

DOI: 10.7667/PSPC160923

考虑主动管理措施的配电网无功补偿双层优化配置

严艺芬¹, 吴文宣^{1,2}, 张逸^{1,3}, 蔡金锭¹

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350003;
3. 国网福建省电力科学研究院, 福建 福州 350007)

摘要: 为了适应未来大量分布式电源(DG)并网及自动化水平显著提高的主动配电网发展, 在规划阶段应该考虑主动管理措施, 优化系统运行方式。同时, 现有的无功补偿规划研究忽略了 DG 及负荷的不确定性。为此, 计及间歇性 DG 及负荷的不确定性, 提出主动配电网无功补偿双层优化配置模型。上层规划以无功补偿电容器的投资成本、网络损耗费用综合最优为目标函数, 下层规划在此基础上考虑调节无功补偿容量及调节有载变压器抽头两种主动管理措施, 对每个场景进行优化。采用 K -均值聚类法对场景进行缩减, 结合和声搜索算法和粒子群算法联合求解模型。通过 IEEE33 节点算例进行仿真计算, 验证所提模型和方法的正确性。

关键词: 分布式电源; 主动配电网; 无功补偿; 优化配置; 主动管理措施

Bi-level optimal allocation of reactive power compensation considering active management measure

YAN Yifen¹, WU Wenxuan^{1,2}, ZHANG Yi^{1,3}, CAI Jinding¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. State Grid Fujian Electric Power Company Limited, Fuzhou 350003, China; 3. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350007, China)

Abstract: In order to adapt to active distribution network which will have large-scale distributed generation (DG) and high level of automation in the future, active management measures must be considered in the planning stage to optimize system operation. And the existing research of distribution network reactive compensation planning ignores the uncertainty of DG and load. Aiming to solve the problems, this paper proposes reactive compensation optimal allocation model in active distribution network based on the uncertainties of intermittent DG and load power. The lowest reactive compensation capacitors investment cost and network loss cost are taken as the objective of upper level. And considering two active management measures including regulating reactive power compensation capacity and regulating the on-load tap changer, the lower level optimizes for each scene. This paper uses K -means clustering method to reduce the scene, and combines with the harmonic search algorithm and particle swarm algorithm to solve the model. And simulative results of IEEE-33 distribution system verify the effectiveness of the model and solution methods.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2014AA051901).

Key words: distributed generation; active distribution network; reactive power compensation; optimal allocation; active management measure

0 引言

各类分布式电源(Distributed Generation, DG)的大规模接入, 配电网正在从传统的无源向着以多电源为特征的主动配电网(Active Distribution Network, ADN)演变^[1-2]。大规模 DG 接入将增加 ADN 运行和

规划的复杂性^[3-4], 因此在规划阶段就必须考虑 DG 出力的波动性及系统的运行控制策略^[5]。

配电网无功补偿电容器优化配置的目的是在满足各种约束条件下确定系统无功补偿电容器的最优安装位置和容量, 对于提高电能质量、降低损耗具有重要意义。文献[6]考虑了风力发电机组出力的波动性, 对配电网中补偿电容器的安装位置和容量进行优化配置; 文献[7]在保证光伏电源有功出力最大的基础上, 建立了无功补偿优化配置模型, 并采用

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2014AA051901)

混沌粒子群算法对模型进行求解; 文献[8]采用场景概率的方法表示风电出力的不确定性, 建立了配电网无功补偿电容器综合规划模型, 并利用自适应粒子群算法求解模型。上述研究均未考虑主动管理措施及负荷的不确定性, 属于传统的配电网无功规划。由传统配电网无功规划确定的无功补偿配置容量有可能大于规划区的无功需求, 增加了投资成本。

ADN 中的无功补偿规划应该综合考虑主动管理措施以及 DG 出力与负荷的不确定性, 在保证系统电压水平下减少投资成本, 最大程度降低损耗, 优化系统运行方式。本文在 DG 已确定布点定容的条件下, 基于间歇性 DG 和负荷的不确定性, 提出 ADN 无功补偿优化配置模型。上层规划以无功补偿电容器的投资成本、网络损耗费用综合最优为目标函数, 下层规划在此基础上考虑调节无功补偿容量及调节有载变压器抽头两种主动管理措施, 对每个场景进行优化。本文采用 K -均值聚类法对场景进行缩减, 结合和声搜索算法和粒子群算法联合求解模型。通过 IEEE33 节点算例进行计算, 验证所提模型和方法的正确性。

