 时间段内第 $g$ 号发电机组在 $b$ 段负荷水平下的出力大小; $D_{t,b}$ 为 $t$ 时段内第 $b$ 个负荷水平的持续时间; $C^{qt}$ 为启停成本; $n_{g,T}^{qt}$ 为 $T$ 时间周期内第 $g$ 号机组的启停次数。

#### 3.2 约束条件

生产模拟优化模型约束条件,主要包括发电机组运行约束以及系统运行约束。

1) 发电机运行约束条件。

检修次数约束为

$$\sum_{t=1}^T z_{g,t} = O_g \quad (12)$$

式中, $z_{g,t}$ 为0-1变量,表示 $t$ 时间段内机组 $g$ 是否开始,当机组开始检修为1,否则为0; $O_g$ 为 $T$ 时段内各机组所需检修次数。

检修时间约束为

$$\sum_{t=1}^T u_{g,t} = O_g \cdot n \cdot t \quad (13)$$

式中, $u_{g,t}$ 为0-1变量,表示在 $t$ 时间段内机组 $g$ 的运行状态,当机组处于停运检修时为1,处于正常运行时为0; $n$ 为正整数; $t$ 为最小时间单位; $n \cdot t$ 为每次检修所需要的持续时间。

检修连续性约束为

$$\sum_{t=1}^{t+n \cdot t-1} u_{g,t} - z_{g,t} \cdot n \cdot t = 1, 1 \leq t \leq (T - n \cdot t + 1) \quad (14)$$

检修间隔约束为

$$\sum_{t=1}^{t+n \cdot t-1} z_{g,t} = 1, 1 \leq t \leq (T - n \cdot t + 1) \quad (15)$$

机组开机约束为

$$z_{g,t} + u_{g,t} \leq 1 \quad (16)$$

机组出力上下限为

$$P_{g,\max} \cdot u_{g,t} \leq p_{g,t,b} \leq P_{g,\min} \cdot u_{g,t} \quad (17)$$

式中, $P_{g,\max}$ 、 $P_{g,\min}$ 分别为机组 $g$ 的最大出力功率和最小出力功率。

2) 系统运行约束。

电力平衡约束为

$$\sum_g p_{g,t,b} = L_{t,b} \quad (18)$$

式中, $L_{t,b}$ 为 $t$ 时段内第 $b$ 分段的负荷水平大小。

电量平衡约束为

$$\sum_g p_{g,t,b} \cdot D_{t,b} + C_{t,b} = L_{t,b} \cdot D_{t,b} \quad (19)$$

式中, $C_{t,b}$ 为失电量。

#### 3.3 生产模拟流程

基于电动汽车充电负荷模型和持续负荷模型,完成优化模型目标函数与约束条件构建后,求解此

优化问题,即可实现电力系统生产模拟。整体模拟流程如下。

1) 数据输入。模型需输入电网全年时序负荷数据,全年温度数据,电动汽车保有量。

2) 确定系统中各项参数。主要需确定各发电机组相关运行参数和电动汽车相关运行参数。

3) 充电负荷预测。基于文1所述模型,对电动汽车充电负荷进行负荷预测。

4) 建立负荷模型。基于文2所述模型,将所得充电负荷与常规负荷叠加,对叠加后的负荷进行分段处理,得到持续负荷模型。

5) 建立生产模拟优化模型。基于持续负荷曲线,建立中长期生产模拟优化模型。

6) 优化问题求解。利用CPLEX求解器求解优化问题,得出生产模拟结果,结果包括各机组生产运行参数、机组检修方案以及整体系统的总发电量、总运行成本。

## 4 算例分析

### 4.1 基础算例分析

算例基于修改的IEEE-RTS 79系统,并考虑电动汽车充电负荷,进行中长期生产模拟。生产模拟时长 $T$ 为1a,基础单位时间 $t$ 为1周,全年气温数据取自2016年上海全年每日温度数据。常规负荷中年最高负荷为2 850 MW,发电机组24台,机组容量均为160 MW。1~8号机组发电成本为50元/(MW·h),9~16号机组发电成本为60元/(MW·h),17~24号机组发电成本为70元/(MW·h)。机组全年检修次数3次,检修持续时间为1周,机组启停成本为40万元。

