

基于多目标遗传算法的电网停电检修规划方法研究

蔡智洋¹, 叶 萌¹, 陈志聪¹, 黄红伟², 尚贯辉², 薛艳军²

(1. 广州供电局有限公司, 广东 广州 510620; 2. 北京清大科越股份有限公司, 北京 100084)

摘要: 近年来, 随着电网中运行的电力设备数量逐渐增多, 给制订停电检修计划的工作带来了挑战。为此基于帕累托最优化理论, 建立了考虑电力系统可靠性、设备环境友好性和工程经济性的多目标优化模型。从实际电力设备运行情况出发, 采用遗传算法对停电计划问题进行了分析。最后通过IEEE EAST 10-machine-O/V总线系统模型进行了仿真实验, 得到了三种最优停电计划, 并且通过甘特图的形式自动生成停电计划表, 以供运行人员决策。仿真结果表明所提出的方法能够在平衡经济性与环境友好性的基础上实现最优停电计划的制订。研究成果可为电力系统停电计划管理提供参考。

关键词: 多目标优化; 停电检修; 停电计划表; 智能算法; 帕累托最优

Research on outage maintenance planning method based on multi-objective genetic algorithm

CAI Zhiyang¹, YE Meng¹, CHEN Zhicong¹, HUANG Hongwei², SHANG Guanhui², XUE Yanjun²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510620, China; 2. Qingdakeyue Corporation, Beijing 100084, China)

Abstract: In recent years, with the increasing number of power equipment running in the power grid, it brings challenges to the formulation of outage maintenance plan. Based on Pareto optimization theory, a multi-objective optimization model considering power system reliability, equipment environmental friendliness and engineering economy is established in this paper. Starting from the actual operation of power equipment, the problem of outage planning is analyzed by using genetic algorithm. Finally, through IEEE EAST The 10-machine-O/V bus system model is simulated, and three kinds of optimal outage plans are obtained, and the outage plan table is automatically generated in the form of Gantt chart for operators to make decisions. The results show that the method proposed in this paper can achieve the optimal outage plan on the basis of balancing economy and environmental friendliness. The research results can provide reference for power system outage plan management.

Key words: multi objective optimization; outage maintenance; outage schedule; intelligent algorithm; Pareto optimization

0 引言

停电计划传统上是由负责电力系统运行的专家制订的, 停电计划的制订需要在考虑电力系统各种运行约束的条件下花费时间和精力来

进行, 其制订涉及停电日期、发电机输出和并联电容器量等电力系统各方面问题, 是一个大型组合问题。因此各种自动化软件和智能方法正逐渐应用于电力系统停电计划的制订上^[1-3]。

一般来说,计划停电多在春季和秋季集中进行,在这期间电力需求较低。然而由于电力系统规模和复杂性的增加,电力设施的数量也迅速增加,因此必须以更高的效率进行停电规划工作,同时电力公司在实施停电检修时还必须充分考虑电力系统的效率和可靠性^[4-6]。因此停电计划问题实际上可以通过多目标优化模型来进行描述,然后采用各种不同的算法实现最优解的求取^[7],最后为电力专家提供可参考的停电计划,以此达到提高停电检修计划制订的效率、减轻相关专家工作负担的目的。

为此本文考虑多目标函数,提出了一种基于帕累托最优化理论的停运计划制订方法。该方法采用多目标遗传算法(MOGA)求解优化问题,并通过MOGA提取和显示由非支配解的停电计划组成的帕累托最优集,以供停电计划制订人员决策。提出的优化目标函数共有两个:目标函数1是一组考虑系统可靠性的函数,优化目标是将偏离参考电压的偏差和线路传输损耗降到最小;目标函数2的优化目标则是最小化CO₂排放和设备总停运成本。最后采用本文提出的优化方法,通过IEEE EAST 10-machine-O/V总线系统模型进行了仿真实验,得到了三种最优停电计划。研究结果可为停电计划的制订提供参考。

1 多目标遗传算法

多目标遗传算法(MOGA)最早由Fonseca和Fleming于1993年提出,算法的核心是帕累托最优,其中目标函数的值只有在其他目标函数值降低的前提下才能提高。传统的优化多目标问题的标准方法是通过线性加权将多目标问题转化为单目标问题^[8]。与此不同,MOGA不定义每个目标函数的优先级顺序,而是通过帕累托最优排序法和适应度赋值来评估个体的非支配解的数量。

