

含分布式电源与充电站的配电网协调规划

吴万禄¹, 韦钢¹, 谢丽蓉², 张鑫³

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;

3. 上海浦海求实电力新技术有限公司, 上海 200090)

摘要: 分布式电源与电动汽车充电站共同接入配电网, 对配电网规划和运行具有重要的影响。提出一种综合协调规划方法, 该方法能够实现分布式电源选址定容、充电站位置及容量、配电网架建设和改造的综合优化规划。考虑风光资源和负荷的随机波动性, 以配电系统投资、运行维护和环境成本的随机期望值最小为目标, 建立了含分布式电源与充电站的配电网协调规划模型, 采用改进遗传算法进行求解。以一个待扩展的辐射状配电网为例, 仿真计算结果表明, 对含分布式电源与充电站的配电网进行综合协调规划, 能够提高电网的经济和环境效益, 得到的规划方案更为合理。

关键词: 分布式电源; 充电站; 配电网; 协调规划; 改进遗传算法

Coordinated planning of distribution network containing charging station and distributed generation

WU Wan-lu¹, WEI Gang¹, XIE Li-rong², ZHANG Xin³

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. College of Electric Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 3. Shanghai PUHAIQIUSHI Electric Power New Technology Limited Company, Shanghai 200090, China)

Abstract: The jointly accessing of distributed generation and electric vehicle charging stations to the distribution network has a significant impact on operation and planning. A comprehensive coordinated planning method is proposed, with which the optimized synthetic planning can be realized including sitting and sizing of distributed generation, position and capacity of charging station, and construction and retrofit of distribution network. Considering environmental factors, randomness of resources and load, the coordinated programming model of distribution network is presented. The objective is to minimize stochastic expected value of costs about investment, operation, maintenance and environment, and the model is solved by improved genetic algorithm. A radial distribution network for expansion is selected as the example. Simulation results show that the economic and environment benefits are effectively improved by the coordinated planning, and planning scheme obtained is more reasonable.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51264036) and Science and Technology of SGCC (No. 5209311200GW).

Key words: distributed generation; charging station; distribution network; coordinated planning; improved genetic algorithm

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)15-0065-09

0 引言

随着世界经济的不断发展, 能源危机和环境污染受到了各界的广泛关注^[1-2]。近年来, 由于分布式发电作为传统集中供电的一种有力补充, 具有清洁、环保和灵活等优势, 得到了快速的发展。此外, 电动汽车作为全新的一种交通工具, 在环保和节能方面具有重要的作用, 也得到了广泛的应用。为解决

能源和环境危机, 调整能源结构, 一些学者提出了建立电动汽车与分布式电源的有机集成系统, 降低二者单独接入电网造成的不良影响^[3-5]。然而现有的规划方法一般是将分布式电源、充电站与配电网架进行划分规划, 在完成分布式电源或充电站的选址定容之后, 再进行配电网架规划, 实际上任何一者的变化均会对规划结果产生影响。因此, 本文采用综合优化规划, 寻求分布式电源、充电站和配电网架相互协调下的最优规划方案。

目前, 国内外学者针对含分布式电源或充电站的配电网规划进行了许多研究, 但对含分布式电源

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51264036); 国家电网公司科技项目(5209311200GW)

与充电站的配电网进行综合协调规划的研究却较少。一些学者针对含分布式电源的配电网,考虑投资成本、有功损耗、可靠性等,进行了规划研究^[6-8]。文献[6]采用模糊变量表示负荷和分布式发电的不确定性,以模糊期望值最小为目标,建立模糊优化规划模型。文献[7]将改进粒子群算法应用于分布式电源的选址定容问题中,通过仿真分析验证了模型和算法的有效性。文献[8]考虑随机不确定性,对分布式电源的最佳安装位置和容量进行了研究。一些学者考虑充电特性、充电行为、城市规划、交通和电力网络等,建立了充电站规划模型^[9-12]。文献[13]提出了计及可入网电动汽车的风电和光伏的最优选址和定容模型,采用蒙特卡洛模拟进行仿真。文献[14]建立了考虑充电站布局优化的配电网规划模型,但未计及可再生能源的不确定性。文献[15]考虑电动汽车换电站充放电效率和电量平衡等约束,提出了机组组合优化模型,但未考虑环境等因素。综合分析现有研究成果,已有成果未能对含分布式电源与充电站的配电网进行综合协调规划,仅从分布式电源或充电站单方面进行规划,具有一定的局限性,事实上分布式电源与充电站规划方案的不同也会影响配电网架的建设和改造。

本文针对现有规划方法的不足,综合考虑含分布式电源与充电站的配电网协调规划。计及风、光、负荷的随机不确定性和环境效益,以配电系统总成本的随机期望值最小为目标,建立了综合协调规划模型,仿真分析验证了提出的综合协调规划方法的优越性和必要性。