对于电动汽车相关参数作如下规定:区域内电动汽车保有量取10万辆,假设电动汽车电池容量均为24 kW·h, $C_{20}=98\%$ , $b_{-10\sim 0}=74.3\%$ , $b_{0\sim 20}=100\%$ , $b_{20\sim 40}=103\%$ 。家庭充电功率4 kW,公共充电功率40 kW,充电效率均为90%,快速充电时长为0.5 h。并且规定电动汽车具有季节性天气特性下的最佳行驶速度如表1所示。

采用文2所述负荷建模方法,分4个负荷段建立系统的持续负荷模型。以第1周为例,经处理的

常规负荷和电动汽车充电负荷的分段持续负荷曲线和如图2所示。

表1 电动汽车最佳行驶速度

Table 1 Optimal driving speed of electric vehicles km/h

路况	冬季车速	夏季车速	春秋季车速
雨天	40	65	40~80
晴天	55	80	40~80

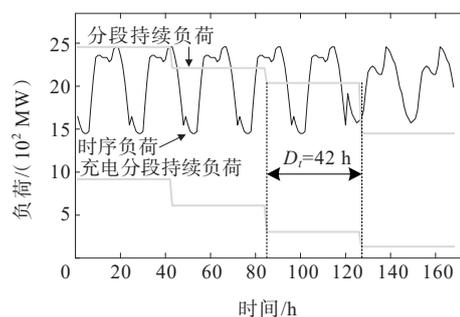


图2 系统负荷模型(以第1周为例)

Figure 2 System load model (take week 1 as an example)

依据本文所提生产模拟步骤,经CPLEX求解器计算,可得出以下生产模拟结果。系统年度基本运行参数如表2所示。此外,模拟结果还包括24台机组一年时间内的出力情况。某机组52周中的出力大小如图3所示,24台机组年度发电总量如图4所示。

表2 系统年度运行参数

Table 2 Annual operation parameters of the system

运行参数	单位	结果
系统总发电量	GW·h	21 163.50
充电负荷总量	GW·h	4 246.60
系统运行总成本	元	$1.21 \times 10^9$
机组启停成本	元	$2.88 \times 10^7$
单位发电成本	元/(MW·h)	57.18

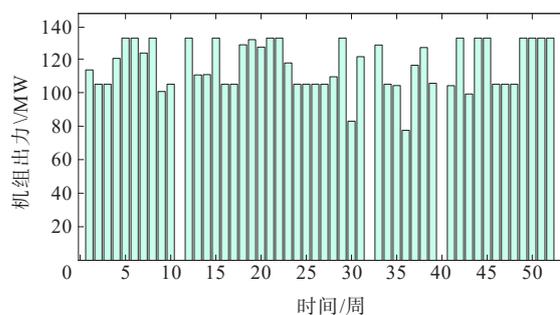


图3 机组全年出力(以9号机组为例)

Figure 3 Annual output of generators (take generator 9 as an example)

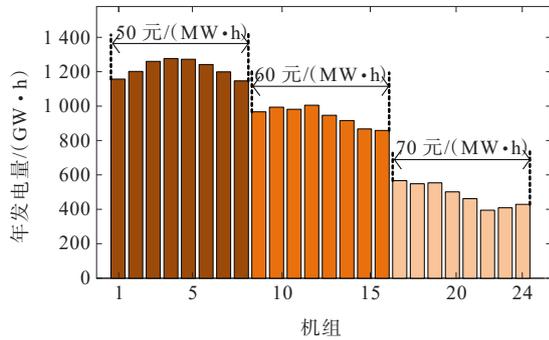


图 4 全年各机组发电总量

Figure 4 Annual total power generation of each unit generator

由图 3 可知,9 号机组全年正常运行,出力大小在 76~140 MW 之间,均处于正常范围,停运检修次数 3 次。生产模拟可模拟出各机组的年出力情况,并满足机组运行要求。

