

# 基于主动管理的分布式电源和无功补偿综合优化配置

王韶, 邓先芳

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆市 400044)

**摘要:** 为充分利用分布式电源 (distributed generation, DG) 和无功补偿设备在改善电压质量和降低网损方面的积极作用, 建立基于主动管理策略的 DG 和无功补偿综合优化配置模型。模型中采用拉丁超立方抽样和 K-均值聚类构建多场景模型; 考虑调节有载调压变压器分接头、DG 有功出力 and 功率因数、需求侧可中断负荷等主动管理的控制措施。采用带精英策略的快速非支配排序遗传算法 (non-dominated sorting genetic algorithms-II, NSGA-II) 求解以电压总偏差和年综合费用最小为目标的 DG 和无功补偿综合优化配置模型; 采用基于内点法的最优潮流算法求解以主动管理费用和需求侧管理费用最小、可再生能源补贴费用最大为目标的模型。用改进的 25 节点配电系统验证模型的可行性和有效性。仿真结果表明在主动管理框架下能更好地发挥 DG 和无功补偿设备的作用。

**关键词:** 配电网; 主动管理; 分布式电源; 无功补偿; 多场景

**中图分类号:** TM715

## Optimal allocation of combined distributed generation and reactive power compensation based on active management

WANG Shao, DENG Xianfang

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In order to make full use of the active role of distributed generation (DG) and reactive power compensation equipment in improving voltage quality and reducing power loss, a comprehensive optimal allocation model of DG and reactive power compensation based on active management strategy was established. In the model, Latin hypercube sampling and K-means clustering are used to construct multi-scenario model, and active management control measures such as adjusting tap-changer, DG active power output and power factor, demand-side interruptible load are considered. A fast non-dominated sorting genetic algorithm with elite strategy (NSGA-II) is used to solve the optimal allocation model of DG and reactive power compensation with the objective of minimizing total voltage deviation and annual comprehensive cost. The optimal power flow algorithm based on interior point method is used to solve the model with the objective of minimizing active management cost, demand side management cost and maximizing renewable energy subsidy cost. The feasibility and effectiveness of the model are verified in the improved 25 node distribution system. The simulation results show that the DG and reactive power compensation equipment can play a better role under the active management framework.

**Key words:** distribution network; active management; distributed generation; reactive power compensation; multi-scene

## 0 引言

在配电网中合理接入分布式电源 (Distributed Generation, DG) 对改善电压质量、降低网络损耗和减少环境污染等能起到重要的作用。近年来对 DG 的利用日益受到重视, 取得了

---

**作者简介:** 王韶 (1956-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 电力系统规划与可靠性、电力系统运行与控制等. E-mail: wangshao100@163.com

大量研究成果<sup>[1]</sup>。在改善电压质量和降低网损方面，目前国内外研究学者对 DG 和无功补偿的综合优化配置也取得了一定的研究成果<sup>[2-7]</sup>。

文献[2]以售电费用、网损费用、DG 和补偿电容年投资费用、废气减排费用、电压改善指标为目标研究 DG 和补偿电容的综合优化配置问题。文献[3]以网损最小为目标，先分析网损灵敏度确定 DG 和补偿电容的最优安装位置，再采用启发式曲线拟合方法确定安装容量。文献[4]基于两层规划方法，上层以静态经济收益为目标优化 DG 和电容器的安装位置和容量；下层假定每小时间歇性 DG 出力和负荷保持不变时，以系统运行经济性效益最优为目标优化典型日每小时电容器的投切。文献[5]建立的二层规划模型中，上层以年费用最小为目标优化 DG 和电容器的安装位置和容量，下层以年运行费用为目标优化间歇性 DG 无功出力、微型燃气轮机有功无功出力和电容器的投切。文献[6]综合考虑有功-无功资源，先根据有功网损灵敏度指标确定 DG 的安装位置和初始安装容量，再以投资效益、电压期望值偏差和污染气体排放指标为目标优化电容器的安装位置容量和 DG 安装容量。文献[7]综合考虑 DG 运营商和配电网公司的利益建立双层规划模型，上层以 DG 运营商的利益为目标优化配置 DG，下层提出主动管理费用概念，以配电网公司的利益为目标优化配置电容器。