1 主动配电网无功补偿双层优化配置模型

1.1 间歇性 DG 出力模型

1) 风力发电模型

分布式风电(Distributed Wind Generation, DWG)的有功出力与风速相关, 输出有功功率可表示为^[9]

$$P_{\text{DWG}} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v < v_{\text{ci}} \text{ 或 } v_{\text{co}} \leq v \\ P_{\text{rated}} \frac{v - v_{\text{ci}}}{v_{\text{rated}} - v_{\text{ci}}} & v_{\text{ci}} \leq v < v_{\text{rated}} \\ P_{\text{rated}} & v_{\text{rated}} \leq v < v_{\text{co}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{rated} 为 DWG 的额定功率; v_{ci} 、 v_{rated} 、 v_{co} 分别为切入风速、额定风速和切出风速。

2) 光伏发电模型

分布式光伏(Photovoltaic Generation, PVG)的有功出力与多因素有关, 其中与光照强度关系最密切。PVG 有功出力与光照强度的关系可表示为^[10]

$$P_{\text{PV}} = \begin{cases} P_{\text{PVGS}} \frac{r}{r_s} & r \leq r_s \\ P_{\text{PVGS}} & r > r_s \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{PVGS} 表示 PVG 的额定功率; r_s 表示额定光照强度。

1.2 场景缩减

本文采用 K -均值聚类^[11]方法对风速、光照强度及负荷场景进行聚类, 该方法简单有效, 能保证缩

减后的场景具有多样性。 $x_i (i=1, 2, 3, \dots, N)$ 表示缩减前的场景集。场景缩减的具体实现步骤如下:

1) 首先从原始场景集中随机选取 K 个场景作为聚类中心, 质心场景集合为 $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_K$ 。

2) 分别计算场景集中剩下场景到各个聚类中心 ξ_k 的欧式距离 $d(x_i, \xi_k)$, 将剩下场景划分到距离其最近的聚类中心所在的场景。

3) 分别计算 K 个场景中所有场景的均值作为 K 个场景新的聚类中心。

4) 重复步骤 2) 和步骤 3), 直到质心和聚类结果不再变化, 场景缩减结束。

场景缩减结束后, 已将原始 N 个场景缩减成了 K 个场景, 可以根据各个场景的样本大小, 计算各个场景的频率。根据大数定理, 只要 N 够大, 频率即为概率^[11]。

缩减完后, 根据 1.1 节的公式计算各个场景 DWG 和 PVG 的出力大小。

1.3 主动配电网无功补偿双层优化配置模型

双层规划模型是一种具有双层递阶结构的系统优化模型^[12]。本文中的上层模型用于确定无功补偿的配置方式, 下层模型在上层模型的基础上求解满足约束条件下的系统最优运行方式。

上层规划以无功补偿电容器的投资成本、网络损耗费用综合最小为目标函数。

$$\min F = C_i + C_p \quad (3)$$

式中: C_i 为折算到每年的无功补偿电容器投资成本; C_p 为系统年网络损耗费用。

$$C_i = \frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n - 1} c_q \sum_{i=1}^{N_c} Q_i \quad (4)$$

$$C_p = 8760 \sum_{s=1}^{N_s} p_s P_{\text{loss},s} c_e \quad (5)$$

式中: d 为折现率; n 为无功补偿电容器使用年限; c_q 为单位容量无功补偿电容器投资费用; N_c 为待安装无功补偿电容器的节点数; Q_i 为待安装节点 i 安装无功补偿电容器的容量; N_s 为总场景数; $P_{\text{loss},s}$ 为系统网损; c_e 为单位电价; p_s 为场景 s 发生的概率。