1.1 MOGA基本过程

采用MOGA的基本过程按以下几个步骤

进行:

- 1) 创建初始种群。
- 2) 利用帕累托排序方法对个体进行排序,并根据它们的等级计算适应度值。
- 3) 选择每个个体的父母,定义交叉和变异,并基于分配的适应度值来生成下一个种群。
- 4) 如果满足给定的终止准则就停止计算,否则返回步骤2)进行新一轮计算。

1.2 帕累托排序方法

帕累托排序基于个体间的优势关系进行,考虑一个由 n 个个体构成的种群 X_i ,种群的秩 r 按如下公式计算

$$r(X_i) = 1 + n \quad (1)$$

帕累托排序示意图如图1所示。其中每个点的位置是通过评估目标函数来确定的,每个点的右上角的数字是通过式(1)计算的秩,非支配解被称为帕累托最优解,数字标识为1,用黑色圆圈表示。

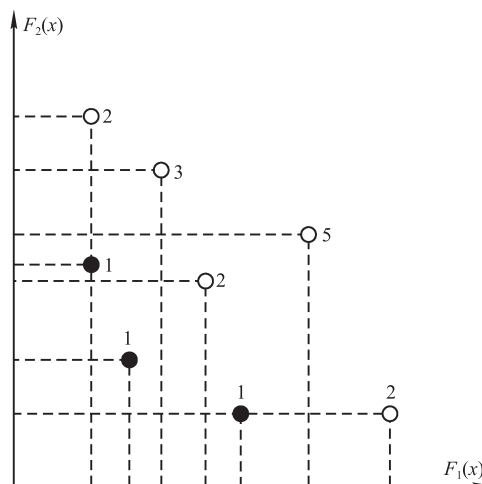


图1 帕累托排序示意图

Fig. 1 Pareto sorting diagram

1.3 聚集度

聚集度主要用于维持MOGA解的多样性,聚集度是生态位计算的一种方法,主要通过共享函数来评价个体的拥挤程度,即

$$Sh(d_{ij}) = \begin{cases} 1 - \frac{d_{ij}}{\sigma_{share}} & d_{ij} \leq \sigma_{share} \\ 0 & \end{cases} \quad (2)$$

共享函数返回的数值, 依据个体 j 是否位于个体 i 的共享圈 σ_{share} 之内, 在 $0 \sim 1$ 之间取值。因此可以通过欧氏距离计算个体 i 和 j 之间的距离 d_{ij} , 即

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^M \left(\frac{f_k^i - f_k^j}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \right)^2} \quad (3)$$

式中, f 为目标函数的函数值; M 为目标函数的总数量。

其中, 聚集度 n_{ci} 通过对共享函数求和得到, 即

$$n_{ci} = \sum_{j=1}^{\mu_i} \text{Sh}(d_{ij}) \quad (4)$$

式中, μ_{r_i} 为个体种群的秩 r_i 的总数, 由于遗传算法默认解决方案的多样性十分重要, 因此个体具有生态位计数比式(4)所计算的更高时, 个体具有低的适应值。

1.4 适应度赋值

采用MOGA的个体适应度幅值过程按照如下几个步骤进行:

1) 初始化每个变量 $\mu(j)=0(j=1, \dots, N)$, 其中 $\mu(j)$ 是个体秩数 j 的总数。

2) 采用帕累托排序算法对所有个体进行排序, 并更新 $\mu(j)$ 的数值。

3) 在满足 $\mu(r_i)>0$ 的条件下, 从 r_i 中选取最大值 r^* , 然后通过如下公式给所有个体赋平均适应度数值, 即

$$F_i = N - \sum_{k=1}^{r_i-1} \mu(k) - 0.5(\mu(r_i) - 1) \quad (5)$$

如果个体的秩数 $r_i=1$, 其适应度为

$$F_i = N - 0.5(\mu(1) - 1) \quad (6)$$

4) 利用式(4)计算秩数为 r_c 的每个个体的生态位计数, 然后通过如下公式换算适应度的数值, 即

$$F'_j = \frac{F_j}{n_{c_j}} \quad (7)$$

将适应度转换为

$$F'_j \rightarrow \frac{F_j \mu(r_c)}{\mu(r_c)} F'_j \quad (8)$$

5) 如果 $r_c < r^*$, $r_c = r_c + 1$, 则返回步骤4)计算; 否则结束计算。

2 停电计划模型

基于MOGA, 本文提出了一种停电计划制订方法, 尽管电力设施的停电计划在一定程度上已经自动化, 但电力专家仍然要负责停电计划的制订。通过应用本文提出的方法可生成多样化停电计划, 从而减轻专家制订停电计划的负担, 此外还可以图形化地显示各种停电计划的帕累托最优集。

2.1 目标函数和约束

通常电力运营商要尽量减小设备运营的经济和环境损失, 即使在设备停运期间也应如此。因此在设定优化目标函数时, 必须保证电力系统的可靠性, 按如下方式设定: 第一目标函数用于最小化 ΔV 和 P_{loss} , ΔV 为电压偏离参考电压1(pu)的值; P_{loss} 为输电线路损失; 第二目标函数是最小化 CO_2 排放, 以及投运设备的单位燃油消耗。上述目标函数组成了多目标优化问题的目标函数集。按如下公式进行目标函数定义。

2.1.1 目标函数 1: 函数 f_{11} 、 f_{12} 、 f_{13} 和 f_{14} 的最小化燃料消耗

$$f_{11} = a + bP_G + cP_G^2 \quad (9)$$

CO_2

$$f_{12} = AP_G + \frac{B}{365 \times 24} \quad (10)$$

$$f_{13} = \sum P_{\text{loss}} \quad (11)$$

$$f_{14} = \sum (\Delta V)^2 \quad (12)$$

2.1.2 目标函数 2: f_{21} 、 f_{22} 的最小化

$$f_{21} = \sum (f_{11} + \text{UCC}) \quad (13)$$

其中, UCC为投运设备的单位消耗, 其表达式为

$$\text{UCC} = \sum S_i(x_{it}, u_{it}) \quad (14)$$

$$f_{22} = \sum f_{12} \quad (15)$$

2.1.3 约束函数

(1) 平衡性约束

松弛节点

$$e_{\text{slack}} = e_0, f_{\text{slack}} = 0 \quad (16)$$

负载总线上的有功和无功率

$$P_{Li} = P_{L0}, Q_{Li} = Q_{L0} \quad (17)$$

母线电压

$$V_{Gi} = V_{G0} \quad (18)$$

(2) 非平衡性约束

带负载的母线电压

$$V_{\min} \leq V_L \leq V_{\max} \quad (19)$$

发电机母线的有功和无功率

$$P_{Gi\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi\max} \quad (20)$$

$$Q_{Gi\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi\max} \quad (21)$$

输电线路上的线路流量

$$0 \leq LF_i \leq LF_{i\max} \quad (22)$$

变压器抽头比

$$TR_{i\min} \leq TR_i \leq TR_{i\max} \quad (23)$$

并联电容器的数量

$$0 \leq SC_i \leq SC_{i\max} \quad (24)$$

式中, f 为优化目标函数; a 、 b 和 c 为发电机燃料消耗常数; P 和 Q 为有功和无功率; A 和 B 为发电机 CO_2 的排放常数; S 为单位承担成本; u 为发电机控制变量; x 为发电机状态变量; e 为电压实部; f 为虚部; LF 为线电流; TR 为变压器抽头比; SC 为并联电容器的数量。此外, 下标 i 为总线标号, G 为发电机总线标号, L 为负载总线标号, slack 为松弛总线标号, $\min$ 为下限, $\max$ 为上限, T 为时间段; 0为初始设定值。

2.2 算法

图2和图3为本文提出的算法流程示意图, 算法共由“Main”和“MOGA”两部分组成。其中甘特图用于表示生成的停机计划, 图中的行是工作或业务大纲, 列是时间。这样的图表经常用来代替生产控制。本文将发生停机的设施列在行中, 一周的天数列在列中。算法各个部分列出如下。