在上述文献中，文献[2-4, 6-7]是在被动管理模式下的 DG 和无功补偿的综合优化；而文献[5]仅考虑了 DG 的无功调节和电容器的投切，没有考虑其他主动管理策略，不能在主动管理框架下充分利用 DG 和无功补偿在改善电压质量和降低网损方面的积极作用。针对这一问题，本文在 DG 和无功补偿的综合优化中考虑了调节有载调压变压器分接头、DG 有功出力和功率因数、需求侧可中断负荷等主动管理策略<sup>[8-9]</sup>。首先建立 DG 和并联补偿电容器的综合优化配置模型。其次根据优化问题和决策变量类型将建立的模型分成优化 DG 和无功补偿配置与主动控制中离散变量的模型、优化主动控制中连续变量的模型。然后采用 NSGA-II 算法求解离散变量模型，并用基于熵值的多目标加权灰靶决策算法选出最优方案；采用基于内点法的最优潮流算法求解连续变量模型。最后采用修改的 25 节点配电系统验证所提方法的可行性和有效性。

## 1 DG 和无功补偿综合优化配置模型

为使建立的模型能够计及风力发电 DG 出力和负荷的不确定性，本文采用文献[10]的风机发电和负荷的概率模型，并运用拉丁超立方抽样<sup>[11]</sup>和 K 均值聚类方法<sup>[12]</sup>构建风机出力和负荷的多场景模型，在此基础上建立 DG 和无功补偿综合优化配置模型。

### 1.1 模型的建立

#### 1.1.1 目标函数

本文基于主动管理策略的分布式电源和无功补偿综合优化配置的模型主要考虑电压质量和经济性两个方面。因此 DG 和无功补偿设备的优化配置模型选择电压总偏差和包括网损费用、DG 安装运行维护费用、购电费用、无功补偿年投资费用的年综合费用<sup>[2, 8]</sup>作为目标

函数；主动管理策略优化运行的模型选择主动管理费用和需求侧管理费用<sup>[13]</sup>、可再生能源补贴费用<sup>[14]</sup>作为目标函数，控制措施选择调节有载调压变压器分接头、DG有功出力 and 功率因数、可中断负荷中断量。模型的目标函数如下：

$$80 \quad \min f_1 = \Delta U \quad (1)$$

$$\min f_2 = C_{loss} + C_{DG} + C_{pp} + C_C \quad (2)$$

$$\min f_{3,k} = C_{AM,k} + C_{CL,k} - C_{AP,k} \quad (3)$$

其中

$$\Delta U = \sum_{k=1}^N p_k \left( \sum_{i=1}^{N_{node}} |U_{k,i} - U_{iref}| / N_{node} \right) \quad (4)$$

$$85 \quad C_{loss} = c\tau_{max} \sum_{k=1}^N p_k P_{loss,k} \quad (5)$$

$$C_{DG} = \sum_{g=1}^{N_{DG}} [\alpha_{dg} C_{dg,I,g} + C_{OM,g} T_{DGg}] P_{DGg} \quad (6)$$

$$C_{pp} = 8760c_{pp} \sum_{k=1}^N p_k P_{S,k} \quad (7)$$

$$C_C = \sum_{l=1}^{N_C} \alpha_c C_{c,l,l} Q_{C,l} \quad (8)$$

$$C_{AM,k} = 8760 p_k \left( \sum_{g=1}^{N_{DG}} C_{dg,AM,g} P_{DG,k,g} \right) \quad (9)$$

$$90 \quad C_{CL,k} = 8760 p_k \left( \sum_{d=1}^{N_{CL}} \xi_d P_{CL,k,d} \right) \quad (10)$$

$$C_{AP,k} = 8760 p_k \left( \sum_{g=1}^{N_{DG}} C_{dg,AP,g} P_{DG,k,g} \right) \quad (11)$$

