

DOI: 10.7667/PSPC170006

# 基于模糊多目标优化的电动汽车充电网络规划

丁丹军<sup>1</sup>, 戴康<sup>1</sup>, 张新松<sup>2</sup>, 顾菊平<sup>2</sup>, 周辉<sup>2</sup>, 钱科军<sup>1</sup>

(1. 国网江苏省电力公司苏州供电公司, 江苏 苏州 215004; 2. 南通大学电气工程学院, 江苏 南通 226019)

**摘要:** 电动汽车充电网络规划对电动汽车发展具有重要意义, 直接影响了车辆使用的便利性与配电网络运行的经济性。为此, 建立了同时考虑充电网络服务能力最大化与配电系统网络损耗最小化的电动汽车充电网络规划模型。该模型是典型的多目标优化问题, 且两个优化目标具有不同维度, 并可能互相冲突, 很难在优化中互相协调。因此, 通过定义目标隶属度函数对模型中的子优化目标进行模糊化, 将原始优化问题转换为基于最大满意度的单目标优化问题, 并采用遗传算法对其求解。以25节点交通网络以及IEEE33节点配电系统为例进行了仿真试验, 验证了所提模型及求解方法的有效性。

**关键词:** 充电网络规划; 服务能力最大化; 网络损耗最小化; 模糊多目标优化; 遗传算法

## Network planning for electric vehicle charging based on fuzzy multi-objective optimization

DING Danjun<sup>1</sup>, DAI Kang<sup>1</sup>, ZHANG Xinsong<sup>2</sup>, GU Juping<sup>2</sup>, ZHOU Hui<sup>2</sup>, QIAN Kejun<sup>1</sup>

(1. Suzhou Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Company, Suzhou 215004, China;

2. School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

**Abstract:** Network planning for Electric Vehicle (EV) charging is of importance to the development of EV and has direct impacts on the convenience of EV owners and the economic performance of distribution systems. An EV charging network planning model is proposed to maximize charging service capacity and to minimize energy losses in distribution systems. The model proposed is a typical multi-objective decision-making model, and two optimization objects of which are of different dimensions and might be inherent conflicting each other. As a result, they can not get their optimal results simultaneously. The original planning model is transformed into a single objective optimization problem based on maximum satisfaction degree by fuzzy processing two optimization objects through defining objective membership functions. The single objective optimization problem is then solved by Genetic Algorithm (GA). In the end, a 25-node traffic network and IEEE33 node distribution system are utilized to justify the formulation and solving technique presented here.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607098 and No. 61673226) Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGJSSZ00FZWT1601138).

**Key words:** charging network planning; service capacity maximization; energy losses minimization; fuzzy multi-objective optimization; genetic algorithm

## 0 引言

近年来, 随着化石能源的逐渐枯竭与环境污染的日益加剧, 世界各国对发展以电动汽车(Electric Vehicle, EV)为代表的清洁能源交通工具给予了足够重视。我国政府也推出了一系列促进新能源汽车

发展的优惠政策, 刺激了包括EV在内的新能源汽车市场的增长<sup>[1]</sup>。2012年, 我国销售新能源汽车共1.2791万辆, 其中纯电动汽车为1.1375万辆, 2013年销售量达到1.76万辆, 2014年电动汽车销售量突破7.5万辆。2012年, 科技部出台了《电动汽车科技发展“十二五”专项规划》, 提出到2015年左右, 在20个以上示范城市和周边区域建成由40万个充电桩、2000个充换电站构成的网络化供电体系, 满足电动汽车大规模商业化运行的能源供给需求<sup>[2]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金(51607098, 61673226); 国家电网公司科技项目(SGJSSZ00FZWT1601138)

充电网络完善程度是 EV 能否普及的关键因素之一,若充电网络的空间覆盖不足,将在很大程度上影响 EV 车主出行的便利性,进而降低购买意愿<sup>[3]</sup>。此外, EV 充电网络是配电网中的重要新增负荷,将在很大程度上改变配电网负荷的时、空分布,若 EV 充电网络规划不当,将恶化配电网电能质量,并大幅度增加配电网损耗。