由图 4 可知,1~8 号机组单位发电成为 50 元/(MW·h) 相对较低,8 个机组全年平均发电量为 1 219 MW。相对于单位发电成本 60 元/(MW·h) 的 9~16 号机组,1~8 号机组平均发电量高出 9~16 号机组 29.4%。相对于单位成本最高 70 元/(MW·h) 的 17~24 号机组,1~8 号机组平均发电量高出其 152.4%。基于优化模型的生产模拟,可在充分考虑系统经济性的基础上,确定系统中发电机组的发电量。

系统运行中在检修计划的约束下,各机组的运行状态如图 5 所示。由图 5 可知,第 9 周至第 17 周和第 31 至第 43 周,分别处于全年的春季与秋季,此时系统中负荷压力小,平均负荷大小为全年最大负荷的 75%,各发电机组的检修时间都集中在这两段时间。另外,全年同一时间段检修的发电机组均不超过 3 台,检修容量不超过 480 MW,全年都处于较小的水平。所提方法经模拟得出的检修计划是合理的。

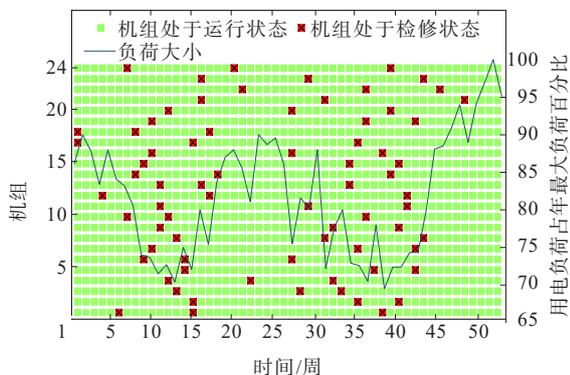


图 5 全年各机组运行状态

Figure 5 Annual operation state diagram of each generator

本节基础算例中,负荷分段数选择的是 4 段。为验证所选分段数的合理性,在负荷分段数为 8 段和 12 段 2 种额外的情况中,基于基础算例进行了生产模拟。模拟结果中的主要系统运行参数与求解时间如表 3 中所示。

表 3 不同负荷分段数下生产模拟结果

Table 3 Production simulation results under different load segments

负荷分段数	系统总发电量/ (GW·h)	系统运行总成本/ ( $10^9$ 元)	求解时间/ s
4	21 163.50	1.21	18
8	21 087.10	1.20	40
12	21 126.90	1.21	51

由表 3 可知,本算例中在更多分段数的情况下,系统总发电量和总运行成本的偏差不大,且两两最大偏差在均 0.2% 以内。造成此现象的原因主要是电动汽车充电负荷预测结果有随机性,每次模拟的预测结果略有差异。而对于求解时间方面,分段数多的情况下,用时明显增多。由此可见,负荷分段数选取越多,对于系统总体运行参数结果而言影响不大,但是增加了求解难度。在模拟时间尺度较长且原始的时序负荷数据缺乏,或者需有意增加高负荷段持续时间的情况下,可选择较小的负荷分段数,以提高求解效率。如果原始负荷数据较详细且模拟时间尺度较短,可选择较多的符合分段数,更加逼近精确的持续负荷曲线,以增加模拟结果的说说服力。

#### 4.2 中期生产模拟分析

为进一步验证方法可行性,本节以天作为基础时间单位,进行了月度生产模拟算例分析。选取全年第 1 个月 1~4 周作为生产模拟时间段。由于 1~4 周处于冬季负荷压力大,所以对机组不做检修安排,系统中其余各参数与基础算例一致。

本算例中基础单位时间短,电动汽车充电行为所带来的影响将更显著。以第 1 周为例,采用所提模型得到充电负荷预测结果和常规负荷大小如图 6 所示。

图 6 是一个典型负荷趋势场景。充电负荷由于用户的充电习惯,周末的开始充电时间更晚,工作日与休息日趋势有较大差异。并且在休息日中,充电负荷和常规符合的峰谷时间恰好错开。