式中： $\Delta U$  为电压总偏差； $C_{loss}$ 、 $C_{DG}$ 、 $C_{pp}$ 、 $C_C$  分别为网损费用、DG 安装运行维护费用、购电费用、无功补偿设备年投资费用； $C_{AM,k}$ 、 $C_{CL,k}$ 、 $C_{AP,k}$  分别为场景  $k$  的主动管理费用、需求侧管理费用、可再生能源补贴费用； $N$ 、 $N_{node}$  分别为场景数、节点总数； $p_k$  为场景  $k$  出现的概率； $U_{k,i}$  为场景  $k$  的节点  $i$  的电压幅值； $U_{iref}$  为节点  $i$  的期望电压幅值； $c$ 、 $\tau_{max}$  分别为单位网损费用、最大负荷损耗时间； $P_{loss,k}$  为场景  $k$  的有功网损； $N_{DG}$  为可接入 DG 的节点总数； $\alpha_{dg}$  为 DG 固定投资平均年费用系数； $C_{dg,I,g}$ 、 $C_{OM,g}$ 、 $T_{DGg}$ 、 $P_{DGg}$  分别为节点  $g$  处 DG 的单位安装费用、单位运行维护费用、年发电运行小时数、安装容量； $c_{pp}$  为单位购电费用； $P_{S,k}$  为场景  $k$  的变电站节点注入有功功率； $N_C$  为可接入并联电容器的节点总数； $\alpha_c$  为电容器的现值系数； $C_{c,l,l}$ 、 $Q_{C,l}$  分别为节点  $l$  处电容器的单位容量综合成本、安装容量； $C_{dg,AM,g}$ 、 $C_{dg,AP,g}$  分别为节点  $g$  处 DG 单位发电量的主动管理成本、单位补贴费用； $P_{DG,k,g}$  为场景  $k$  节点  $g$  处 DG 的有功出力； $N_{CL}$  为可中断负荷节点总数； $\xi_d$  为节点  $d$  处单位电量中断补偿费用； $P_{CL,k,d}$  场景  $k$  节点  $d$  处可中断负荷的有功中断量。

### 1.1.2 约束条件

105 为了得到上述目标函数，需要进行多场景下的潮流计算，使其满足一定的约束条件。本文模型的约束条件<sup>[3, 8-9, 13, 15-16]</sup>包括节点注入功率方程、节点电压、支路载流容量、倒送有功功率、DG 的容量、并联电容器容量、并联电容器组数、有载调压变压器分接头、DG 有功出力调节率、DG 的有功出力、DG 的功率因数、可中断负荷等约束。具体的约束条件如下：

$$110 \quad P_{k,i} = U_{k,i} \sum_{j=1}^{N_{node}} U_{k,j} (G_{ij} \cos \theta_{k,ij} + B_{ij} \sin \theta_{k,ij}) \quad (12)$$

$$Q_{k,i} = U_{k,i} \sum_{j=1}^{N_{node}} U_{k,j} (G_{ij} \sin \theta_{k,ij} - B_{ij} \cos \theta_{k,ij}) \quad (13)$$

$$U_{i \min} \leq U_{k,i} \leq U_{i \max} \quad (14)$$

$$S_{k,ij} \leq S_{ij \max} \quad (15)$$

$$P_{S,k} \geq 0 \quad (16)$$

$$115 \quad Q_{S,k} \geq 0 \quad (17)$$

$$\sum_{g=1}^{N_{DG}} P_{DGg} \leq r \sum_{i=1}^{N_{node}} P_{l,i} \quad (18)$$

$$\sum_{l=1}^{N_C} n_{C,l} Q_C \leq \sum_{i=1}^{N_{node}} Q_{l,i} \quad (19)$$

$$0 \leq n_{C,l} Q_C \leq Q_{\max C,l} \quad (20)$$

$$T_{m,\min} \leq T_m \leq T_{m,\max} \quad (21)$$

$$120 \quad 0 \leq \omega_{DG,c,k,g} \leq \omega_{DG,g,\max} \quad (22)$$

$$(1 - \omega_{DG,c,\max}) P_{DG,k,g,\max} \leq P_{DG,k,g} \leq P_{DG,k,g,\max} \quad (23)$$