1 不确定性的处理

1.1 负荷

负荷预测是配电网规划的重要依据,由于受到预测方法、历史数据以及未来因素的影响,预测结果存在不确定性。常常表现为多个方案,记第 i 种方案发生的概率为 $\lambda(i)$ 。则

$$\sum_{i=1}^M \lambda(i) = 1 \quad (1)$$

式中, M 为负荷预测方案总数。

假定各个方案存在一定大小的扰动量,则第 i 种方案的负荷真值为

$$\tilde{P}(i) = P(i) + \Delta P(i) \quad (2)$$

式中: $P(i)$ 为第 i 种方案值; $\Delta P(i)$ 为对应的扰动。

本文假设 $\Delta P(i)$ 服从正态分布,即

$$\Delta P(i) \sim N(\mu_{P(i)}, \sigma_{P(i)}^2) \quad (3)$$

式中, $\mu_{P(i)}$ 和 $\sigma_{P(i)}$ 为 $\Delta P(i)$ 对应的期望和标准差。

当各个方案之间相互独立时,负荷分布为多个随机正态分布的叠加,期望值和方差分别为

$$\mu_p = \sum_{i=1}^M [\lambda(i)(\mu_{P(i)} + P(i))] \quad (4)$$

$$\sigma_p^2 = \sum_{i=1}^M \lambda(i)\sigma_{P(i)}^2 \quad (5)$$

1.2 充电站的充放电功率

国家电网公司和南方电网公司明确了“集中充电,统一配送”的运营模式,通过换电站可实现充放电设施集中控制,但对潮流的影响也大。本文考虑电动汽车充电站的两种运行方式。

(1) 单向充电。电网向充电站充电,满足电动汽车的电池需求,充电站不向电网反向充电。

(2) 双向充放电。充电站根据电动汽车的电池需求和系统潮流约束,进行充电或放电。

据相关实验研究表明,在一段时间内,电动汽车的充放电功率可近似服从正态分布^[16],其充放电功率可表示为 $P_C \sim N(\mu_c, \sigma_c^2)$ 。

1.3 风力发电的输出功率

大量实验测试表明,风速近似服从 Weibull 分布,风电源输出功率与风速存在三次方的关系,可近似描述为线性函数^[8]。

由风速概率密度、风力发电功率与风速的关系可得输出功率的概率密度函数为

$$f(P_w) = \left(\frac{k}{k_1 c}\right) \left(\frac{P_w - k_2}{k_1 c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{P_w - k_2}{k_1 c}\right)^k\right] \quad (6)$$

$$k_1 = \frac{P_N}{v_r - v_{ci}} \quad (7)$$

$$k_2 = -k_1 v_{ci} \quad (8)$$

式中: c 和 k 分别为 Weibull 分布的尺度参数和形状参数; P_N 为额定功率; v_r 为额定风速; v_{ci} 为切入风速。

假定风机中的并联电容器可自动投切,从而保证功率因数恒定,则风电源吸收的无功功率为

$$Q_w = \frac{P_w}{\tan\varphi} \quad (9)$$

式中, φ 为功率因数角。

1.4 光伏电站的输出功率

据实验统计,一定时间内光照强度可认为服从

Beta 分布^[4], 光伏电站出力与光照强度的近似关系为

$$P_s = rA\eta \quad (10)$$

式中: r 为光照强度; A 为光伏阵列的面积; η 为光伏电站的光电转换效率。

光伏电站输出功率的概率密度函数为

$$f(P_s) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P_s}{\eta A r_{\max}} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_s}{\eta A r_{\max}} \right)^{\beta-1} \quad (11)$$

式中: α 和 β 均为形状参数; r_{\max} 为最大光强。

光伏电站由电容器补偿, 保证功率因数恒定, 无功功率也服从Beta分布。

2 配电网协调规划模型

本文综合考虑分布式电源、充电站和配电网架优化规划目标, 以配电系统投资、运行维护和环境成本的随机期望值最小为目标。

2.1 投资成本

配电网规划的投资成本包括新建线路、线路更换、充电站建设、安装分布式电源、新建变电站和变电站扩容等成本。

$$C_{\text{inv}}(x) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{ij} x_{\text{XIX}_{ij}} + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L C_{kl} x_{\text{GHX}_{kl}} + \sum_{s=1}^S (C_{E0} + C_e P_{EV_s}) x_{\text{XJC}_s} + \sum_{e=1}^E \sum_{f=1}^F C_{\text{REG}_{ef}} P_{\text{REG}_{ef}} x_{\text{REG}_{ef}} + \sum_{g=1}^G \sum_{h=1}^H (C_{B0} + C_b S_{\text{XJB}_{gh}}) x_{\text{XJB}_{gh}} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N C_b S_{\text{KRB}_{mn}} x_{\text{KRB}_{mn}} \quad (12)$$