式(4)为折算到每年的无功补偿电容器投资成本; 式(5)为系统的年网络损耗费用。

上层约束条件为

$$0 \leq Q_i \leq Q_{\text{max},i} \quad (6)$$

$$Q_i = n_i Q \quad (7)$$

式中: $Q_{\text{max},i}$ 为节点 i 所允许安装无功补偿电容器的安装容量上限; n_i 为节点 i 所安装的无功补偿电容

器组数； Q 为待选安装节点 i 单组无功补偿电容器的容量。

ADN 是未来配电系统发展的必然趋势，而主动管理措施是 ADN 的核心，在规划阶段就应该考虑在内。本文采用的主动管理措施有^[13-14]：1) 调节无功补偿大小；2) 调节有载变压器抽头。下层规划以每个场景的网络损耗费用最小为目标函数。

$$\min f = 8760 p_s P_{\text{loss},s} c_e \quad (8)$$

式(8)为场景 s 的网络损耗费用。

约束条件如下所述。

1) 节点功率平衡等约束条件

$$P_{is} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (9)$$

$$Q_{is} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (10)$$

式中： P_{is} 、 Q_{is} 分别为节点 i 的注入有功功率和无功功率； U_i 、 U_j 分别为节点 i 、 j 的电压幅值； G_{ij} 、 B_{ij} 分别为导纳矩阵的实部和虚部； θ_{ij} 为节点 i 、 j 的相角差。

2) 节点电压约束条件

$$U_{\min i} \leq U_i \leq U_{\max i} \quad (11)$$

式中： U_i 为节点 i 的电压幅值； $U_{\min i}$ 、 $U_{\max i}$ 分别为节点 i 允许的最小值和最大值。

3) 无功补偿电容器投切容量约束

$$Q_{ci}^{\min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci}^{\max} \quad (12)$$

式中： Q_{ci}^{\min} 、 Q_{ci}^{\max} 分别为节点 i 无功补偿容量的最小值和最大值。

4) 变压器二次侧电压调节范围约束

$$U_{\text{OLTC}}^{\min} \leq U_{\text{OLTC}} \leq U_{\text{OLTC}}^{\max} \quad (13)$$

式中： U_{OLTC} 为有载变压器二次侧电压幅值； U_{OLTC}^{\min} 、 U_{OLTC}^{\max} 分别为有载变压器二次侧电压下限与上限。

5) 支路功率约束

$$S_{ij} \leq S_{ij}^{\max} \quad (14)$$

式中： S_{ij} 为支路的容量； S_{ij}^{\max} 为支路 ij 允许的最大容量。

6) 禁止倒送功率约束

$$P_{\text{sub}} \geq 0 \quad (15)$$

$$Q_{\text{sub}} \geq 0 \quad (16)$$

式中： P_{sub} 、 Q_{sub} 分别为联络变电站低压侧向规划系统注入的有功功率和无功功率。

2 混合求解算法

2.1 上层模型求解

和声搜索算法源于对音乐演奏中通过调和音符

达到最优演奏效果的模拟^[15]。和声搜索算法具有求解方式新颖，易于理解，鲁棒性强等优点，广泛运用于各个领域。

和声搜索算法的步骤如下：

1) 确定和声搜索算法的参数。

2) 初始化和声记忆库 HM 。

3) 以概率 $HMCR$ 在 HM 中随机选择新解，否则以概率 $1-HMCR$ 在 HM 外随机选择一个新解。如果在 HM 内选择一个新解，需要以概率 PAR 对新解进行局部扰动，扰动变量为 bw 。

4) 更新 HM 。

5) 判断是否满足结束条件。若满足，则输出结果；未满足则重复步骤 3) 和 4)。

本文采用的是改进的和声搜索算法^[16]，即用式(17)、式(18)对 PAR 与 bw 进行动态调整。改进的和声搜索算法有利于在迭代前期进行全局搜索，在迭代后期进行精细化搜索。

$$PAR(t) = PAR_{\min} + (PAR_{\max} - PAR_{\min}) \times t / T \quad (17)$$

$$bw(t) = bw_{\max} \times \exp(\ln(bw_{\min} / bw_{\max}) \times t / T) \quad (18)$$