充电网络规划可分为充电站选址优化<sup>[4-5]</sup>与容量规划<sup>[6]</sup>两个子问题,国内外学者已对此问题进行了深入研究,并取得了丰硕的成果。在总结我国充电站建设现状的基础上,文献[7]分析了影响充电网络规划的因素,并给出了规划参考原则。文献[8]利用交通路网车流量信息估算充电站容量,提出了以充电站净现值收益最大为目标的充电网络规划模型,同时对充电站位置与容量进行优化。文献[9]在研究中考虑了路网结构、车流信息和用户路程损耗等因素的影响,并利用伏罗诺伊(Voronoi)图划分充电站的服务范围。文献[10]将选址和定容两个子问题分别单独处理,通过两步筛选法确定充电站候选位置。文献[11]综合考虑了充电站建设运营成本和充电者充电成本,构造了基于充电站综合成本最小的充电网络规划模型。从现有研究内容看,电动汽车充电网络规划的基本理论与方法已大致形成,但也存在不足,如规划模型考虑的优化目标单一,未能综合考虑交通路网、电力网络 and 用户需求等,得到的优化结果较为简单,说服力小。

在现有研究工作的基础上,本文综合考虑充电站作为公共服务设施以及大型用电设施的双重特点,提出了同时考虑充电网络服务能力(即截取车流量)最大化与配电网损耗最小化的充电网络多目标规划模型,并考虑了包括配电网电压偏差约束在内的一系列约束条件。模型中,子规划目标具有不同维度,相互之间的关系很难确定,并可能互相冲突,为便于模型求解,本文采用模糊数学方法将原始多目标优化问题转化为基于最大满意度的单目标优化问题<sup>[12]</sup>。接着,采用基于实数编码的遗传算法(Genetic Algorithm, GA)对其进行求解。最后,以 25 节点交通网络<sup>[13]</sup>和 IEEE33 节点配电系统<sup>[14]</sup>为例,对所提出的模型及算法进行验证。

## 1 网络服务能力模型

现阶段,通常基于点需求模型或流量需求模型对充电网络的服务能力进行描述<sup>[13, 15]</sup>,并在此基础上进行充电服务设施选址优化。点需求模型中,假定车主充电需求均发生在住所和工作场所等附近的重要节点,而忽略了行使中的充电需求,具有较大

的局限性。因此,本文采用流量需求模型描述 EV 充电需求,具体如下文所述。

与点需求模型不同,流量需求模型采用路径车流量表示充电需求,而不再局限于网络中的重要节点,其优化目标为服务设施所能截获的车流量最大<sup>[13]</sup>,即

$$\max \sum_{q \in Q} f_q y_q \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_i^n x_i = p \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} x_i = y_q \quad q \in Q \quad (3)$$

$$y_q, x_i \in \{0, 1\} \quad q \in Q, i \in N \quad (4)$$

式中:  $y_q$  为表征线路  $q$  上车流量能否被充电网络截获的二进制变量,“1”表示可被截获,“0”表示不被截获;  $f_q$  为线路  $q$  上的车流量;  $x_i$  为表示是否在节点  $i$  建设服务设施的二进制变量,建设则  $x_i = 1$ , 否则  $x_i = 0$ ;  $p$  为服务设施个数;  $Q$  为所有线路  $q$  的集合;  $N$  为所有节点  $i$  的集合。

相较于点需求模型,流量需求模型能更好应对消费者在行驶过程中随时产生的需求,可以更加便利地为消费者提供服务。对 EV 充电网络规划这一特定问题来说, EV 电池可能在行使途中耗尽,无法到点需求模型中规划的大型节点充电站进行充电。因此,本文采用流量需求模型截获的车流量模拟 EV 充电需求,充电网络可有效截获的车流量越多,则认为其服务能力越强。

对于任一交通网络,可假定其由多条最短 O-D (Origin-destination) 线路交叉分布形成,这些 O-D 线路通过的节点和距离可通过 Floyd 算法<sup>[16]</sup>求出,线路  $q$  的车流量可以通过重力空间互动模型<sup>[13]</sup>求得,具体如式(5)所示。

$$f_q = \frac{W_O W_D}{1.5 d_q} \quad q \in Q \quad (5)$$

式中:  $W_O$  为线路  $q$  起点 O 的权重;  $W_D$  为线路  $q$  终点 D 的权重;  $d_q$  为线路  $q$  的距离。

## 2 EV 充电网络优化规划模型

### 2.1 目标函数

#### (1) 充电服务能力最大化

充电服务能力最大化是充电网络规划的首要目标。本文以充电网络截获的线路车流量之和衡量充电服务能力,因此,模型存在如下优化目标:

$$\max F_c = \sum_{q \in Q} f_q y_q \quad (6)$$

需要注意的是, 对 EV 充电网络优化来说, 二进制变量  $y_q$  的确定与 EV 满电状态下的最大行驶路程  $L$ 、线路  $q$  上各个节点间的距离以及充电站在线路  $q$  上的建设位置有关, 具体确定方法可参照文献[17], 此处不再赘述。