式中: C_{ij} 为第 i 条线路第 j 种建设方案的费用; I 为待新建线路总数; J 为线路新建方案总数; C_{kl} 为第 k 条线路第 l 种更换方案的费用; K 为线路待更换总数; L 为线路更换方案总数; C_{E0} 为建设充电站的固定成本; C_e 为建设充电站的单位容量可变成本; P_{EV_s} 为 s 节点新建充电站的额定容量; S 为充电站备选站址总数; C_{REG_f} 为第 f 种分布式发电方案的单位容量成本; E 为可能安装分布式电源的节点总数; F 为分布式发电方案总和; $P_{\text{REG}_{ef}}$ 为 e 节点安装第 f 种分布式发电方案的额定容量; C_{B0} 为新建变电站的固定投资费用; C_b 为变电站单位容量费用; S_{gh} 为新建变电站容量; G 为可新建变电站节点总和; H 为新建变电站方案总和; S_{mn} 为变电站扩容容量; M 为现有变电站的节点总和; N 为可能扩容方案总和; $x_{\text{XIX}_{ij}}$ 、 $x_{\text{GHX}_{kl}}$ 、 x_{XJC_s} 、 $x_{\text{REG}_{ef}}$ 、 $x_{\text{XJB}_{gh}}$ 、 $x_{\text{KRB}_{mn}}$ 为 0-1 决策变量。

2.2 运行维护成本

运行维护成本包括电动汽车充电站、风电源和光伏电站的年运行维护费, 以及每年从上级电网购电的费用。

$$C_{\text{ope}}(x) = \sum_{s=1}^S P_{EV_s} C_{C0} x_{\text{XJC}_s} + \sum_{e=1}^E \sum_{f=1}^F P_{\text{REG}_{ef}} C_{\text{REG}_{ef}} x_{\text{REG}_{ef}} + p\tau\tau_{\text{buy}} \quad (13)$$

式中: C_{C0} 为充电站的单位容量年运行费用; C_{REG_f} 为第 f 种分布式发电方案的单位容量年运行成本; P_{buy} 为配电系统从上级电网购电的有功功率; p 为单位电价; τ 为年最大负荷利用小时数。

2.3 环境成本

考虑电力工业发电技术产生的污染物(包括 SO_2 、 NO_x 、 CO_2 、 CO 和 TSP)的环境价值和污染物排放惩罚, 计算表达式为

$$C_e = \sum_{z=1}^Z \sum_{t=1}^T ((V_{e_t} + V_t) Q_{z_t} P_{z_t}) \quad (14)$$

式中: Z 为发电技术的种类数; T 为考虑的污染物种类; V_{e_t} 为第 t 类污染物的环境价值; V_t 为第 t 类污染物的单位排放量罚款额; Q_{z_t} 为第 z 类发电技术生产单位电量的第 t 类污染物排放量; P_z 为第 z 类发电技术的年发电量。

2.4 目标函数

配电网综合协调规划属于多目标优化规划, 为此将多目标转化为单目标, 目标函数记为

$$\min f = E(aC_{\text{inv}}(x) + C_{\text{ope}}(x) + C_e) \quad (15)$$

$$a = \frac{r_0(1+r_0)^Y}{(1+r_0)^Y - 1} \quad (16)$$

式中: E 为随机期望值算子; a 为投资成本的年平均系数; r_0 为贴现率; Y 为设备的投资偿还期。

2.5 优化变量

本文的优化规划是一个复杂的多变量优化问题, 采用混合编码方式, 基因编码如式(17)所示。

$$X = [A|B|C|D|E|F] \quad (17)$$

式中: A 和 B 采用十进制编码; A 表示配电网网架结构, 通过随机生成树策略产生, 满足配电网辐射状约束和连通性; B 为待选充电站节点的装机容量; C 、 D 、 E 、 F 采用二进制编码; C 表示待更换线路是否更换; D 为待选节点是否安装分布式电源; E

为分布式电源的安装容量； F 表示变电站是否需要扩容。

2.6 约束条件

1) 潮流约束条件

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (18)$$

式中： P_i 和 Q_i 为节点 i 的注入有功、无功功率； V_i 为节点 i 的电压幅值； G_{ij} 为支路电导； B_{ij} 为支路电纳； θ_{ij} 为节点 i, j 的电压相角差。

2) 供电能力要求约束

$$E \left(S_0 + \sum_{g=1}^G \sum_{h=1}^H S_{XJB_{gh}} x_{XJB_{gh}} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S_{KRB_{mn}} x_{KRB_{mn}} + \lambda \sum_{e=1}^E \sum_{f=1}^F P_{REG_{ef}} x_{REG_{ef}} - \lambda \sum_{i=1}^R g_i \right) \geq 0 \quad (19)$$

式中： S_0 为现有变电站容量； λ 为区域容载比； g_i 为节点 i 的有功负荷； R 为节点总数。

3) 节点电压机会约束

$$P_r \{ V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \} \geq \beta_1 \quad (20)$$