式中： PAR_{\max} 、 PAR_{\min} 分别为 PAR 取值的最大值和最小值； t 为当前迭代次数， T 为最大迭代次数； bw_{\max} 和 bw_{\min} 分别为 bw 取值的最大值和最小值。

2.2 下层模型求解

粒子群优化(PSO)算法是一种模拟鸟群觅食行为的智能寻优算法。PSO 中每个粒子是一个候选解。PSO 是由速度、位置及适应值大小三个要素组成。

在每次迭代中，每个粒子用式(19)和式(20)来更新位置和速度。

$$v_{id} = w \times v_{id} + c_1 \times \text{rand}() \times (p_{id} - x_{id}) + \quad (19)$$

$$c_2 \times \text{rand}() \times (g_{id} - x_{id})$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (20)$$

式中： w 为惯性权重系数； c_1 、 c_2 为学习因子； rand 产生 0 到 1 之间的随机数； p_{id} 为个体粒子最好的位置； g_{id} 为全体粒子最优的位置。

为了解决 PSO 易陷入局部收敛的问题，本文根据文献[17]对 w 进行改进。改进后的粒子群算法有利于寻找最优解。

2.3 双层模型求解流程

本文属于多场景双层规划模型，上层规划是对无功补偿电容器优化配置，下层规划是在此基础上对每个场景进行主动管理。本文利用和声搜索算法和粒子群算法相结合用于模型求解，求解流程如图 1 所示。

具体步骤说明如下：

- 1) 确定求解算法的参数, 包括和声搜索算法的迭代次数、*HM* 大小以及 PSO 的迭代次数、种群规模等。
- 2) 获取缩减后的风速、光照强度及负荷的场景数据、网架信息、间歇性 DG 的出力模型。
- 3) 初始化 *HM*, 即初始化上层规划中无功补偿电容器的容量和位置。每一条和声代表候选规划方案。
- 4) 将上层中无功补偿电容器的容量和位置传递到下层, 采用粒子群算法求解下层最优控制策略获取每条和声的每个场景最优值, 并将计算结果传递到上层。
- 5) 根据下层求得的最优值计算上层目标值, 并更新 *HM*。
- 6) 判断是否满足最大迭代次数。若满足, 则输出最优解和最优值; 反之, 则返回步骤 4)。

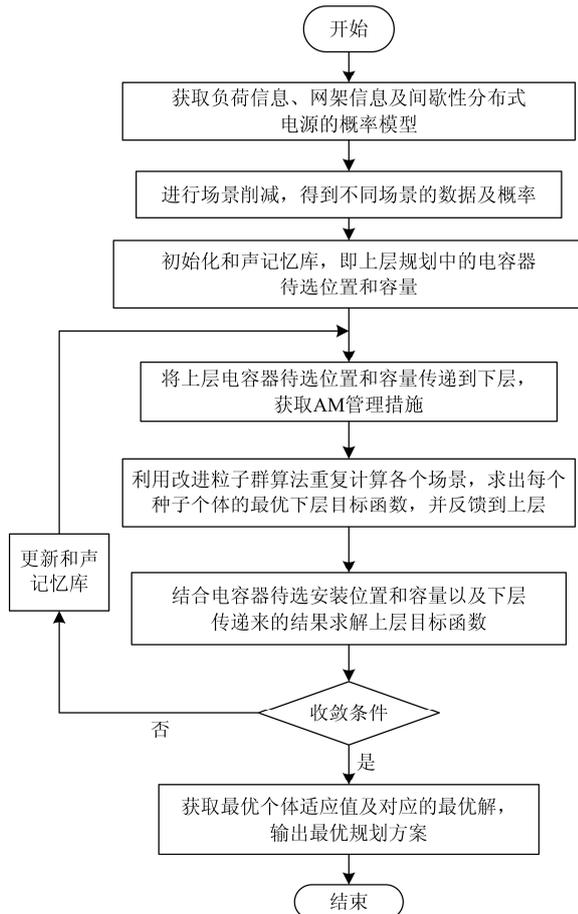


图 1 混合求解算法计算流程图
Fig. 1 Flowchart of hybrid algorithm

3 算例

3.1 算例介绍

本文采用 IEEE33 节点算例进行仿真。IEEE33 节点配电系统如图 2 所示, 电压等级为 12.66 kV,

总有功负荷及总无功负荷分别为 3715 kW、2300 kvar。具体数据见文献[18]。规划区的 DG 出力及负荷年变化曲线如图 3。DG 出力的年变化曲线由 HOMER 软件生成, 负荷的年变化曲线采用 IEEE-RTS 提供的数据进行计算^[19]。