### (2) 配电系统网损最小化

作为大功率负荷, 充电站将改变配电网负荷的时、空分布, 进而可能导致配电系统的网络损耗增加<sup>[18]</sup>。因此, 尽可能减少充电网络引起的配电网额外损耗也是充电网络规划所需要考虑的优化目标之一。本文将配电网损最小作为充电网络规划模型的另一个优化目标, 即

$$\min F_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{loss},i} \quad (7)$$

$$P_{\text{loss},i} = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} R_i \quad (8)$$

式中:  $P_{\text{loss},i}$  为配电网中支路  $i$  的功率损耗;  $n$  为支路数;  $P_i$  为支路  $i$  末端的有功负荷,  $Q_i$  为无功负荷;  $U_i$  为支路  $i$  的末端电压;  $R_i$  为支路  $i$  的电阻。

潮流分析是网络损耗计算的基础, 本文采用以支路网损为状态量的前推回代法计算配电网潮流, 其具体步骤可参照文献[19], 此处不再赘述。

## 2.2 约束条件

### (1) 充电站个数约束

考虑到市政规划中土地资源较为紧张, 为避免资源浪费, 提高土地利用效率, 在规划中应限制充电站建设数目, 如式(9)所示。

$$\sum_{i=1}^n X_i = N \quad (9)$$

式中:  $X_i$  为表征是否在节点  $i$  建设充电站的二进制变量, 取 1 表示该节点建设充电站, 0 表示不建设;  $N$  为规划的充电站个数。

### (2) 充电站容量约束

充电网络的总充电容量应能满足该规划区域所有 EV 的充电需求, 即存在如式(10)约束。

$$\sum_{i=1}^n X_i W_i \geq W_{\text{max}} \quad (10)$$

式中:  $W_i$  为节点  $i$  建设的充电站容量;  $W_{\text{max}}$  为规划区域最大充电需求。

### (3) 电压偏移约束

充电站接入可能导致配电网电压发生偏移, 为确保电能质量, 电压偏移必须限制在一定范围之内。

$$\frac{|U_i - U_N|}{U_N} \leq \alpha \quad \forall i \quad (11)$$

式中:  $U_i$  为节点  $i$  的电压;  $U_N$  为配电网的额定电压;  $\alpha$  为最大允许电压偏移。

### (4) 线路输电功率约束

$$P_l \leq P_{l,\text{max}} \quad (12)$$

式中:  $P_l$  为线路  $l$  的有功功率;  $P_{l,\text{max}}$  为线路  $l$  允许流过的最大功率。

## 3 模型求解

### 3.1 多目标的模糊化处理

如上文所述, EV 充电网络规划模型是典型的多目标优化问题, 子优化目标间的关系很难界定, 并且可能互相冲突, 难以在优化中相互协调。求解模型的关键是对多优化目标的处理<sup>[20]</sup>, 本文拟借助隶属度函数对模型中的两个子优化目标分别进行模糊化处理。选择合适的隶属度函数是子优化目标模糊化的前提, 如何选择合适的隶属度函数至今尚无统一的方法可循, 而是更多的依赖实践经验。参照文献[21]的做法, 本文选择降半  $\Gamma$  形隶属度函数对子优化目标进行模糊化, 具体如式(13)、式(14)所示。

$$\mu(F_c) = \begin{cases} \exp\left(\frac{F_c - F_1}{F_1}\right) & F_c \leq F_1 \\ 1 & F_c > F_1 \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu(F_{\text{loss}}) = \begin{cases} 1 & F_{\text{loss}} \leq F_2 \\ \exp\left(\frac{F_2 - F_{\text{loss}}}{F_2}\right) & F_{\text{loss}} > F_2 \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $F_1$  表示充电网络的最大服务能力, 即充电网络所能截获的最大理论车流量;  $F_2$  为配电网网络损耗的理论最小值。参数  $F_1$ 、 $F_2$  的确定方法将在 3.2 节中给予详细说明。

子优化目标模糊化后, 可定义满意度指标  $\mu$  来表示决策者对整个规划方案的满意程度:

$$\mu = \min\{\mu(F_c), \mu(F_{\text{loss}})\} \quad (15)$$

由此, 原始多目标优化问题转化为基于最大满意度指标  $\mu$  的单目标优化问题, 即:

$$\max \mu \quad (16)$$

$$\text{s.t. } F_c \leq F_1 \quad (17)$$

$$F_{\text{loss}} \geq F_2 \quad (18)$$

$$0 \leq \mu \leq 1 \quad (19)$$

至此, 式(6)一式(12)与式(16)一式(19)构成了基于最大满意度的 EV 充电网络规划模型。其中: 优化目标为式(16); 约束条件为式(9)一式(12)及式(17)一式(19)。