式中： V_{\max} 和 V_{\min} 为第 i 个节点允许电压的上下限； $P_r\{\cdot\}$ 表示 $\{\cdot\}$ 中事件成立的概率； β_1 为电压约束的置信水平。

4) 支路传输功率机会约束

$$P_r \{ |P_l| \leq P_{l\max} \} \geq \beta_2 \quad (21)$$

式中： P_l 为各支路传输功率； $P_{l\max}$ 为线路 l 的传输功率上限； β_2 为支路功率约束的置信水平。

5) 电动汽车充电站的容量需求约束

$$\sum_{s=1}^S P_{EV_s} \geq P_{\text{demand}} \quad (22)$$

式中， P_{demand} 为电动汽车的充电容量需求，根据规划水平年的电动汽车电池组需求来确定。

6) 充电站容量约束

对于节点充电站，其建设规模必须满足节点容量的上下限约束。

$$P_{\max_s} \geq P_{EV_s} \geq P_{\min_s} \quad (23)$$

式中， P_{\max_s} 、 P_{\min_s} 分别为节点 s 充电站安装容量上下限。

7) 分布式电源安装容量约束

$$E \left(\sum_{e=1}^E \sum_{f=1}^F P_{REG_{ef}} x_{REG_{ef}} \right) \leq \sigma S_{l\max} \quad (24)$$

式中： $S_{l\max}$ 为配电系统最大负荷； σ 为分布式电源安装容量占最大负荷的比例上限。

8) 变量逻辑约束

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J x_{XJX_{ij}} \leq 1; \quad \sum_{l=1}^L x_{GHX_{kl}} \leq 1; \\ \sum_{f=1}^F x_{REG_{ef}} \leq 1; \quad \sum_{h=1}^H x_{XJB_{gh}} \leq 1; \quad \sum_{n=1}^N x_{KRB_{mn}} \leq 1 \end{aligned} \quad (25)$$

式(25)为逻辑约束条件，表示每种投资方案最多被选用一次。

9) 配电网网架结构约束

网架结构是配电网的重要组成部分，为了保证规划结果的可行性，规划方案必须严格满足网架联通性和辐射状约束。

3 求解方法

3.1 随机潮流

采用基于半不变量法的随机潮流计算节点电压和支路功率的概率分布，假设各节点注入功率之间相互独立。节点功率方程和支路潮流方程分别概括为

$$S = f(X) \quad (26)$$

$$Z = g(X) \quad (27)$$

式中： S 为节点注入功率； Z 为支路传输功率； X 为节点电压幅值和相角。

将上式按泰勒级数展开并忽略高次项得

$$S_0 + \Delta S = f(X_0) + J_0 \Delta X \quad (28)$$

$$Z_0 + \Delta Z = g(X_0) + G_0 \Delta X \quad (29)$$

式中： S_0 、 Z_0 、 X_0 分别为 S 、 Z 、 X 的期望值； ΔS 、 ΔZ 、 ΔX 为相应的扰动量。

$$\Delta X = J_0^{-1} \Delta S \quad (30)$$

$$\Delta Z = G_0 J_0^{-1} \Delta S \quad (31)$$

根据独立随机变量的半不变量的性质，求得 ΔX 和 ΔZ 的各阶半不变量为

$$\Delta X^{(k)} = J_0^{-1(k)} \Delta S^{(k)} \quad (32)$$

$$\Delta Z^{(k)} = (G_0 J_0^{-1})^{(k)} \Delta S^{(k)} \quad (33)$$

式中， $J_0^{-1(k)}$ 、 $(G_0 J_0^{-1})^{(k)}$ 分别为矩阵 J_0^{-1} 与 $G_0 J_0^{-1}$ 中元素 k 次幂构成的矩阵。

再应用 Gram-Charlier 级数展开式^[4]，就可以得到 ΔX 和 ΔZ 的概率分布和概率密度函数，最后分别平移 X_0 和 Z_0 个单位，得到状态变量和支路潮流的