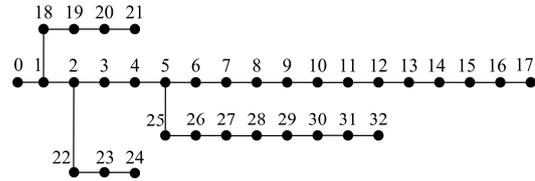


图 2 IEEE33 节点配电系统
Fig. 2 IEEE33-bus distribution network

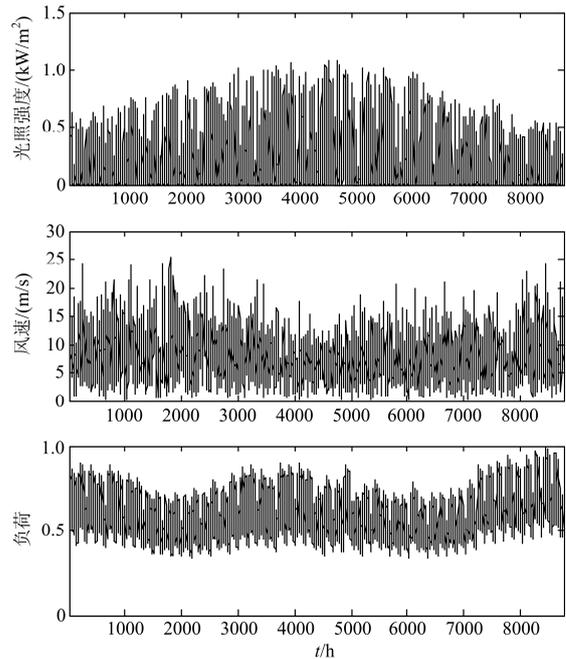


图 3 风速、光照强度及负荷的年变化曲线

Fig. 3 Annual wind speed, illumination intensity and load curves

本文 *K* 取 30, 图 4、图 5 分别为风速和光照强度缩减前后的累计概率曲线。缩减前后风速的累计概率曲线非常接近, 而缩减后光照强度的累计概率与缩减前的累计概率偏差也很小。说明场景缩减能够较好地拟合风速和光照强度的变化。

选取 7、9、23、29、31 为待选安装无功补偿电容器节点, 单组电容器容量均为 50 kvar, 各待选节点安装无功补偿电容器组数上限为 10 台, 电容器综合成本为 110 元/kvar。电容器的使用寿命为 15 年, 折现率为 8%。网损电价为 0.5 元/kW·h。节点 9、29 接入 DWG, 安装容量分别为 300、200 kW, 切入风速、切出风速和额定风速分别为 3 m/s、20 m/s 和 13.5 m/s。节点 17、24 接入 PVG, 安装容量均为

300 kW，额定光照强度为 1000 W/m^2 。有载变压器二次侧电压调节范围为 $0.95\sim 1.05$ 。无功补偿电容器容量调节上限为所安装的全部容量。