$$\cos \varphi_{DG,k,g,\min} \leq \cos \varphi_{DG,k,g} \leq \cos \varphi_{DG,k,g,\max} \quad (24)$$

$$0 \leq P_{CL,k,d} \leq P_{CL,k,d,\max} \quad (25)$$

125 式中： $P_{k,i}$ 、 $Q_{k,i}$ 、 $U_{k,i}$ 、 $U_{k,j}$ 、 $\theta_{k,ij}$  分别为场景  $k$  时节点  $i$  的有功无功注入功率、节点  $i$ 、 $j$  的电压幅值和电压相角差； $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  为节点导纳矩阵第  $i$  行  $j$  列元素的实部和虚部； $U_{i \max}$ 、 $U_{i \min}$  分别为节点  $i$  的电压幅值上下限； $S_{k,ij}$  为场景  $k$  时支路  $i$ - $j$  的功率； $S_{ij \max}$  为支路  $i$ - $j$  的最大允许功率； $Q_{S,k}$  为场景  $k$  时变电站节点的注入无功功率； $P_{l,i}$ 、 $Q_{l,i}$  分别为节点  $i$  的有功负荷、无功负荷； $r$  为 DG 的渗透率； $n_{C,l}$ 、 $Q_{\max C,l}$  分别为节点  $l$  处电容器安装组数和最大安装容量； $Q_C$  为单组电容器的容量； $T_m$ 、 $T_{m,\max}$ 、 $T_{m,\min}$  为有载调压变压器  $m$  分接头档位及上下限； $\omega_{DG,c,k,g}$  为场景  $k$  时节点  $g$  处 DG 有功出力调节率； $\omega_{DG,g,\max}$  为节点  $g$  处 DG 有功出力最大允许调节率； $P_{DG,k,g,\max}$  为场景  $k$  时 DG 有功调节前的功率值； $\cos \varphi_{DG,k,g}$ 、 $\cos \varphi_{DG,k,g,\max}$ 、 $\cos \varphi_{DG,k,g,\min}$  分别为场景  $k$  时 DG 功率因数及上下限； $P_{CL,k,d,\max}$  为场景  $k$  时节点  $d$  处可中断负荷的最大中断量。

## 1.2 模型的分析

DG 和无功补偿设备的优化配置是在满足一定的约束条件下确定配电网的有功和无功电

135 源的位置和容量,而主动管理策略是对这些有功和无功电源在满足一定的约束条件下通过优化控制实现最优的运行方式,以便充分利用 DG 和无功补偿设备在改善电压质量和降低网损方面发挥积极作用。在主动管理策略的控制措施中,有载调压变压器分接头是离散变量,而 DG 有功出力和功率因数、可中断负荷中断量是连续变量。本文将这两种决策变量的优化分别建立模型以便于优化计算。此外,由于 DG 和无功补偿设备的位置和容量对配电网的电压有影响,而且有载调压变压器分接头的调整对配电网的电压影响也较大,因而 DG 和无功补偿设备与有载调压变压器分接头应该相配合。为此本文将建立的基于主动管理的 DG 和并联补偿电容器综合优化配置模型分成如下的 2 个模型。

140 模型 1: 将目标函数式(1)~(2)、式(4)~(8),约束条件式(12)~(13)、式(15)~(21)组成的数学模型作为进行 DG 和无功补偿设备优化配置,该模型还包括了主动控制离散变量有载调压变压器分接头。

145 模型 2: 将目标函数式(3)、式(9)~(11),约束条件式(12)~(17)、式(22)~(25)组成的数学模型作为场景  $k$  进行主动控制连续变量 DG 有功出力和功率因数、可中断负荷中断量的优化模型。