概率分布和越限概率。

3.2 改进遗传算法

采用基于混合基因编码的改进遗传算法进行求解, 根据种群和个体的适应度调整交叉和变异算子。具体求解流程如图 1 所示。

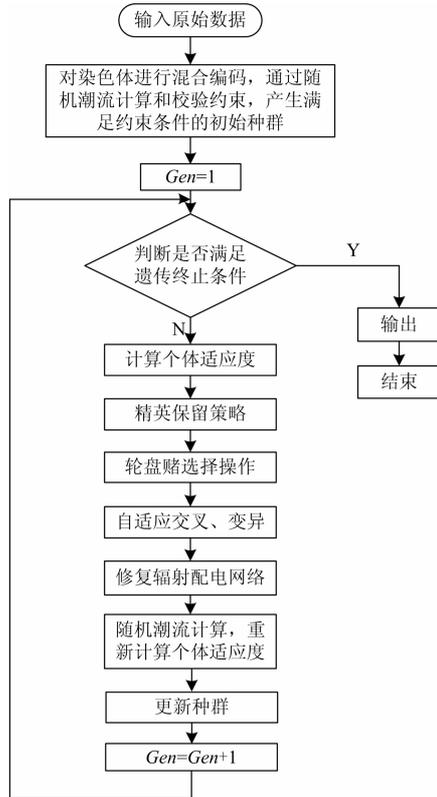


图 1 改进遗传算法流程图

Fig. 1 Procedure of improved genetic algorithm

在遗传操作中, 交叉和变异概率是影响算法搜索性能的关键, 概率过大将破坏遗传模式, 过小将导致搜索进程缓慢, 本文对染色体的交叉和变异算子进行如下调整。

$$P_c = \begin{cases} k_1 - \frac{(k_1 - k_2)(f_{\max} - f)}{(f_{\max} - f_{\text{avg}})}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ k_1, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (34)$$

$$P_m = \begin{cases} k_3 - \frac{(k_3 - k_4)(f_{\max} - f)}{(f_{\max} - f_{\text{avg}})}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ k_3, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (35)$$

式中: P_c 、 P_m 分别为交叉和变异概率; f_{\max} 为种群最大适应值; f_{avg} 为平均适应值; f 为父本与母本中较大适应值; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 均为常数。

本文求解过程中的具体参数为: 初始种群规模为 100; 遗传代数 100; 交叉算子 $k_1=0.6$ 、 $k_2=0.3$;

变异算子 $k_3=0.1$ 、 $k_4=0.05$ 。

4 算例分析

4.1 算例概况

采用文献[6]中算例, 电压等级为 10 kV, 初始配电网架有 5 个节点、4 条支路, 需扩展为 13 节点的辐射型网络, 具体网架结构和线路参数参见文献[6], 各节点负荷由负荷预测求得, 见附表 A1。

为了验证提出的规划模型和方法, 基于以下假设进行实例分析。

- (1) 根据电动汽车的电池需求确定充电容量需求, 这里假设规划年充电容量需求为 1 MW;
- (2) 假设充电站备选节点 3-4-6-7-8, 在备选节点处投资建设充电站是可行的;
- (3) 设定节点 4~9 可接入风力发电, 额定容量选择 300 kW 或 500 kW, 节点 10~13 可接入光伏电站, 容量选择 100 kW 或 200 kW。

线路和设备的投资偿还款 $Y=20$, 贴现率 $r_0=0.1$, 年最大负荷利用小时数 $\tau=4\ 760$, 分布式电源接入比例不超过最大负荷的 25%, 节点电压和支路功率的置信水平取 0.9, 单位电价 $p=0.5$ 元/kWh, 将充电站和分布式电源看成 PQ 节点处理, 功率因数取 0.9。风力发电的切入风速为 3.0 m/s, 额定风速为 14 m/s, 切出风速为 25.0 m/s, 太阳能电池单个组件面积为 2.16 m², 光电转换效率为 13.44%。采用的风速和光照强度由 HOMER 软件对上海地区(纬度: 31.08°N, 经度: 121.35°E)进行模拟得到, 风光资源的随机分布参数也由 HOMER 软件模拟得到。充电站、风光电源等投资运行费用参数参见附表 A2, 火力发电行业污染物排放率与环境成本参见文献[17]。

4.2 结果分析

采用本文提出的模型和算法, 分四种情形进行配电网规划研究。Case1 为含分布式电源与充电站的配电网综合协调规划; Case2 不考虑分布式电源规划, 进行含充电站的配电网规划; Case3 将各个充电站的规划容量设定为固定值 200 kW; Case4 先进行配电网架规划, 完成配电网架规划后再进行分布式电源与充电站规划。

Case1 综合协调规划结果为: 年综合投资成本为 681.8 万元, 年运行维护费用为 1 627.6 万元, 节点 3、4、6、7 充电站规划容量分别为 294 kW、280 kW、264 kW、162 kW, 风电装机容量为 2.3 MW, 光伏装机容量为 0.1 MW, 网架结构如图 2 所示。

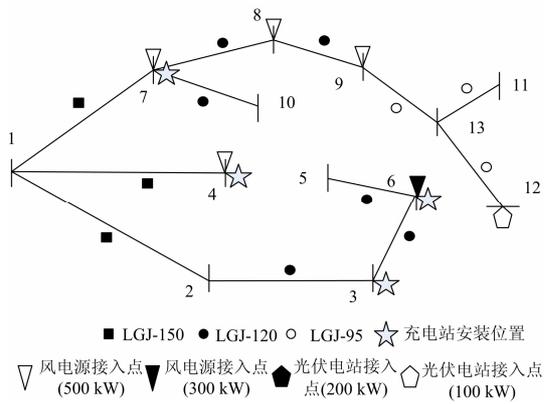


图 2 Case1 的规划网架结构图

Fig. 2 Network planning structure for Case1

下面给出置信水平取 0.9 时，经随机潮流计算得到的节点电压和支路功率的越限情况，其中节点 3、5、6、9、10、11、12、13 出现了电压越限，具体见表 1，支路传输功率均未出现越限。