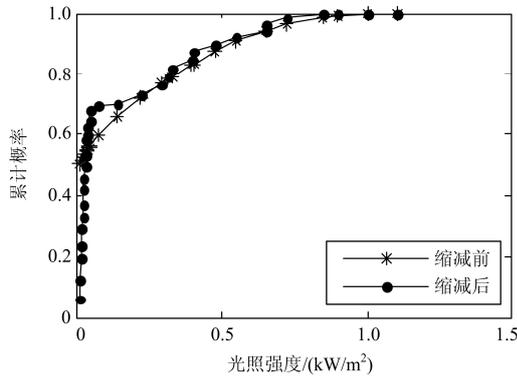


图 4 光照强度的累计概率曲线

Fig. 4 Cumulative probability curves of illumination intensity

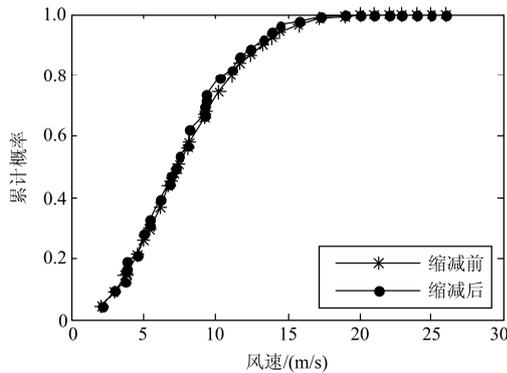


图 5 风速的累计概率曲线

Fig. 5 Cumulative probability curves of wind speed

3.2 优化结果分析

本文采用 Matlab 编程，在和声搜索算法中，HM 大小为 40，迭代次数为 300。在 PSO 中，种群规模为 50，迭代次数为 200。进行以下两种方案的计算。

方案 1: 考虑主动管理措施的 ADN 无功补偿电容器规划。

方案 2: 不考虑主动管理措施的传统配电网无功补偿电容器规划。

计算结果如表 1 所示。

表 1 规划结果

Table 1 Results of planning

方案	优化配置结果	总接入容量
1	7(3)、9(4)、23(1)、29(8)、31(4)	1000 kvar
2	7(3)、9(5)、23(4)、29(9)、31(3)	1200 kvar

表 1 中 7(3)表示节点 7 安装了 3 组电容器。从规划结果可以看出，方案 1 的无功补偿电容器总安装容量为 1000 kvar，而方案 2 为 1200 kvar。虽然方案 2 安装的总容量比方案 1 多，但是其网络损耗

成本也比方案 2 多，如表 2 所示。

表 2 不同规划方案最优配置下的成本

Table 2 Planning results for different schemes

方案	方案 1	方案 2
投资成本/万元	1.287	1.54
网络损耗费用/万元	8.25	14.52
总成本 /万元	9.54	16.06

由表 2 可得，考虑主动管理措施时，投资成本与网络损耗成本均减少，总成本降至 9.54 万元，减少了 6.52 万元，长期积累将是一笔很大的费用。由此表明，通过动态调节无功容量及有载变压器抽头可优化系统运行方式。因此，在 ADN 无功补偿规划阶段考虑主动管理措施能减少投资成本及网络损耗费用，以最佳的方式安装补偿设备。

本文计算以下 5 种情况的系统网络损耗：1) 未接入 DG 时，负荷为固定值的原始系统网络损耗；2) 未接入 DG 时，考虑负荷不确定性的系统网络损耗。3) 接入 DG 后的系统网络损耗。4) 接入 DG 的传统配电网无功补偿优化配置后的系统网络损耗。5) 本文规划下 ADN 的系统网络损耗，即考虑主动管理措施下的无功补偿优化配置后的系统网络损耗。计算结果如图 6 所示。

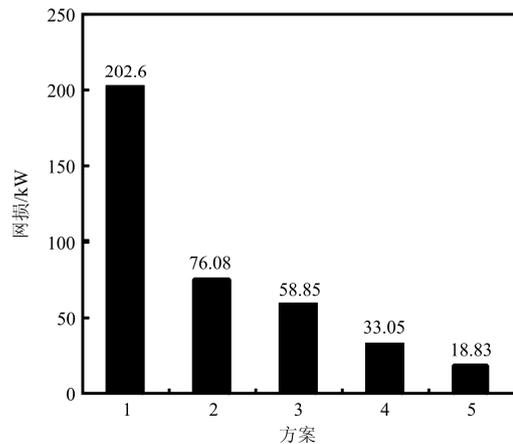


图 6 不同方案的损耗

Fig. 6 Power loss of different schemes

由图 6 可看出，方案 1 比方案 2 的网络损耗增加了 126.52 kW，说明考虑了负荷不确定性的系统网损相对于未考虑负荷不确定性的情况大大减少了。不考虑负荷不确定性的无功补偿规划是一种传统保守的规划，对于计算损耗影响很大。对比方案 2 与方案 3，DG 对配电网提供无功支撑，能减少了网络损耗。方案 4 比方案 3 网损降至 33.08 kW，说明通过接入无功补偿可以减少配电系统的网损。而考虑了主动管理措施后的 ADN 无功补偿规划相对