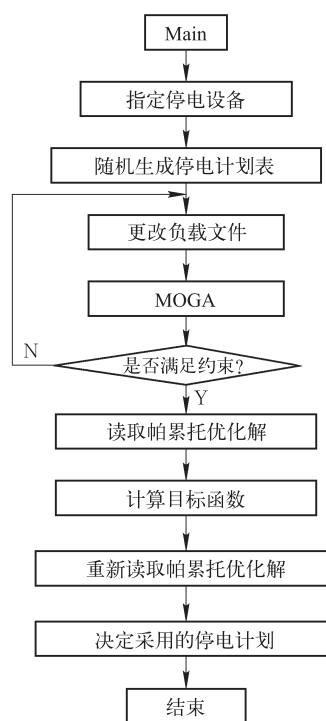


图2 停电计划主程序示意图

Fig. 2 Main program diagram of outage plan

(1) 主算法 (Main) 部分

1) 生成包括停电设施、发电机输出 P 、并联电容器 SC 和变压器抽头比 TR 的信息的初始种群。

2) 从种群信息进行功率流计算。

3) 更改负载配置文件。

4) 为每个负荷曲线保存由MOGA计算的帕累托最优解。

5) 如果满足终止准则, 则移动到步骤6)。否则, 返回到步骤3)。

6) 读取由MOGA计算和保存的帕累托最优解。

7) 计算单位消耗成本。

8) 计算目标函数2。

9) 重新提取帕累托最优解。

10) 从适当的解决方案中选择适当的停机计划 (由停电计划的决策者执行)。

(2) MOGA算法部分

1) 生成包括停电设施、发电机输出 P 、并联电容器 SC 和变压器抽头比 TR 的信息的初始种群。

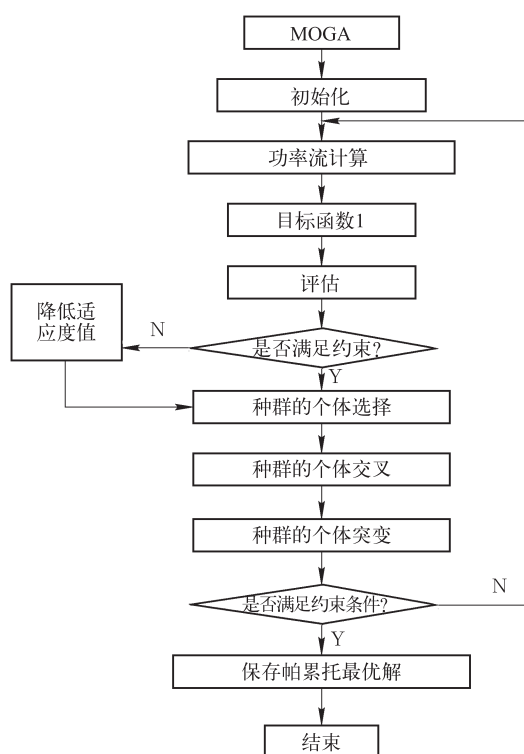


图3 MOGA算法流程图

Fig. 3 MOGA algorithm flowchart

- 2) 根据种群信息进行功率流计算。
- 3) 根据种群的信息计算每个个体的目标函数1并分配它们的适应值。
- 4) 如果计算过程中违反任何约束，则显著降低个体的适应值。
- 5) 基于个体的适应度值来执行父母的选择、交叉和变异，并生成下一个种群。
- 6) 如果满足终止准则，终止；否则返回步骤2)中计算。