表 1 节点电压越限概率

Table 1 Off-limit probability of the node voltage

节点编号	3	5	6	9
电压越限概率	0.3%	7.1%	9.9%	0.7%
节点编号	10	11	12	13
电压越限概率	7.1%	3.2%	3.2%	2.0%

由表 1 可知，节点 3 和 9 的电压越限概率小于 1%；节点 11、12、13 的越限概率为 2%~3.2%；而节点 5、6、10 越限概率均大于 7%，其中节点 6 越限概率达到了 9.9%。说明节点 5、6、10 电压偏移较为严重，应采取一定的电压改善措施，从而保证配电系统的电压质量。

Case2 不考虑分布式电源规划，规划结果为：年综合投资成本为 365.0 万元，年运行维护费用为 1 808.8 万元，节点 3、4、6、7、8 充电站规划容量分别为 300 kW、219 kW、93 kW、109 kW、279 kW，变电站需扩容 10 MVA，网架结构如图 3 所示。

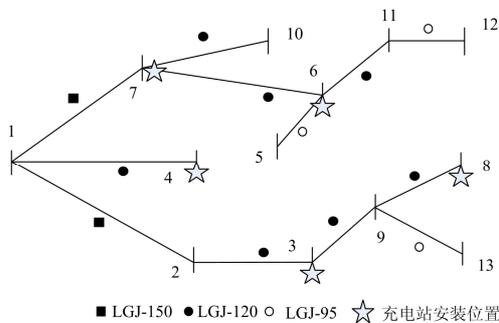


图 3 Case2 的规划网架结构图

Fig. 3 Network planning structure for Case2

Case3 将充电站规划容量设为固定值，通过实例仿真计算可得优化规划结果：年综合投资费用为 719.8 万元，年运行维护成本为 1 641.1 万元，风电装机容量为 2.3 MW，光伏装机容量为 0.1 MW，网架结构如图 4 所示。

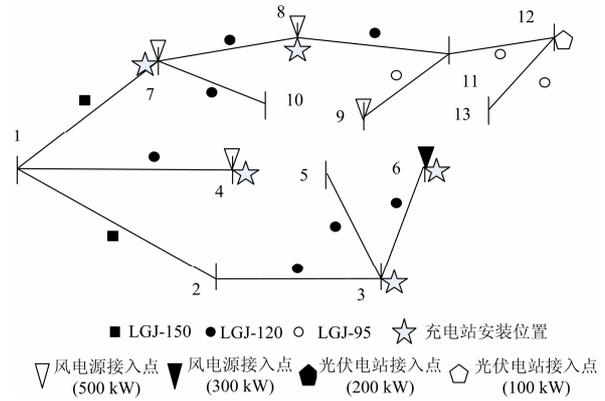


图 4 Case3 的规划网架结构图

Fig. 4 Network planning structure for Case3

Case 4 为分阶段规划，规划结果为：年综合投资成本为 716.4 万元，年运行维护成本为 1 640.8 万元，节点 3、4、6、7、8 的充电站规划容量分别为 288 kW、283 kW、293 kW、56 kW、80 kW，风电容量为 2.3 MW，光伏为 0.1 MW，网架结构如图 5 所示。

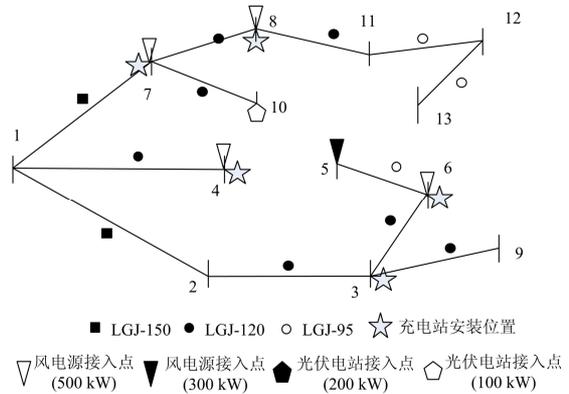


图 5 Case4 的规划网架结构图

Fig. 5 Network planning structure for Case4

四种规划方案的成本比较见表 2。

表 2 四种规划情形的成本比较

Table 2 Costs comparisons of four planning schemes

方案	年投资成本/ 万元	年运行维护 费用/万元	环境成本/ 万元	总成本/ 万元
Case1	681.8	1 627.6	10 275.4	12 584.8
Case2	365.0	1 808.8	12 945.9	15 118.8
Case3	719.8	1 641.1	10 420.1	12 781.5
Case4	716.4	1 640.8	10 417.0	12 774.2