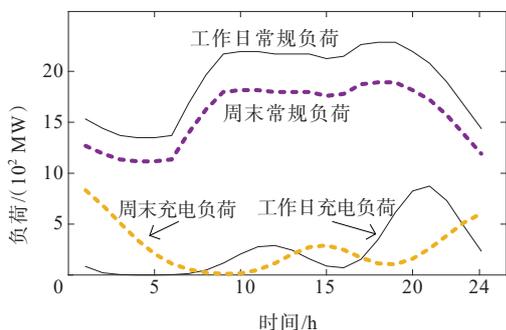


图6 充电负荷与常规负荷大小(以第1周为例)

Figure 6 Comparison between charging load and conventional load (take week 1 as an example)

因此,为充分考虑电动汽车充电行为,更准确地建立负荷模型,可将持续负荷分段数设置更多。此外,月度生产模拟相对于年度,计算复杂度也相对低。所以本算例持续负荷分段数设置为24段,对应一天中的24 h,所得持续负荷曲线基本接近精确持续负荷曲线。经计算,生产模拟结果如表4所示。

表4 系统月度运行参数

Table 4 Monthly operation parameters of the system

运行参数	单位	结果
系统总发电量	GW·h	1 417.05
充电负荷总量	GW·h	170.21
系统运行总成本	元	$8.70 \times 10^7$
单位发电成本	元/(MW·h)	61.42

与基础算例相同,模拟结果中也可获得各发电机组的出力情况。以1号机组为例,其月度发电量如图7所示。为了体现电动汽车充电负荷的影响,本文与没有考虑电动汽车充电负荷模拟结果进行对照。

本文充电负荷建模中,考虑了周末车主活动多,出行目的地不固定的行为模式,所以在出行里程的分布上提高了平均值,降低了标准差,从而导致周末充电负荷压力更大。由图7可知,由于上述原因,充电负荷在休息日中对发电机组出力情况影响较大,所提方法在较短时间尺度下,可充分体现电动汽车用户行为所带来的影响。另外,在考虑电动汽车充电负荷情况下1号机组1~4周的单日平均发电量为1 865.7 MW·h,相较于不考虑时的1 584.1 MW·h高出17%。由此可见,在冬季电动汽车充电负荷较大,所提方法能充分考虑充电负荷所带来的负荷波动。

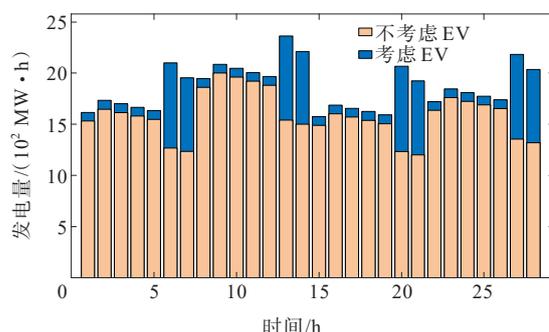


图7 机组发电量(以1号机组为例)

Figure 7 Generating capacity of generators (take generator 1 as an example)

上述分析表明,对于中期生产模拟算例,所提生产模拟方法可有效进行求解,并且可充分考虑电动汽车充电负荷的影响,有效分析了电动汽车用户行为所带来的负荷变化。另外,模型可通过改变基础时间单位、持续负荷分段数,来应对多种时间尺度下生产模拟问题,具备一定灵活性。

### 4.3 电动汽车保有量影响分析

为分析电动汽车充电负荷对电力系统可靠性造成的影响,并且进一步验证模型的适应性。本节在不同电动汽车保有量水平下,利用本文所提方法进行了生产模拟。

算例参数分别设置5个场景,场景1~5电动汽车保有量依次为110 000、130 000、150 000、170 000、200 000辆,其余参数与基础算例均相同。