于传统配电网规划, 网络损耗减少 14.22 kW, 降幅明显。

图 7 为不同情况下的系统节点电压分布情况。

由图可知, 由于 DG 的无功支撑不足, 接入 DG 的原始系统节点电压较低, 末端节点已出现电压越限的情况。对系统进行传统的无功补偿规划后, 由于 C 的接入, 整体提升了电压水平。

ADN 自动化水平相对于传统配电网将显著提高, 在规划阶段就必须考虑主动管理措施。由图 7 可知, 采用调节有载变压器抽头及调节无功补偿两种主动管理措施优化系统运行方式后, 系统节点电压水平相对于传统配电网无功规划总体升高, 更加稳定。

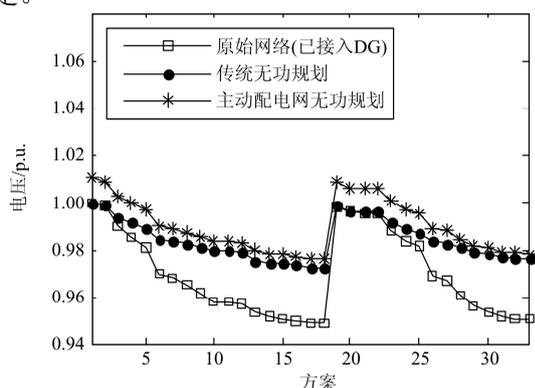


图 7 不同方案的电压分布

Fig. 7 Voltage profile of different schemes

综上, 在 ADN 无功补偿规划阶段考虑主动管理措施及负荷的不确定性, 其投资成本与网络损耗费用均减少了。同时, 降低了网络损耗, 且系统电压水平更加稳定。本文所提的双层规划模型能更好地改善系统的运行状况, 使规划结果更符合实际情况。

4 结论

本文考虑了间歇性 DG 及负荷的不确定性, 提出了 ADN 无功补偿双层优化配置模型。上层规划以电容器的投资成本、网络损耗成本综合最优为目标函数, 下层规划在此基础上调节有载变压器二次侧电压、调节无功补偿容量, 对每个场景进行优化。本文采用 K -均值聚类法对场景进行缩减, 结合和声搜索算法和粒子群算法对模型进行求解。得出以下结论:

1) 本文考虑间歇性 DG 及负荷的不确定, 使无功规划的结果更符合实际。利用 K -均值聚类算法缩减场景, 提高计算效率又能保证场景的缩减精度。

2) 采用调节有载变压器二次侧电压、调节无功补偿容量两种主动管理措施, 对系统运行方式进行优化, 得到更加合理的 ADN 无功补偿规划方案,

并且减少综合成本及网损, 总体提升节点电压水平。

3) 本文所提的双层规划模型可以为 ADN 无功补偿规划提供方向, 具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 曾博, 刘念, 张玉莹, 等. 促进间歇性分布式电源高效利用的主动配电网双层场景规划方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 155-163.
ZENG Bo, LIU Nian, ZHANG Yuying, et al. Bi-level scenario programming of active distribution network for promoting intermittent distributed generation utilization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 155-163.
- [2] 柳春芳. 主动配电网的一体化设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 49-55.
LIU Chunfang. An integrated design method of active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 49-55.
- [3] 潘超, 焦薇羽, 孟涛, 等. 基于混合智能粒子群算法的广义电源主动配电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 69-75.
PAN Chao, JIAO Weiyu, MENG Tao, et al. Optimal allocation of generalized power sources in active distribution network based on hybrid intelligent particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 69-75.
- [4] 张跃, 杨汾艳, 曾杰, 等. 主动配电网的分布式电源优化规划方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 67-72.
ZHANG Yue, YANG Fenyan, ZENG Jie, et al. Research of distributed generation optimization planning for active distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 67-72.
- [5] 马钊, 梁惠施, 苏剑. 主动配电系统规划和运行中的重要问题[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1499-1503.
MA Zhao, LIANG Huishi, SU Jian. Important issues in planning and operation of active distribution system[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1499-1503.
- [6] 李静, 戴文战, 韦巍. 基于混合整数凸规划的含风力发电机组配电网无功补偿优化配置[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 121-129.
LI Jing, DAI Wenzhan, WEI Wei. A mixed integer convex programming for optimal reactive power compensation in distribution system with wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 121-129.
- [7] 陈丽, 张晋国, 苏海锋. 考虑并网光伏电源出力时序特性的配电网无功规划[J]. 电工技术学报, 2014,