由各情形优化规划结果可知, Case2 未考虑分布式电源规划, 虽然年投资成本最小, 然而运行维护费用和环境成本却最高, 造成规划方案的总成本也最高, 是唯一需要进行变电站扩容的方案, 说明分布式电源具有延缓电网改造和投资, 具有突出的环境效益。

由表 2 中的数据可知, Case1、Case3 和 Case4 除了投资分布式电源增加投资成本之外, 其余各指标都明显优越于 Case2; Case1 与 Case3 相比, 由于考虑了电动汽车充电需求在各个节点之间的分配, 各个指标都有所改善, 年投资成本节省 38 万元, 年运行维护费用减少了 13.5 万元, 环境成本降低了 144.7 万元, 总成本降低了 196.7 万元; 对比 Case4 与 Case1, 由于 Case4 进行分阶段规划, 未考虑配电网架建设与分布式电源、充电站选址定容的相互作用, 各项成本均有所增加, 总成本增加了 189.4 万元。

综上所述, 由于 Case 1 综合考虑了分布式电源、

电动汽车充电站与配电网架的协调规划, 能够同时确定分布式电源位置和容量、充电站的容量以及需要更换和新建的配电线路, 获得的规划方案最为合理, 运行维护成本、环境成本和总成本最小。

5 结论

本文考虑风光资源和负荷的随机波动性, 以投资、运行和环境成本的随机期望值最小为目标, 提出了含分布式电源与充电站的配电网协调规划模型和方法。以一个待扩展的辐射状配电网为例, 仿真分析表明: 含分布式电源与充电站的配电网协调规划能够明显降低投资、运行维护和环境成本, 提高规划方案的适应性; 计及分布式电源规划能够延缓电网改造; 与分阶段规划和不考虑充电需求分配的规划方法相比, 本文协调规划方法得到的规划方案更为合理, 具有更高的经济和环境效益。

附录 A

表 A1 节点负荷预测值

Table A1 Nodal load forecast values

节点编号	方案 1						方案 2						方案 3					
	概率	有功负荷/MW	无功负荷/Mvar	扰动量期望	有功扰动量方差	无功扰动量方差	概率	有功负荷/MW	无功负荷/Mvar	扰动量期望	有功扰动量方差	无功扰动量方差	概率	有功负荷/MW	无功负荷/Mvar	扰动量期望	有功扰动量方差	无功扰动量方差
1	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.25	0.5	0.38	0	0.05	0.038	0.6	0.6	0.45	0	0.06	0.045	0.2	0.75	0.656	0	0.075	0.0656
3	0.2	0.12	0.09	0	0.012	0.009	0.5	0.15	0.113	0	0.015	0.011	0.25	0.17	0.128	0	0.017	0.0128
4	0.3	0.3	0.23	0	0.03	0.023	0.5	0.6	0.45	0	0.06	0.045	0.3	0.8	0.6	0	0.08	0.06
5	0.2	0.04	0.03	0	0.004	0.003	0.6	0.08	0.06	0	0.008	0.006	0.1	0.14	0.106	0	0.014	0.0106
6	0.2	0.1	0.08	0	0.01	0.008	0.5	0.12	0.09	0	0.012	0.009	0.3	0.15	0.113	0	0.015	0.0113
7	0.15	0.45	0.38	0	0.045	0.038	0.6	0.75	0.56	0	0.075	0.056	0.2	0.95	0.71	0	0.095	0.071
8	0.2	0.5	0.38	0	0.05	0.038	0.7	0.8	0.6	0	0.08	0.060	0.15	1	0.75	0	0.1	0.075
9	0.25	0.15	0.12	0	0.015	0.012	0.6	0.25	0.19	0	0.025	0.019	0.2	0.4	0.3	0	0.04	0.03
10	0.2	0.35	0.26	0	0.035	0.026	0.6	0.55	0.41	0	0.055	0.041	0.15	0.85	0.64	0	0.085	0.064
11	0.2	0.2	0.15	0	0.02	0.015	0.6	0.25	0.188	0	0.025	0.019	0.2	0.283	0.213	0	0.0283	0.0213
12	0.2	0.5	0.38	0	0.05	0.038	0.5	0.6	0.45	0	0.06	0.045	0.2	0.75	0.565	0	0.075	0.0565
13	0	0.6	0.45	0	0.06	0.045	0.5	0.75	0.565	0	0.075	0.0565	0.2	0.85	0.64	0	0.085	0.064

表 A2 电源参数

Table A2 Power parameters

类型	固定投资/万元	单位可变投资/(万元/kW)	运行维护/(万元/kW)	投资偿还期/年
变电站新建	3 000	0	0	20
变电站扩容	800	0	0	20
充电站	300	0.6	0.6	20
风力发电	0	1.2	0.029 6	20
光伏电站	0	2.0	0	20

参考文献

[1] 张颖达, 刘念, 张建华, 等. 含电动汽车充电站的风光互补系统容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 126-134.
ZHANG Ying-da, LIU Nian, ZHANG Jian-hua, et al. Optimum sizing of a stand-alone hybrid PV/wind generation system integrated with electric vehicle charging stations[J]. Power System Protection and