## 2 模型求解

150 本文建立的模型 1 的目标函数是电压总偏差和包括网损费用、DG 安装运行维护费用、购电费用、无功补偿年投资费用的年综合费用,优化的决策变量有 DG 和并联补偿电容器的位置和容量、有载调压变压器分接头。模型 2 的目标函数是主动管理费用、需求侧管理费用和可再生能源补贴费用,优化的决策变量有 DG 有功出力和功率因数、可中断负荷中断量。由于模型 1 是含有离散决策变量的多目标模型,因此本文采用 NSGA-II 算法<sup>[17]</sup>求解,并用基于熵值的多目标加权灰靶决策算法<sup>[18]</sup>从 Pareto 解集中选出最优解。对于含有连续决策变量的模型 2,采用基于内点法的最优潮流算法<sup>[19]</sup>求解,并将该算法的求解嵌入到 NSGA-II 算法求解过程中。算法的具体步骤如下:

- 1) 输入原始数据。
- 2) 产生初始种群。
- 160 对种群中的染色体采用十进制编码。染色体分为 3 个部分,第 1 部分是 DG 的位置和额定容量,第 2 部分是并联补偿电容器的位置和容量,第 3 部分是有载调压变压器分接头档位。
- 3) 计算种群中每个染色体的目标函数值。

165 首先对染色体进行解码;其次修复不满足式(18)~(20)的不可行解;再对风速、光照强度和负荷功率进行抽样,将风速和光照强度抽样值转换成 DG 出力值,进行 K 均值聚类构建风机出力和负荷的多场景模型;然后在每一个场景下计算潮流,对潮流不收敛或不满足式(15)的染色体赋惩罚值后停止该染色体的计算,对潮流收敛且满足式(15)的染色体用基于内点法的最优潮流算法求解得到 DG 有功出力和功率因数、可中断负荷中断量。在计算完全部场景下内点法的最优潮流后,取 DG 有功出力的期望值修复染色体的第 1 部分编码。

- 4) 对种群进行非支配排序。
- 5) 对种群进行选择、交叉、变异形成子代种群。
- 6) 对种群按照步骤 3) 计算种群中染色体的目标函数值。
- 7) 合并父代和子代种群，并进行非支配排序，选出新种群。
- 8) 判断是否达到最大进化代数。若未达到，则转到步骤 5)；否则，基于熵权法的灰靶决策选择最优方案。