### 3.2 基于遗传算法的模型求解

近年来,作为一种可用于复杂系统优化的可靠算法,GA 在电力系统领域得到了广泛应用<sup>[22]</sup>。本文拟采用该算法对 EV 充电网络规划模型进行求解,具体说明如下。

#### (1) 染色体编码与适应度

结合充电网络规划问题的特点,本文采用图 1 所示的实数编码方案对优化问题进行编码。如图所示,染色体长度取为交通网络节点总数  $n$ ,码位  $i$  的取值  $j$  表示交通节点  $i$  处的充电站建设情况。若可建设的充电站有  $k$  类,则  $j=0, 1, 2, 3, \dots, k$ 。其中“0”表示该节点不建设充电站,取其他数值则表示在该节点建设某类充电站,如取值为“1”说明在该节点建设第 1 类充电站。显然,图 1 所示的染色体对应于一个充电网络建设方案。适应度衡量染色体对应规划方案的好坏,是决定种群进化方向的关键参数,可在优化目标的基础上确定。

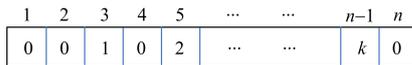


图 1 染色体编码示意图

Fig. 1 Scheme of chromosome coding

#### (2) 遗传操作算子

本文采取选择、交叉以及变异三种算子对种群进行遗传操作,具体描述如下。

**选择算子:**采用传统轮赛制选择方法产生下一代种群中的染色体。在父代种群中随机选取两个染色体,并选择其中适应度较大的个体复制到子代。上述过程重复进行,直至形成整个子代种群。

**交叉算子:**采用常规单点交叉操作,即以交叉概率  $p_c$  随机选择两条染色体与交叉位,然后进行交叉操作。

**变异算子:**以变异概率  $p_m$  对个体进行变异操作,具体如下:随机选取变异位置,将其取值等概率变异为其他建设状态。例如,若变异位置状态为 0,则将其等概率变异为  $1, 2, \dots, k$ 。

#### (3) 收敛判据

一般来讲,GA 何时收敛难以确定,本文事先设定最大进化代数  $G_{\max}$ ,一旦 GA 进化到该最大进化代数,即可认为 GA 收敛。

#### (4) 模型求解流程

首先,仅以充电网络服务能力最大为优化目标,通过 GA 计算充电网络所能截获的最大理论车流量  $F_{c,1}$  与对应的配电网损耗  $F_{\text{loss},1}$ ;接着,仅以配电网损耗最小为优化目标,通过 GA 计算配电网的最小理论网损  $F_{\text{loss},2}$  与对应的车流量  $F_{c,2}$ ;最后,

令  $F_1=F_{c,1}$ ,  $F_2=F_{\text{loss},2}$ 。在上述工作的基础上,以满意度  $\mu$  为优化目标,通过 GA 对充电网络规划模型进行求解,具体流程如图 2 所示。

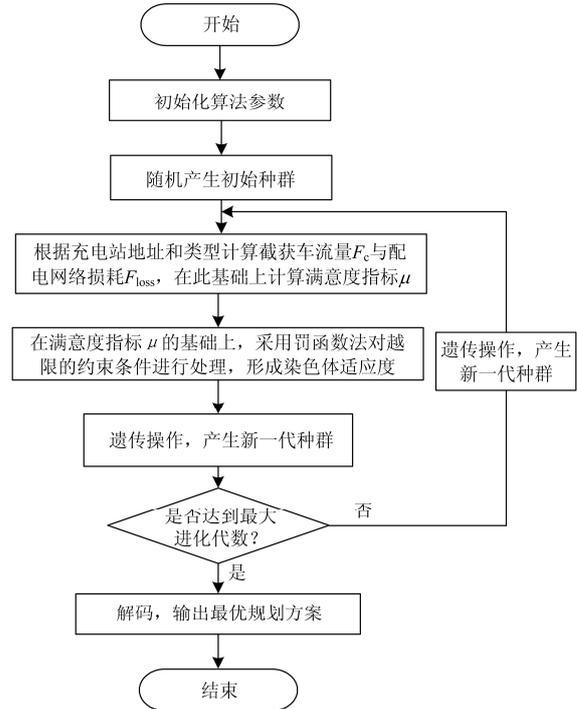


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the algorithm

## 4 算例

### 4.1 算例介绍

为验证本文所提模型及算法的有效性,此处以图 3、图 4 给出的 25 节点交通网络与 IEEE 33 节点配电系统为例进行仿真试验。一般来讲,交通网络中的重要节点同时也是配电系统中的重要负荷节点,如商场、汽车站和火车站等。因此,算例假定交通网络中的节点与配电系统中的节点互相重合,且交通网络中的首节点同时也是配电系统中的首节点,对于配电系统中不与交通网络重合的节点,算例暂不考虑。