- Control, 2013, 41(15): 126-134.
- [2] 肖湘宁, 陈征, 刘念. 可再生能源与电动汽车充放电设施在微电网中的集成模式与关键问题[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 1-14.
- XIAO Xiang-ning, CHEN Zheng, LIU Nian. Integrated mode and key issues of renewable energy sources and electric vehicles' charging and discharging facilities in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 1-14.
- [3] AHMED Y S, GANESH K V. Resource scheduling under uncertainty in a smart grid with renewable and plug-in vehicles[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1229-1238.
- [4] 张学清, 梁军, 张利, 等. 计及风光电源的一种地区电网电动汽车充电调度方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 28-35.
- ZHANG Xue-qing, LIANG Jun, ZHANG Li, et al. Approach for plug-in electric vehicles charging scheduling considering wind and photovoltaic power in Chinese regional power grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 28-35.
- [5] 薛松, 袁越, 傅质馨, 等. 考虑电动汽车入网技术的电力系统机组组合研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 86-92.
- XUE Song, YUAN Yue, FU Zhi-xin, et al. Unit commitment in power system considering vehicle-to-grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 86-92.
- [6] 杨毅, 韦钢, 周冰, 等. 含分布式电源的配电网模糊优化规划[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(13): 19-23.
- YANG Yi, WEI Gang, ZHOU Bing, et al. Optimized fuzzy planning of the distribution network including distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(13): 19-23.
- [7] 刘波, 张焰, 杨娜. 改进的粒子群优化算法在分布式电源选址和定容中的应用[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 103-108.
- LIU Bo, ZHANG Yan, YANG Na. Improved particle swarm optimization method and its application in the siting and sizing of distributed generation planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(2): 103-108.
- [8] 胡吟, 韦钢, 言大伟, 等. 分布式电源在配电网中的优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 100-105.
- HU Yin, WEI Gang, YAN Da-wei, et al. Optimization allocation of distributed generations embedded in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 100-105.
- [9] 刘自发, 张伟, 王泽黎. 基于量子粒子群优化算法的城市电动汽车充电站优化布局[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 39-45.
- LIU Zi-fa, ZHANG Wei, WANG Ze-li. Optimal planning of charging station for electric vehicle based on quantum PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 39-45.
- [10] SORTOMME E, HINDI M M, PHERSON S D J M, et al. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2011, 2(1): 198-205.
- [11] 葛少云, 冯亮, 刘洪, 等. 考虑电量分布及行驶里程的高速公路充电站规划[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 111-116.
- GE Shao-yun, FENG Liang, LIU Hong, et al. Planning of charging stations on highway considering power distribution and driving mileage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 111-116.
- [12] 唐现刚, 刘俊勇, 刘友波, 等. 基于计算几何方法的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 24-30.
- TANG Xian-gang, LIU Jun-yong, LIU You-bo, et al. Electric vehicle charging station planning based on computational geometry method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 24-30.

- [13] 刘志鹏, 文福栓, 薛禹胜, 等. 计及可入网电动汽车的分布式电源最优选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 11-16.
- LIU Zhi-peng, WEN Fu-shuan, XUE Yu-sheng, et al. Optimal siting and sizing of distributed generators considering plug-in electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 11-16.
- [14] 杜爱虎, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑电动汽车充电站布局优化的配电网规划[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 35-42.
- DU Ai-hu, HU Ze-chun, SONG Yong-hua, et al. Distribution network planning considering layout optimization of electric vehicle charging stations[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 35-42.
- [15] 张舒, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑电动汽车换电站与电网互动的机组组合问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 49-55.
- ZHANG Shu, HU Ze-chun, SONG Yong-hua, et al. Research on unit commitment considering interaction between battery swapping station and power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 49-55.
- [16] 赵俊华, 文福栓, 薛禹胜, 等. 计及电动汽车和风电出力不确定性的随机经济调度[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 22-29.
- ZHAO Jun-hua, WEN Fu-shuan, XUE Yu-sheng, et al. Power system stochastic economic dispatch considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 22-29.
- [17] 魏学好, 周浩. 中国火力发电行业减排污染物的环境价值标准估算[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1): 53-56.
- WEI Xue-hao, ZHOU Hao. Evaluating the environmental value schedule of pollutants mitigated in China thermal power industry[J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(1): 53-56.

收稿日期: 2013-10-29; 修回日期: 2014-02-18

作者简介:

吴万禄(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统规划、可再生能源发电、电动汽车接入电网; E-mail: wwl_dz02@163.com

韦钢(1958-), 男, 通信作者, 教授, 主要研究方向为电力系统运行分析及计算、新能源与电力系统规划、电力系统谐波及补偿技术;

谢丽蓉(1969-), 女, 副教授, 主要研究方向为控制算法、风力发电。