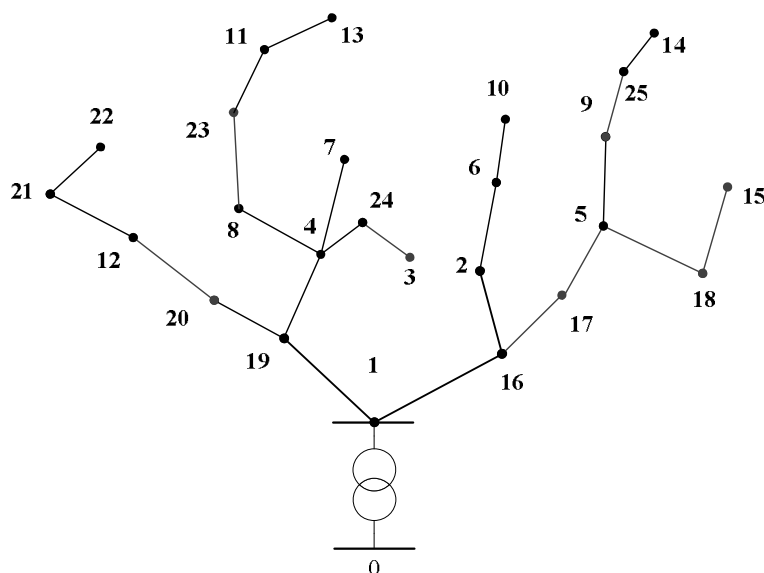
170

175

### 3 算例分析

#### 3.1 算例描述

本文采用如图 1 所示的配电系统作为算例系统。该配电系统是在文献[20]的 25 节点配电系统基础上增加变压器所得。



180

图 1 改进的 25 节点配电系统

Fig. 1 The improved 25-node power distribution system

185

190

变压器参数为：SZ11-2500/35 变压器 2 台，高压侧分接头档位为  $35 \pm 3 \times 2.5\%$ ，空载电流和损耗分别为 0.8% 和 2.72kW，短路阻抗电压和损耗分别为 6.5% 和 20.64kW。风机可安装节点为节点 7、13、14、18，风机各节点可选安装容量为 0kW、100kW、150kW、200kW、250kW、300kW，固定投资平均费用系数<sup>[13]</sup>为 0.05；无功补偿电容器可安装节点为节点 4、9、11、15，单组电容器容量<sup>[9]</sup>为 50kvar，各节点可安装最大组数为 10 组，电容器单位容量综合成本为 110 元/kvar，电容器的使用寿命为 15 年，折现率为 8%；可中断负荷节点为节点 2、3、10、11、18；电压、容量基准为 10kV，10MVA；电压上下限为 1.07p.u.、0.93p.u.；期望电压幅值为 1p.u.；最大负荷损耗时间为 3000h；单位网损费用为 0.4 元/kWh；单位购电费用为 0.33 元/kWh；单位容量主动管理成本和可中断负荷单位补偿费用分别为为 90 元/MWh 和 2 元/kWh<sup>[8]</sup>；DG 渗透率为 25%；风速服从 Weibull 分布，分布参数  $k=2.3$ 、 $c=8.92$ ；

195 负荷的正态分布方差为  $0.1\text{kW}^2$ ；拉丁超立方抽样次数取为 500 次，K 均值聚类后的风机样本数为 5，负荷样本数为 5；风机单位安装费用为 10000 元/kW，单位运行维护费用为 0.33 元/kW，年发电运行小时数为 1728h；可再生能源单位发电补贴<sup>[14]</sup>为 0.25 元/kWh；主动管理调节范围<sup>[8]</sup>如表 1 所示；NSGA-II 算法迭代次数为 100；种群大小为 100。

表 1 主动管理调节范围  
Tab. 1 Adjustment range of active management

参数	下限	上限
风机有功出力切除率	0%	50%
风机功率因数	0.98(迟相)	0.98(进相)
可中断节点中断量	0	100%

### 3.2 结果分析

200 本文分 2 种情况进行 DG 和无功补偿综合优化配置的计算，情况 1 为不考虑主动管理；情况 2 为考虑主动管理。

205 两种情况下得到的最优方案表示的 DG 和无功补偿安装位置与容量、变比如表 2 所示；两种情况的目标函数 1 和 2 的值如表 3 所示；两种情况的目标函数 3 的值和风机出力期望值如表 4 所示。在两种情况下取最优方案的 DG 额定容量和电容器安装容量，以及原始负荷时由潮流计算得到的节点 1~25 的电压分布如图 2 所示。

表 2 两种情况的最优方案  
Tab. 2 Optimal scheme of two cases

情况	分布式电源/kW				无功补偿电容器/kvar				变比
	7	13	14	18	4	9	11	15	
情况 1	0	250	150	150	400	250	200	150	无
情况 2	0	150	100	100	100	200	250	300	0.95

210 表 3 两种情况的目标函数 1 和 2 的值

Tab. 3 The values of the objective functions 1 and 2 in the two case

情况	电压总偏差 /V	年综合费用 /万元	网损费用 /万元	DG 安装运行 维护费用/万元	购电费用 /万元	电容器年投 资费用/万元
情况 1	350.7217	679.5210	10.6240	58.8632	608.7487	1.2851
情况 2	73.4392	658.0942	10.5705	37.4584	608.9729	1.0924

表 4 两种情况的目标函数 3 的值和风机出力期望值

Tab. 4 The value of the objective function 3 and expected value of wind output in the two case

情况	主动管理 费用/万元	需求侧管 理费用/万元	可再生能源 补贴费用/万元	风机出力 期望值/kW
情况 1	0	0	60.8242	277.7359
情况 2	21.8004	0.0003	60.5567	276.5146

