

基于综合敏感性分析的时序分布式电源规划

黄付顺, 王倩, 何美华, 陈前宇

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 随着配电网中分布式电源渗透率的逐渐提高, 对电网电压和网损的影响变得明显。这种影响和分布式电源规划的位置和容量密切相关。提出的时序分布式电源规划的方法: 首先利用节点电压和网损综合敏感性分析, 筛选出分布式电源的安装位置节点; 然后利用优化方法对分布式电源容量优化。其中容量优化方法: 以减少网络损耗和提高电压水平两个技术指标建立目标函数, 利用机会约束规划方法构建约束条件; 并使用蒙特卡洛模拟的方法对分布式电源和负荷时序模型进行随机潮流计算; 最后利用精英策略的遗传算法求得分布式电源的最优配置容量。算例仿真结果验证了该规划方法的有效性。

关键词: 选址; 定容; 敏感性分析; 时序性; 分布式电源

Timing distributed power planning based on a comprehensive sensitivity analysis

HUANG Fushun, WANG Qian, HE Meihua, CHEN Qianyu

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In the distribution network, with the permeability of distributed generator increasing, the influence on grid voltage and the network loss will become apparent. This effect is closely related to the location and capacity of distributed generator. A method of planning the timing distributed generator is proposed. First installation node of DG is selected by the comprehensive sensitivity analysis of node voltage and net loss, then optimization methods are used for distributed power capacity optimization. The optimization method is, establishing the objective function in order to reduce the network loss and improve the level of voltage, and establishing the conditions by chance constrained programming method; and doing random flow calculation by using the Monte-Carlo simulation method for random scheduling of DG and load; finally, the genetic algorithm of elitist strategy is employed to solve the model. Results verify the effectiveness of the method of site selection and capacity.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307144).

Key words: site selection; capacity determination; sensitivity analysis; timing characteristics; distributed generator

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)10-0044-07

0 引言

分布式电源(distributed generation, DG)大多为清洁可再生能源, 是实现电力行业低碳化发展的关键所在, 接入配电网具有低碳效益, 能降低网络损耗、改善电压质量等^[1-3], 同时因为环境问题、负荷增长和小规模发电技术进步等因素^[4-5], DG在配电网中迅速增长, 特别是风力发电机(wind turbine generator, WG)、光伏电源(photovoltaic, PV)受到广泛关注。

可再生分布式电源在未来配电网中将会占较高的渗透率^[6], 文献[7]分析 DG 渗透率为 40%情况下 DG 对配电网稳定性的影响。可再生 DG, 特别 WG、PV 具有时序性的特点, 配电网的负荷也具有一定的时序性的特点, 合理考虑 DG、负荷的时序性对 DG 配电网规划结果的准确性有重要意义^[8]。文献[9]将 DG、负荷考虑成恒定大小对 DG 配电网规划, 文献[10-11]只考虑 DG、负荷的随机特性, 未考虑其时间因素, 得来的结果都有一定的误差。DG 并入配电网的位置不同对配电网的影响程度不同, 文献[12-13]在 DG 规划时只对 DG 容量进行优化配置, 未对其 DG 位置进行优化分析。配电网节点注入功

率与网络损耗、电压呈现非线性关系, 利用连续潮流计算方法有较大的计算量, 文献[14]提出电压敏感性分析的方法对 DG 进行位置优化, 该方法通过基本矩阵运算和一次潮流计算降低了计算量。本文推导出网损敏感性公式, 并将电压敏感性和网损敏感性联合对 DG 进行位置优化。

本文对 DG 位置和容量分别进行了优化配置: 以电压水平、网络损耗两个技术指标衡量 DG 对配电网的影响, 提出利用电压敏感性和网损敏感性综合分析对 DG 进行选址的方法; 并且通过建立目标函数模型和 DG、负荷的时序模型, 利用精英策略遗传算法对 DG 进行定容优化; 最后本文在 IEEE-33 配电系统仿真验证, 通过合理的配置 DG 的位置和容量可有效降低配电网的网损和提高电压水平。

1 目标模型与约束条件

1.1 目标函数

本文提出配电网网络损耗减少指标 I_{loss} 、电压水平指标 I_{volt} 来量化 DG 并入配电网时造成网络损耗、电压水平的变化。

$$I_{\text{loss}} = \frac{S_{\text{loss}} - S_{\text{loss}}^{\text{DG}}}{S_{\text{loss}}} \quad (1)$$

$$I_{\text{volt}} = \sum_{i \in n} \frac{U_i^{\text{DG}} - U_i}{U_i} \quad (2)$$

式中: S_{loss} 为配电网未并入 DG 时的总损耗; $S_{\text{loss}}^{\text{DG}}$ 为配电网并入 DG 时的总网络损耗; U_i 为未并入 DG 时的节点 i 电压; U_i^{DG} 为并入 DG 时的节点 i 电压。