设 EV 满电状态下最大行驶路程  $L=120$  km;允许建设的充电站个数  $N=4$ ;可供选择的充电站有 4 类(即  $k=4$ ),容量分别为 0.1 MW、0.2 MW、0.3 MW、0.4 MW;最大充电负荷需求  $W_{\max}$  设为 0.8 MW;电压最大允许偏移量  $\alpha$  设为 10%;交通网络中各交通节点的权重系数如表 1 所示<sup>[13]</sup>。

### 4.2 算例结果分析

为对模型子优化目标进行模糊化,首先需确定充电网络理论上可截获的最大车流量  $F_1$  与配电网

络的最小网损耗  $F_2$ , 即分别在仅考虑优化目标(6)、(7)的情况下采用 GA 对优化模型进行求解, 结果如图 5 与表 2 所示。

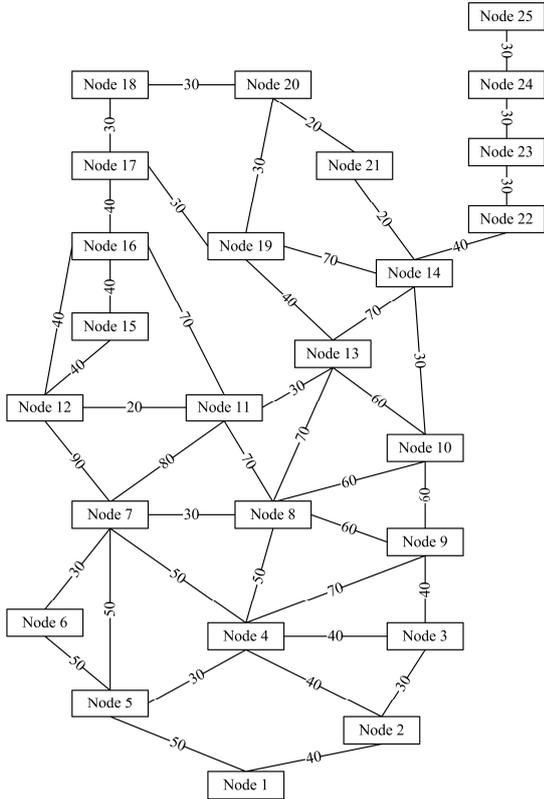


图 3 25 节点交通网络

Fig. 3 25 nodes traffic network

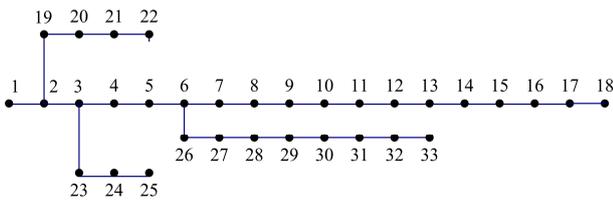


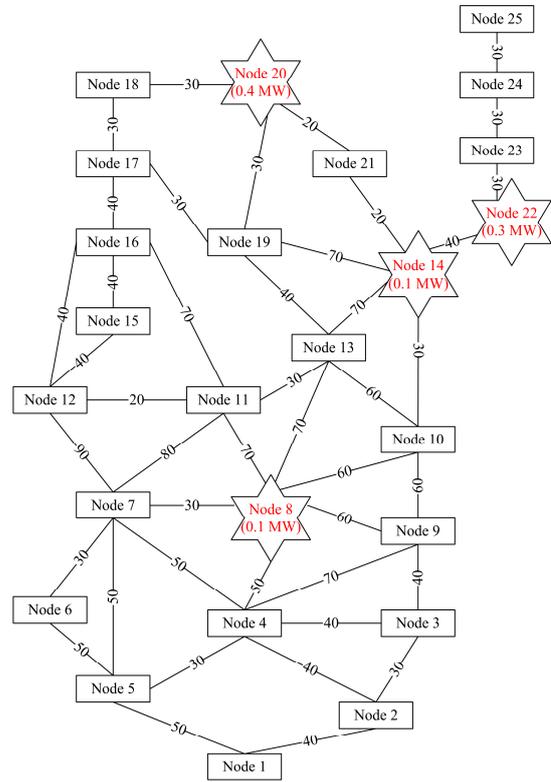
图 4 IEEE33 节点配电系统

Fig. 4 IEEE33 nodes distribution network

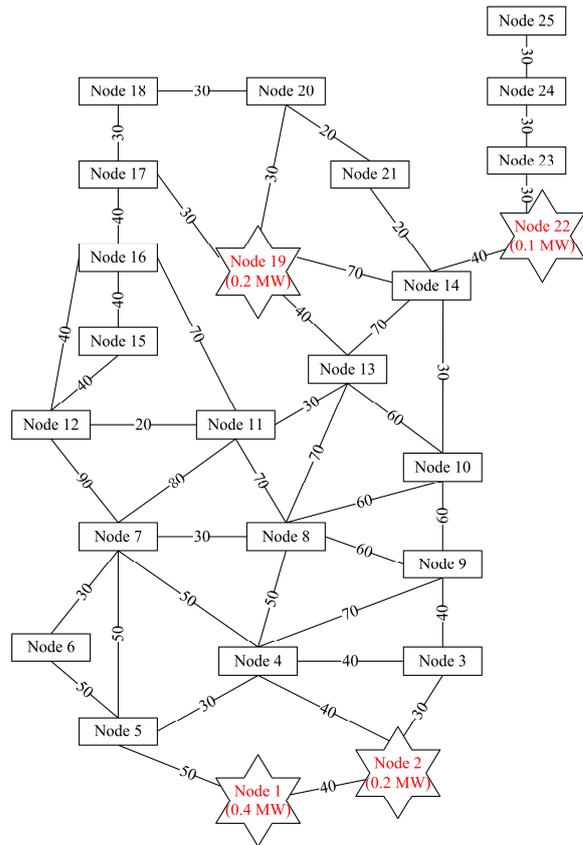
表 1 交通节点权重系数

Table 1 Weights of various traffic nodes

节点	权重	节点	权重	节点	权重
1	0.54	10	0.54	19	0.80
2	0.80	11	0.05	20	0.27
3	0.27	12	0.54	21	0.27
4	0.27	13	0.05	22	0.54
5	0.27	14	0.54	23	0.05
6	0.07	15	0.27	24	1.34
7	0.05	16	0.27	25	0.05
8	0.54	17	0.27	—	—
9	0.27	18	1.07	—	—