本文使用失负荷率(loss of load probability, LOLP)来描述各情景中电力系统的可靠性。各场景的模拟结果如图8所示。

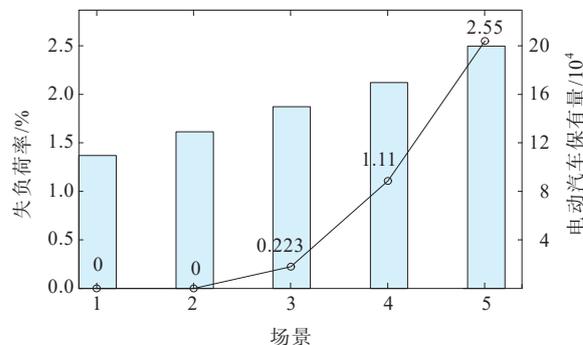


图8 各电动汽车保有量水平下的失负荷率

Figure 8 LOLP at different levels of electric vehicle ownership

在本算例中当电动汽车保有量数值增大时,在某些充电负荷压力大的时段有可能出现失负荷的

现象。由图8可见,趋势上当电动汽车保有量逐步增长时,电力系统失负荷率增长速度很快。数值上当系统中的保有量达到20万辆时,此时系统的失负荷率达到2.55%,是保有量处于15万辆时0.225%失负荷率的10倍多,电力系统的可靠性有所降低。

上述分析表明,本文所提生产模拟方法在不同电动汽车保有量场景下,可有效进行生产模拟,并利用失负荷率分析了电网的可靠性。所得结果也表明,电动汽车保有量的大量增长,将显著降低电力系统可靠性,电力系统的规划、运行、发展需充分考虑电动汽车充电负荷造成的影响。

## 5 结语

本文利用蒙特卡洛抽样法模拟电动汽车充电负荷,并基于持续负荷曲线,采用优化模型提出一种计及电动汽车充电负荷的电力系统生产模拟方法。基于修改的IEEE-RTS 79测试系统,对所提方法进行了算例分析,得到以下结论:

1) 所提生产模拟方法可有效实现电力系统中长期生产模拟,并充分考虑电动汽车充电负荷的接入以及发电机组的启停。可获得发电机组全年出力情况、机组检修计划、系统成本等系统运行参数;

2) 所提生产模拟方法在不同电动汽车保有量场景下,可有效实现生产模拟,并可通过计算系统失负荷率,分析算例中电力系统可靠性。所得结果可见,大幅增长的电动汽车数量,将降低电力系统可靠性。未来电力系统的规划、运行、发展,有必要考虑电动汽车充电负荷。

在以后的研究中,可对输电过程中的损耗、容量等约束进行考虑,进一步完善所提方法。

### 参考文献:

- [1] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1990: 1-3.  
WANG Xifan. Power system optimization planning[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1990: 1-3.
- [2] 周衍涛, 戴军, 苑惠丽, 等. 城市电动汽车充电设施需求预测与规划布局研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 177-187.

- ZHOU Yantao, DAI Jun, YUAN Huili, et al. Demand forecasting and planning layout of urban electric vehicle charging facilities[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 177-187.
- [3] 余潇潇, 宋福龙, 周原冰, 等. “新基建”对中国“十四五”电力需求和电网规划的影响分析[J]. 中国电力, 2021, 54(7): 11-17.  
YU Xiaoxiao, SONG Fulong, ZHOU Yuanbing, et al. Investigations on the impact of new infrastructure on electricity forecast and power system planning during the 14th five-year plan period[J]. Electric Power, 2021, 54(7): 11-17.
- [4] 蔡黎, 张权文, 代妮娜, 等. 规模化电动汽车接入主动配电网研究进展综述[J]. 智慧电力, 2021, 49(6): 75-82.  
CAI Li, ZHANG Quanwen, DAI Nina, et al. Review on research progress of large-scale electric vehicle access to active distribution network[J]. Smart Power, 2021, 49(6): 75-82.
- [5] 孟宪珍, 张艳, 安琪, 等. 电动汽车接入充电对配电网电压波动的影响[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(2): 91-98.  
MENG Xianzhen, ZHANG Yan, AN Qi, et al. Influence of electric vehicle access charging on voltage fluctuation of distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(2): 91-98.
- [6] 胡晓飞, 林洁, 郭瑞鹏, 等. 水火发电系统随机生产模拟的两阶段定区间等效电量函数法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 169-175.  
HU Xiaofei, LIN Jie, GUO Ruipeng, et al. A two-stage fixed-range equivalent energy function method for probabilistic production simulation on hydro-thermal generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 169-175.
- [7] 赵书强, 索瑛, 许朝阳, 等. 考虑断面约束的多能源电力系统时序性生产模拟[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(7): 1-6.  
ZHAO Shuqiang, SUO Xun, XU Zhaoyang, et al. Time series production simulation of multi-energy power system considering section constraints[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7): 1-6.
- [8] 郭旭阳, 谢开贵, 胡博, 等. 计入光伏发电的电力系统分时段随机生产模拟[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1499-1505.  
GUO Xuyang, XIE Kaigui, HU Bo, et al. A time-interval based probabilistic production simulation of power system with grid-connected photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1499-1505.
- [9] LI H, LU Z, QIAO Y, et al. A non-sequential probabilistic