215

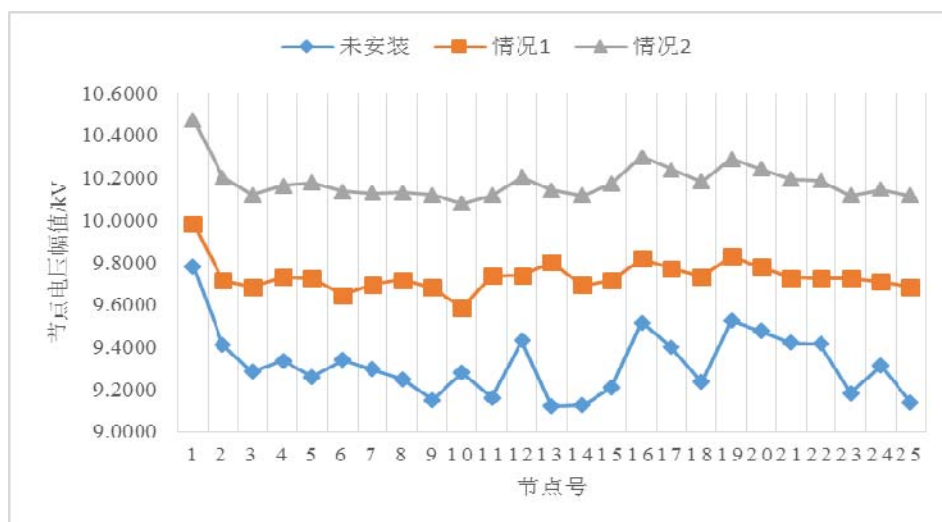


图2 节点1~25的电压分布图

Fig. 2 The voltage distribution diagram of node 1~25

220 由表2可见, 尽管两种情况的DG和并联补偿电容器安装的位置相同, 但在各节点安装的DG和并联补偿电容器的容量不同; 而且情况1和情况2安装的DG和并联补偿电容器的总容量不同。情况1和情况2安装的DG总容量分别为550kW和350kW, 安装的并联补偿电容器总容量分别为1000kvar和850kvar。这表明是否考虑主动管理策略会影响到DG和无功补偿的优化配置。

225 由表3可见, 情况1和情况2的电压总偏差目标函数分别为350.7217V和73.4392V, 情况1的电压总偏差明显大于情况2。情况1和情况2的年综合费用目标函数分别为679.5210万元和658.0942万元, 网损费用分别为10.6240万元和10.5705万元, 尽管两者都相差不大, 但前者的年综合费用比后者要多21.4268万元, 网损费用要多0.0535万元。这表明考虑主动管理策略的DG和无功补偿综合优化配置在保证经济性的同时可以提高电压质量。

230 表3中情况1的DG安装运行维护费用和并联补偿电容器年投资费用分别为58.8632万元和1.2851万元, 均比情况2的37.4584万元和1.0924万元大。这是由于情况1安装的DG和并联补偿电容器总容量分别大于和情况2的总容量的缘故, 因此考虑主动管理可以减少DG和并联补偿电容器年投资维护费用。

235 从表3的两种情况的购电费用看, 情况2比情况1仅多0.2242万元, 表明上级配电网向负荷供电的功率相差不大, 而表4中情况2的可再生能源的补贴费用和情况1相差不大, 只比情况1少0.44%, 表明情况2的DG年发电量和情况1相差不大。由于情况2安装的风机总容量比情况1少36.36%, 因此这说明情况2对风机的利用率比情况1高。

240 由表4可见, 尽管考虑主动管理需要分别支付主动管理费用和需求侧管理费用21.8004万元和0.0003万元, 但前者仅占年综合费用的3.31%, 后者几乎可以忽略不计。而表4中, 情况1和情况2的风机出力期望值分别为277.7359kW和276.5146kW, 分别占安装容量的50.50%和79.00%, 情况2明显高于情况1, 这充分说明考虑主动管理策略能提高DG的利用率。