1.2 约束条件

WG、PV 出力和负荷的功率有明显的随机性和不确定性, 故本文采用机会约束规划方法^[15], 允许所做的决策在一定的程度上可以不满足电压、支路功率约束条件, 采用的约束分别为

(1) 潮流约束

$$\begin{cases} P_{is} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{is} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{is} 和 Q_{is} 为节点 i 的有功注入和无功注入; U_i 为节点 i 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为系统导纳矩阵的实部和虚部; θ_{ij} 为节点 i 和 j 的电压相位差。

(2) 电压约束

$$P\{U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}\} \geq \lambda_u \quad i=1, 2, \dots, N_b \quad (4)$$

式中: $P\{\}$ 表示 $\{\}$ 中事件成立的概率; U_i 为节点 i 的电压幅值; λ_u 为电压约束的置信水平。

(3) 待选节点安装容量约束

$$\begin{cases} 0 \leq W_{\text{pv},i} \leq W_{\text{pv},i}^{\max}, & i=1, 2, \dots, N_{\text{pv}} \\ 0 \leq W_{\text{wg},j} \leq W_{\text{wg},j}^{\max}, & j=1, 2, \dots, N_{\text{wg}} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $W_{\text{wg},i}$ 、 $W_{\text{pv},j}$ 分别为第 i 个 WG 待选节点处接入容量、第 j 个 PV 待选节点处接入容量。

(4) 支路功率约束

$$S\{|S_i| \leq S_i^{\max}\} \geq \lambda_l, \quad i=1, 2, \dots, N_l \quad (6)$$

式中: S_i 为第 i 条支路传输视在功率; λ_l 为支路潮流约束的置信水平。

2 DG 节点敏感性分析

在配电网中, 每个 DG 待选安装节点对配电网的电压水平、网络损耗影响程度不同; 对配电网电压水平或网络损耗影响较大的节点的电压、网损敏感性就较大。配电网中 DG 主要输出有功功率, 对配电网电压、网损产生主要影响。筛选 DG 安装节点只需要考虑其主要因素, 故本文考虑 DG 只输出有功功率时的敏感性分析。

2.1 DG 节点电压敏感性分析

利用节点电压敏感性分析选择 DG 的候选安装节点。在电力系统稳态状态下, 功率、电压的线性化方程^[16]可表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\Delta P = (J_{PV} - J_{P\theta} J_{Q\theta}^{-1} J_{QV}) \Delta V \quad (8)$$

可得

$$\Delta V = (J_{PV} - J_{P\theta} J_{Q\theta}^{-1} J_{QV})^{-1} \Delta P_{\text{DG}} \quad (9)$$

2.2 DG 节点网损敏感性分析

利用网络损耗的敏感性分析选择 DG 的候选安装节点。线路等值电路如图 1 所示。

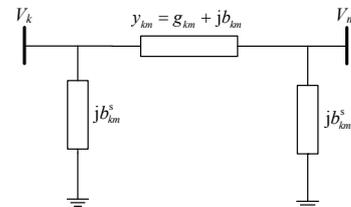


图 1 线路等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit of line

线路的网络损耗可表示为

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{nL} [g_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km})] \quad (10)$$

$$Q_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{nL} [-b_{km}^s (V_k^2 + V_m^2) - b_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km})] \quad (11)$$

式中: P_{loss} 为有功损耗; Q_{loss} 为无功损耗; nL 为网络中线路总数; V_k 、 V_m 为节点 k 、 m 电压; g_{km} 、 b_{km} 、 b_{km}^s 为线路 k - m 电导、电纳、并联电纳; θ_{km} 为节点 k 、 m 之间的相位差。

$$\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta} = \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial P} \left(\frac{\partial P}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial Q} \left(\frac{\partial Q}{\partial \theta} \right) \quad (12)$$

$$\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V} = \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial P} \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right) + \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial Q} \left(\frac{\partial Q}{\partial V} \right) \quad (13)$$

可得

$$\begin{bmatrix} J_{A-P} \\ J_{A-Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial P} \\ \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial Q} \end{bmatrix} = [J^T]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\text{其中, } J = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \quad (15)$$

同理得

$$\begin{bmatrix} J_{R-P} \\ J_{R-Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{\text{loss}}}{\partial P} \\ \frac{\partial Q_{\text{loss}}}{\partial Q} \end{bmatrix} = [J^T]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{\text{loss}}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial Q_{\text{loss}}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: J 为雅克比矩阵^[16]; P 、 Q 分别为节点注入有功功率、无功功率。得网络有功损耗和无功损耗为

$$\Delta P_{\text{loss}} = \Delta P_{\text{DG}} \cdot J_{A-P} + \Delta Q_{\text{DG}} \cdot J_{A-Q} \quad (17)$$

$$\Delta Q_{\text{loss}} = \Delta P_{\text{DG}} \cdot J_{R-P} + \Delta Q_{\text{DG}} \cdot J_{R-Q} \quad (18)$$