- 29(12): 120-127.
CHEN Li, ZHANG Jinguo, SU Haifeng. Reactive power planning for distribution system with grid-connected photovoltaic system considering time-sequence characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 120-127.
- [8] 朱勇, 杨京燕, 高领军, 等. 含异步风力发电机的配电网无功优化规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 80-84.
ZHU Yong, YANG Jingyan, GAO Lingjun, et al. Research on optimal reactive power planning for distribution network containing asynchronous wind power generators[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 80-84.
- [9] 张沈习, 陈楷, 龙禹. 基于混合蛙跳算法的分布式风电电源规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 76-82.
ZHANG Shenxi, CHEN Kai, LONG Yu. Distributed wind generator planning based on shuffled frog leaping algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 76-82.
- [10] LIU Z P, WEN F S, LEDWICH G. Optimal siting and sizing of distributed generation in distribution system considering uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2541-2551.
- [11] 张沈习, 李珂, 程浩忠, 等. 间歇性分布式电源在主动配电网中的优化配置[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 45-51.
ZHANG Shenxi, LI Ke, CHENG Haozhong, et al. Optimal allocation of intermittent distributed generator in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 45-51.
- [12] 万仲平, 肖昌育, 王先甲, 等. 不确定市场下的一种二层规划最优竞价模型[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(19): 12-16.
WAN Zhongping, XIAO Changyu, WANG Xianjia, et al. Bi-level programming model of optimal bidding strategies under the uncertain electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(19): 12-16.
- [13] ABAPOUR S, ZARE K, MOHAMMADI-IVATLOO B. Dynamic planning of distributed generation units in active distribution network[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(12): 1455-1463.
- [14] 邢海军, 程浩忠, 张逸. 基于多种主动管理策略的配电网综合无功优化[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1504-1510.
XING Haijun, CHENG Haozhong, ZHANG Yi. Reactive power comprehensive optimization in distribution network based on multiple active management schemes[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1504-1510.
- [15] 宋春丽, 刘涤尘, 吴军, 等. 基于改进和声搜索算法的电网多目标差异化规划[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 142-148.
SONG Chunli, LIU Dichen, WU Jun, et al. Multi-objective differential planning based on improved harmony search algorithm for power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 142-148.
- [16] MAHDAVI M, FESANGHARY M, DAMANGIR E. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems[J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 188(2): 1567-1579.
- [17] 姜建国, 田旻, 王向前, 等. 采用扰动加速因子的自适应粒子群优化算法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2012, 39(4): 74-80.
JIANG Jianguo, TIAN Min, WANG Xiangqian, et al. Adaptive particle swarm optimization via disturbing acceleration coefficients[J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2012, 39(4): 74-80.
- [18] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(4): 1401-1407.
- [19] GRIGG. The IEEE reliability test system 1996[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 1010-1020.

收稿日期: 2016-06-22; 修回日期: 2016-09-15

作者简介:

严艺芬(1991—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为主动配电网规划; E-mail: yanyf815@163.com

吴文宣(1960—), 男, 高级工程师, 研究方向为智能电网、电力系统运行和管理;

张逸(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为主动配电网、电能质量以及分布式能源技术。

(编辑 姜新丽)