(a) 以车流量最大化为优化目标



(b) 以网损最小为优化目标

图 5 单目标优化结果

Fig. 5 Single objective optimization results

表 2 仅考虑子优化目标时的优化结果

Table 2 Optimization results only considering sub-objectives

优化目标	$F_c$	$F_{loss}/kW$	建设节点	建设类型
max $F_c$	0.1148	243.2980	[8 14 20 22]	[1 1 4 3]
min $F_{loss}$	0.0747	207.6273	[1 2 19 22]	[4 2 2 1]

从图 5 与表 2 给出的结果可看出,若在规划中仅考虑充电网络服务能力最大,则倾向于在交通网络中的枢纽节点(如图 5(a)中的节点 8、14、20 与 22)建设充电站,此时,充电网络截获的车流量可达到理论上的最大值  $F_{c,1}$ ,为 0.1148(约占总车流量的 37.7%),然而,此时配电网络中的网络损耗  $F_{loss,1}$  将偏大,达到 243.298 kW;反之,若在充电网络优化中仅考虑配电系统网络损耗最小这一目标,则更倾向于在配电系统的前端(即靠近电源点的位置,如图 5(b)中的节点 1、2、19 与 22)配置充电站,此时,配电系统网络损耗可达其理论上的最小值  $F_{loss,2}$ ,为 207.6273 kW,但充电网络可截获的车流量  $F_{c,2}$  却显著下降,仅为 0.0747(约占总车流量的 25.53%)。事实上,这两类节点在系统中往往并不重合,因此,规划模型的两个子优化目标在一定程度上互相冲突,很难同时到达最优。

在上述优化结果的基础上,可依据式(13)、式(14)将优化模型中的子优化目标分别进行模糊化,并在此基础上将原始多目标优化问题转换为基于最大满意度的单目标优化问题。接着,采用 GA 对该单目标优化模型进行求解,优化中,各进化代数最优规划方案的满意度如图 6 所示,最终优化结果如表 3、图 7 所示。