由图 2 可见, 尽管情况 1 相对于没有安装 DG 和并联补偿电容器时提高了电压, 但情况 1 的电压分布曲线处在情况 2 下方, 表明前者没有后者提高电压的能力强。这是因为情况 2 能通过主动管理策略调节变压器档位从而能整体上提高 DG 和并联补偿电容器调节电网电压和降低网损的能力。

## 4 结论

本文以拉丁超立方抽样和 K 均值聚类构建 DG 出力和负荷的多场景状态模型, 在此基础上考虑调节有载调压变压器分接头、DG 有功出力和功率因数、需求侧可中断负荷等主动管理的控制措施建立 DG 和无功补偿的综合优化配置模型。采用带精英策略的快速非支配排序遗传算法和基于内点法的最优潮流求解建立的模型。算例结果表明基于主动管理策略综合优化 DG 和无功补偿可以使电网运行在更佳状况, 在保证经济性的前提下提高电压质量, 增大 DG 利用率。

### [参考文献] (References)

- [1] 张沈习, 程浩忠, 邢海军, 等. 配电网中考虑不确定性的分布式电源规划研究综述[J]. 电力自动化设备, 2016, 36 (8): 1-9.
- [2] 邓威, 李欣然, 刘志勇, 等. 考虑无功补偿影响因素的间歇性分布式电源综合优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (10): 80-88.
- [3] Naik S G, Khatod D K, Sharma M P. Optimal allocation of combined DG and capacitor for real power loss minimization in distribution networks[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2013, 53(4): 967-973.
- [4] 郭金明, 李欣然, 邓威, 等. 基于 2 层规划的间歇性分布式电源及无功补偿综合优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (28): 25-33.
- [5] 张璐, 唐巍, 丛鹏伟, 等. 基于机会约束规划和二层规划的配电网广义电源优化配置[J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (5): 50-58.
- [6] 潘超, 孟涛, 蔡国伟, 等. 广义电源多目标优化配置与运行[J]. 电网技术, 2015, 39 (12): 3505-3512.
- [7] 温俊强, 曾博, 张建华. 市场环境下考虑各利益主体博弈的分布式电源双层规划方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39 (15): 61-67.
- [8] 张沈习, 李珂, 程浩忠, 等. 主动管理模式下分布式风电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39 (9): 208-214.
- [9] 严艺芬, 吴文宣, 张逸, 等. 考虑主动管理措施的配电网无功补偿双层优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45 (12): 60-66.
- [10] 刘佳, 徐谦, 程浩忠, 等. 考虑 N-1 安全的分布式电源多目标协调优化配置[J]. 电力自动化设备, 2017, 37 (7): 84-92.
- [11] Yu H, Chung C Y, Wong K P, et al. Probabilistic load flow evaluation with hybrid latin hypercube sampling and cholesky decomposition[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 661-667.
- [12] Likas A, Vlassis N, Verbeek J J. The global k-means clustering algorithm[J]. Pattern Recognition, 2003, 36(2): 451-461.
- [13] 谢青洋, 王韶, 邓先芳, 等. 基于灰靶决策和 NSGA-II 的配电系统分布式电源多目标优化[J]. 电测与仪表, 2017, 54 (06): 100-105.
- [14] 张立梅, 唐巍, 王少林, 等. 综合考虑配电公司及独立发电商利益的分布式电源规划[J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (4): 23-28.
- [15] 张翔, 程浩忠, 方陈, 等. 考虑主动管理模式的多目标分布式电源规划[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48 (9): 1231-1238.
- [16] Zhang J, Pang S, Tian H, et al. Siting and sizing of distributed wind generation under active management mode[C]//International Conference on Power System Technology, 2010: 1-8.
- [17] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [18] 杨耀红, 谭攀静. 基于多目标加权灰靶决策的供应链供应商选择[J]. 人民长江, 2012, 43(05): 102-105.
- [19] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003, 116-134.

[20] Nahman J M, Peric D M. Optimal planning of radial distribution networks by simulated annealing technique[J]. Power Systems, IEEE Transactions on Power System, 2008, 23(2): 790-795.