3 停电计划仿真实验

为了验证本文所提出的方法，使用IEEE EAST 10-machine-O/V总线系统模型进行了仿真，如图4所示。

3.1 仿真模型的假设

图4中，计划停电的输电线路和发电机分别用交叉（×）和圆圈（○）表示。仿真基于以下几个前提条件假设：

- 1) 通过仿真需要确定表1中列出的两台发

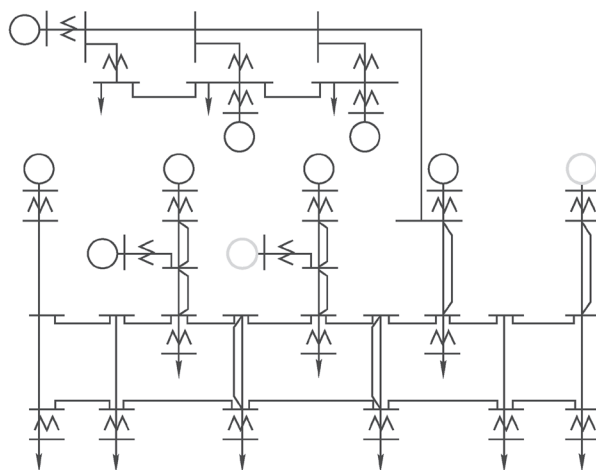


图4 IEEE EAST 10-machine-O/V系统模型

Fig. 4 IEEE EAST 10-machine-O/V system model

电机（G5和G6）和一条输电线路（L31）的停电计划。停电发生在一个星期内，每个设备停电一天。

表1 停电设备信息表

Tab. 1 Outage equipment information

停电单元	母线起点	母线终点	电力生产	额定容量/kW	时长/h
G5	5	—	Hydro	6 000	24
G6	6	—	Coal	11 000	24
L31	17	31	—	—	24

2) 停电工程通常在春季或秋季进行，此时电力需求较低，因此模拟基于10月的模拟周负荷曲线如图5所示。在模拟中也考虑了该负载曲线的日峰值。

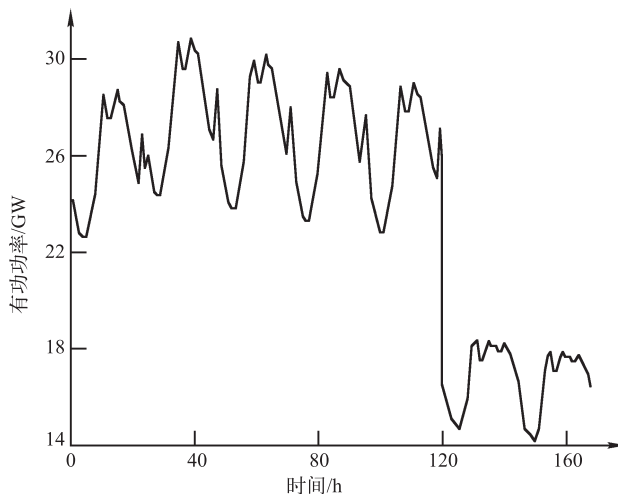


图5 10月份的周负荷曲线

Fig. 5 Simulated weekly load curve for october

3) 假设核电站的输出是恒定的, 根据文献[9]的相关资料设置其他发电机类型、并联电容器量和变压器的上下限。此外, 发电机与单位承诺成本的恒定燃料成本和CO₂排放量是从文献[9-11]估计的。

4) MOGA参数信息如表2所示, 帕累托最优原则是节约型帕累托解决方案。

表2 MOGA参数信息表

Tab. 2 MOGA parameter information table

参数	数值
种群数	700
世代数	100
迭代数	100
交叉率	0.9
突变率	0.01
共享率之和	0.01

3.2 仿真结果

采用本文提出的方法得到的仿真结果如图6所示, 其中黑色实心圆形表示帕累托最优解, 而交叉(×)表示支配解。水平轴代表CO₂排放, 垂直轴代表总成本, 包括燃料和单位承担成本, 有计算结果可以看出CO₂排放与成本之间的权衡关系, 并且采用本文提出的方法可以正确地取得最优解。图6中用椭圆形标注的是通过计算得到的3个停运计划。