从图 6 可看出,进化中,种群最优个体的满意度稳步提高,并在 50 代之后达到最优值 0.90,这说明 GA 用于求解 EV 充电网络优化问题具有良好的收敛性。

从表 3、图 7 可看出:若在规划中同时考虑充电网络服务能力最大与配电系统网络损耗最小两个优化目标,则需在节点 1、19、21 与 22 分别配置 4

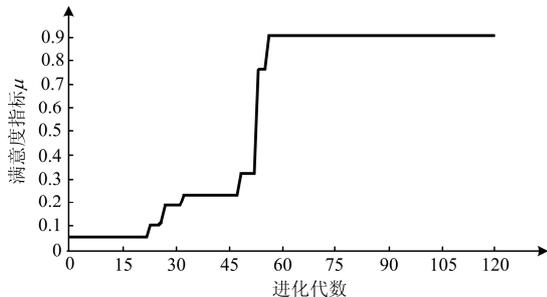


图 6 算法收敛性

Fig. 6 Convergence performance of the GA

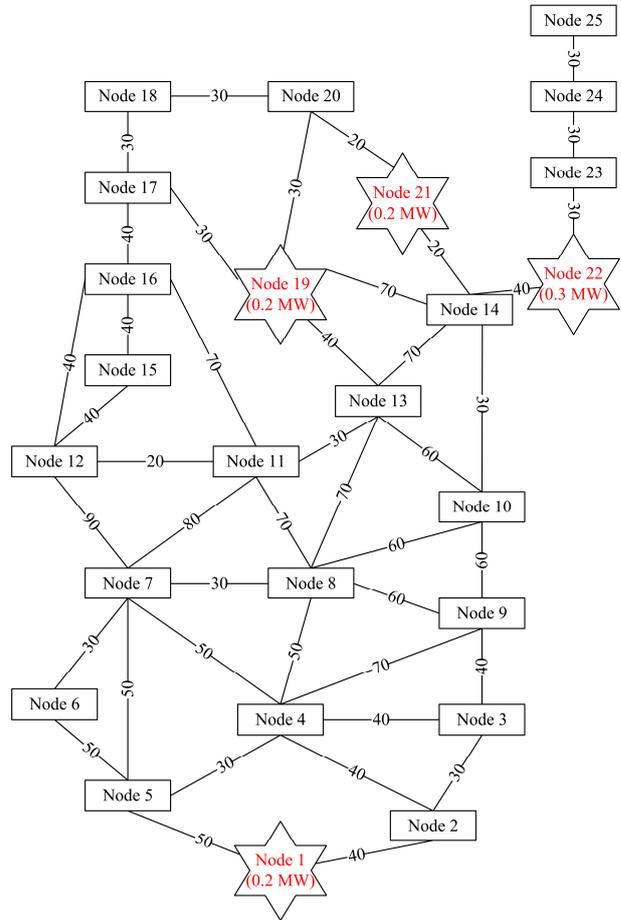


图 7 模糊多目标优化结果

Fig. 7 Fuzzy multi-objective optimization results

表 3 最大满意度优化时的优化结果

Table 3 Optimization results in maximum satisfaction degree optimization

$\mu(F_c)$	$\mu(F_{loss})$	$F_c$	$F_{loss}/kW$	建设节点	建设类型
0.90	0.96	0.1024	215.497	[1 19 21 22]	[2 2 2 3]

座容量分别为 0.2 MW 的充电站。此时,原始优化模型中两个子优化目标的隶属度分别为 0.90 与 0.96,整个优化问题的满意度为 0.90。进一步分析可发现:若采用模糊多目标优化方法对本文提出的充电网络规划模型进行求解,可获得较为合理的规划结果。此时,尽管每个子优化目标均没达到其理论上的最优值,但满意度均在 0.9 以上。具体来看,充电网络可截获的车流量从最大理论截获车流量 0.1148 下降为 0.1024,下降幅度为 10.8%,而配电网络损耗也同时由 243.2980 kW 大幅度减少为 215.497 kW,下降幅度为 11.39%。

## 5 总结与展望

本文提出了一种充电网络多目标规划模型,同

时考虑充电网络充电服务能力最大与配电网损耗最小两个不同维度的优化目标。此外,模型还考虑了充电站数量约束,配电网电压偏移约束等贴合工程实际的约束条件。采用模糊数学的方法对不同维度的子优化目标进行了模糊化处理,并在此基础上构建了基于最大满意度的单目标优化模型,采用遗传算法对其进行了求解。算例分析结果证明了本文所提模型及求解算法的有效性。