- production simulation method for wind energy curtailment evaluation considering the seasonal heat supply constraints[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018,9(1):462-473.
- [10] 朱睿,胡博,谢开贵,等.含风电—光伏—光热—水电—火电—储能的多能源电力系统时序随机生产模拟[J]. *电网技术*, 2020,44(9):3246-3253.  
ZHU Rui, HU Bo, XIE Kaigui, et al. Sequential probabilistic production simulation of multi-energy power system with wind power, photovoltaics, concentrated solar power, cascading hydro power, thermal power and battery energy storage[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(9): 3246-3253.
- [11] 廖庆龙,谢开贵,胡博.含风电和储能电力系统的时序随机生产模拟[J]. *电网技术*, 2017,41(9):2769-2776.  
LIAO Qinglong, XIE Kaigui, HU Bo. Sequential probabilistic production simulation of power systems with wind power and energy storage[J]. *Power System Technology*, 2017,41(9):2769-2776.
- [12] 段炜,胡兆光,姚明涛,等.考虑需求响应资源的电力系统生产模拟[J]. *电网技术*, 2014,38(6):1523-1528.  
DUAN Wei, HU Zhaoguang, YAO Mingtao, et al. Power system production simulation considering demand response resource[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(6): 1523-1528.
- [13] GONZALEZ J A. Probabilistic production costing modeled with AMPL[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2002, 17(2):277-282.
- [14] 邵成成,王雅楠,冯陈佳,等.考虑多能源电力特性的电力系统中长期生产模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(13):4072-4081.  
SHAO Chengchen, WANG Yanan, FENG Chenjia, et al. Mid/long-term power system production simulation considering multi-energy generation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020,40(13):4072-4081.
- [15] 朱俊澎,施凯杰,李强,等.考虑输电网络潮流约束的时序生产模拟及新能源消纳能力评估[J]. *电网技术*, 2022,46(5):1947-1955.  
ZHU Junpeng, SHI Kaijie, LI Qiang, et al. Time series production simulation and renewable energy accommodation capacity evaluation considering transmission network power flow constraints[J]. *Power System Technology*, 2022,46(5):1947-1955.
- [16] 辛昊,严正,许少伦.基于多代理系统的电动汽车协调充电策略[J]. *电网技术*, 2015,39(1):48-54.  
XIN Hao, YAN Zheng, XU Shaolun. Multi-agent system based coordinated charging strategy for electric vehicles[J]. *Power System Technology*, 2015,39(1):48-54.
- [17] 郑元黎,龚锦霞,梅光银,等.考虑风光不确定性的微网经济风险博弈模型[J]. *电测与仪表*, 2023,60(3):107-114.  
ZHENG Yuanli, GONG Jinxia, MEI Guangyin, et al. Economic risk game model of microgrid considering wind and photovoltaic power uncertainties[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023,60(3):107-114.
- [18] 宋媛媛.基于行驶工况的纯电动汽车能耗建模及续航里程估算研究[D].北京:北京交通大学,2014.  
SONG Yuanyuan. Energy consumption modeling and cruising range estimation based on driving cycle for electric vehicles[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [19] 于海东,张焰,潘爱强.电动私家车充电负荷中长期推演模型[J]. *电力系统自动化*, 2019,43(21):80-87.  
YU Haidong, ZHANG Yan, PAN Aiqiang. Medium-and long-term evolution model of charging load for private electric vehicle[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019,43(21):80-87.