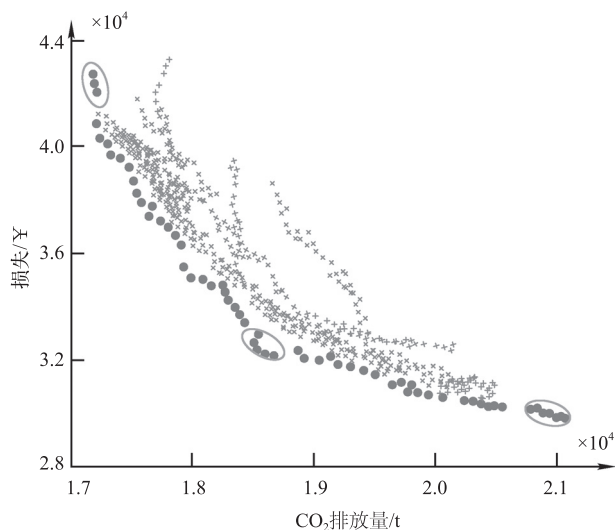


图6 基于改进方法的各种停电计划帕累托最优集

Fig. 6 Pareto-optimal sets of each outage plan by proposed method

第一个停运计划如表3所示。其中成本和

CO₂排放性平衡良好, 取图6中间位置的椭圆。

表3 第一种停电计划

Tab. 3 The first kind of outage plan

停电单元	周一	周二	周三	周四	周五	周六	周天
G5							
G6							
L31							

第二个停运计划如表4所示。其中成本达到了最小化, 取自图6中右下角所示的椭圆形。

表4 第二种停电计划

Tab. 4 The second kind of outage plan

停电单元	周一	周二	周三	周四	周五	周六	周天
G5							
G6							
L31							

第三个停电计划如表5所示。其中CO₂排放达到了最小化, 取自图6左上方的椭圆形。

表5 第三种停电计划

Tab. 5 The thrid kind of outage plan

停电单元	周一	周二	周三	周四	周五	周六	周天
G5							
G6							
L31							

表3~表5中的阴影单元表示电力设施的停电日。由表3~表5中可见每个计划的总成本和CO₂排放差别很大, 这些差异主要来源于修改约束以满足发电输出, 同时停电日期的变化也会引起差别。

根据表3~表5的结果, 负责电力系统运行工作的决策者就可以从帕累托最优解中选择合适的停电计划来执行。

4 结束语

本文提出了一种基于MOGA的停电规划方法, 该方法成功地提取出停电工程的帕累托最优解, 从而帮助电网运营人员制订合适的停电计划。采用本文所提出的方法, 主要是通过MOGA实现多目标问题的最小化, 优化目标包含有电压偏离标准数值的程度、线路传输损耗、CO₂排放量、燃料成本和投运设备的单位损耗, 然后通过算法自动生成停电计划, 仿真实验结果表明本文提出的方法在CO₂排放和设备投

运成本方面实现了帕累托最优。

参考文献

- [1] 彭春华, 刘兵, 孙惠娟. 基于分类不确定性集合的电力系统环境经济鲁棒调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2202-2212, 2399.
- [2] 雷振江, 李钊, 吕旭明, 等. 电力行业大数据应用建设及配网停电优化[J]. 电气应用, 2015(增刊2): 550-553.
- [3] 张斌. 基于可靠性的停电优化决策研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [4] L Peijun, Z Xiaoyu, Z Jiali, et al. Research and implementation of outage plan system for reliability and clean energy consumptive power constraint[J]. Journal of Engineering, 2017, 2017(13): 949-954.
- [5] 句荣滨, 王巍, 孙畅岑, 等. 基于电力调度大数据的状态估计智能分析技术[J]. 东北电力技术, 2020, 41(3): 1-4.
- [6] BROGLIO R, SCHECK H. Outage management 101: identify, plan, execute, review[J]. Power Engineering, 2015, 119(11): 46, 48, 50-52.
- [7] LI X H, LI L, ZHAO Y, et al. Multi-objective optimized trade of generation rights considering non-plan outage and repair[J]. Power System Protection & Control, 2010, 38(13): 35-39, 45.
- [8] KATO T, HAMADA D, HAYAKAWA N, et al. Potential capacity of independent power producers (IPP's) with consideration for reduction in CO₂ emission in electric power industry[J]. IEEE Transactions on Power & Energy, 1999, 119.
- [9] HAYASHI Y. Determination of optimal system configuration for Japanese power system model[C]. Transmission & Distribution Conference & Exhibition, Asia Pacific IEEE/PES, 2002.
- [10] HSIAO Y T, LIU C C, CHIANG H D, et al. A new approach for optimal var sources planning in large scale electric power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(3): 988-996.
- [11] GRIGG C, WONG P, ALBRECHT P, et al. The IEEE reliability test system-1996. a report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 1010-1020.

作者简介



蔡智洋

蔡智洋(1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事电网运行策划工作。

(收稿日期: 2019-09-26) **EA**