本文工作对 EV 充电站的选址和定容问题具有重要的理论指导价值。但本文未涉及充电站运营商所关心的收益问题,考虑充电站的投资运营成本和效益是下一阶段研究的重点。

### 参考文献

- [1] 佟晶晶, 温俊强, 王丹, 等. 基于分时电价的电动汽车多目标优化充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 17-23.  
TONG Jingjing, WEN Junqiang, WANG Dan, et al. Multi-objective optimization charging strategy for plug-in electric vehicles based on time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 17-23.
- [2] 中华人民共和国科学技术部. 电动汽车科技发展“十二五”专项规划[S]. 2012.
- [3] UPCHURCH C, KUBY M. Comparing the P-median and flow-refueling models for locating alternative-fuel stations[J]. Journal of Transport Geography, 2010, 18(6): 750-758.
- [4] DONG J, LIU C, LIN Z. Charging infrastructure planning for promoting battery electric vehicles: an activity-based approach using multi-day data[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 38: 44-55.
- [5] LAM A, LEUNG Y, CHU X. Electric vehicle charging station placement: formulation, complexity, and solutions[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(6): 2846-2856.
- [6] 路欣怡, 刘念, 唐庆峰, 等. 计及服务可用性的电动汽车换电站容量优化配置[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 77-83.  
LU Xinyi, LIU Nian, TANG Qingfeng, et al. Demand planning of electric vehicle battery swapping station considering service availability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 77-83.
- [7] 徐凡, 俞国勤, 顾临峰, 等. 电动汽车充电站布局规划浅析[J]. 华东电力, 2009, 37(10): 1678-1682.  
XU Fan, YU Guoqin, GU Linfeng, et al. Tentative analysis of layout of electrical vehicle charging stations[J]. East China Electric Power, 2009, 37(10): 1678-1682.
- [8] 黄小庆, 杨秀, 陈颀, 等. 基于 LCC 和量子遗传算法的电动汽车充电站优化规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 176-182.  
HUANG Xiaoqing, YANG Hang, CHEN Jie, et al. Optimal planning of electric vehicle charging stations based on life cycle cost and quantum genetic algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 176-182.
- [9] 葛少云, 冯亮, 刘洪, 等. 电动汽车充电站规划布局与选址方案的优化方法[J]. 中国电力, 2012, 45(11): 96-101.  
GE Shaoyun, FENG Liang, LIU Hong, et al. An optimization approach for the layout and location of electric vehicle charging stations[J]. Electric Power, 2012, 45(11): 96-101.
- [10] LIU Z, WEN F, LEDWICH G. Optimal planning of electric-vehicle charging stations in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 102-110.
- [11] 冯超, 周步祥, 林楠, 等. 电动汽车充电站规划的多种群混合遗传算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(6): 123-129.  
FENG Chao, ZHOU Buxiang, LIN Nan, et al. Electric vehicle charging station planning based on multiple-population hybrid genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(6): 123-129.
- [12] 刘志勇, 刘杨华, 林舜江, 等. 基于模糊多目标协调优化的配电网重构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 133-138.  
LIU Zhiyong, LIU Yanghua, LIN Shunjiang, et al. Fuzzy multi-objective coordination optimization for distribution network reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 133-138.
- [13] HODGSON M J. A flow capturing location-allocation model[J]. Geographical Analysis, 1990, 22(3): 270-279.
- [14] SINGH D, MISRA RK, SINGH D. Effect of load models in distributed generation planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 2204-2211.
- [15] HAKIMI. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph[J]. Operations Research, 1964(12): 450-459.
- [16] 胡桔州. Floyd 最短路径算法在配送中心选址中的应用[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2004, 30(4): 382-384.

- HU Juzhou. An algorithm for distribution center based on the Floyd-shortest-path[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science), 2004, 30(4): 382-384.
- [17] 王辉, 王贵斌, 赵俊华, 等. 考虑交通网络流量的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 63-69.
- WANG Hui, WANG Guibin, ZHAO Junhua, et al. Optimal planning for electric vehicle charging stations considering traffic network flows[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 63-69.
- [18] 厉志辉. 电动汽车充电站对电网影响[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- LI Zhihui. The impact of electric vehicle charging stations on the grid[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [19] 谢开贵, 周家启. 树状网络潮流计算的新算法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 116-120.
- XIE Kaigui, ZHOU Jiaqi. A new load flow algorithm for radial distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 116-120.
- [20] 张新松, 礼晓飞, 王运, 等. 不确定环境下考虑弃风的电力系统日前调度[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 43(24): 75-82.
- ZHANG Xinsong, LI Xiaofei, WANG Yun, et al. Day-ahead dispatch in consideration of wind power curtailments in uncertain environments[J]. Power System Protection and Control, 2016, 43(24): 75-82.
- [21] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 微网多目标经济调度优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 57-66.
- CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Microgrid multi-objective economic dispatch optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 57-66.
- [22] 张栋梁, 谢业华, 刘娟, 等. 基于遗传算法的有源电力滤波器滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 69-74.
- ZHANG Dongliang, XIE Yehua, LIU Juan, et al. Sliding mode control of active power filters based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 69-74.
- 
- 收稿日期: 2017-01-02; 修回日期: 2017-06-04
- 作者简介:
- 丁丹军(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事电网优化调度领域的管理、研究工作; E-mail: 13701576600@139.com
- 张新松(1980—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统规划运行、可再生能源发电以及储能技术. E-mail: prettypebble@163.com
- (编辑 葛艳娜)