2.3 综合敏感性分析

随着配电网节点功率的变化,每个节点的电压、网损敏感性都将会发生变化。故本文采取逐个并入 DG 后计算其电压、网损敏感性大小,然后逐个选取敏感性最大节点为 DG 待选安装节点的方法对 DG 选址优化。节点电压有最大电压约束条件,每个节点的 DG 也有最大的渗透率约束,本文提出利用节点最大渗透率约束 PE_{max} 对 DG 待选安装节点进行筛选出 DG 安装节点, PE_{max} 计算公式为

$$PE_{\text{max}} = \frac{V_{\text{max}} - V}{\Delta V} \cdot \frac{\Delta P_{\text{DG}}}{S_{\text{LOAD}}} \quad (19)$$

式中: V_{max} 是节点的最大约束电压; V 为没有 DG 并网时的节点电压; ΔP_{DG} 为 DG 安装节点并入 DG 的单位功率; ΔV 为当单位功率 DG 并网造成节点电压变化大小; S_{LOAD} 为负荷总视在功率。

本文在配电网中对 DG 规划优化过程如图 2。

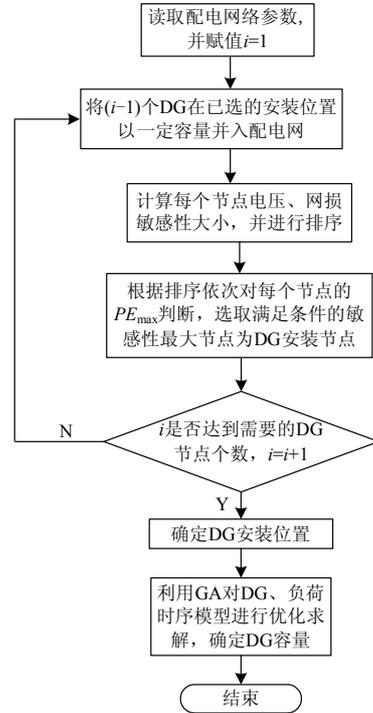


图 2 配电网中 DG 优化规划

Fig. 2 DG planning in distributed system

2.4 敏感性算例分析

本文研究规划地区 DG、负荷数据并网渗透率约为 40%, 为了减少计算量, 考虑负荷为额定功率时对配电网电压敏感性、网损敏感性分析选择 DG 安装节点, 配电系统如第 5 节 IEEE-33 配电网系统。而当只有一个节点 DG 并网时, 只考虑该节点 25% 的渗透率进行分析; 当 $N(N>1)$ 个 DG 并网时, 考虑每个 DG 待选节点 $40\%/N$ 的渗透率进行分析。因为 DG、负荷的时序变化, 为了保证更多时刻节点电压满足约束条件, 考虑候选节点有 4% 的渗透率裕度, 例如, 当节点 15 有并入 10% 渗透率的 DG 时, 而节点 15 需要保证在渗透率 14% 时满足渗透率约束, 即需要 $14\% \leq PE_{\text{max}}$ 。

本文利用 IEEE-33 配网系统的额定负荷数据^[17]进行节点分析, 其中 ΔV_Z 为各节点电压变化 ΔV 之和, ΔS 为网络损耗视在功率的变化: 在配电网中没有 DG 时, 寻找第一个 DG 待选节点, 分析需要安装 DG 渗透率为 25%, 且需要满足渗透率为 $29\% \leq PE_{\text{max}}$ 。通过式(9)、式(17)、式(18)得主要节点敏感性排名如表 1, 并计算每个节点的最大渗透率 PE_{max} 进行筛选待选节点, 对其中主要节点筛选结果如图 3, (为能清楚呈现电压敏感性 ΔV_Z 、网损敏感性 ΔS 、最大渗透率 PE_{max} 三个指标, 图 3 电压敏感性为 $5 \Delta V_Z$ 、网损敏感性为 $100 \Delta S$)。

图 3 中虽然节点 17、16 的电压敏感性和网损敏感性比节点 15、14 大, 但是节点 17、16 不满足渗透率约束, 综合考虑选择节点 15 为 DG 的第一个候选节点。

表 1 节点敏感性分析结果

Table 1 Results of node sensitivity analysis	
敏感性	节点(敏感性从大到小)
ΔV_z	17、16、15、14、13、12、11、10、9、32
ΔS	17、16、15、14、13、12、11、32、31、30

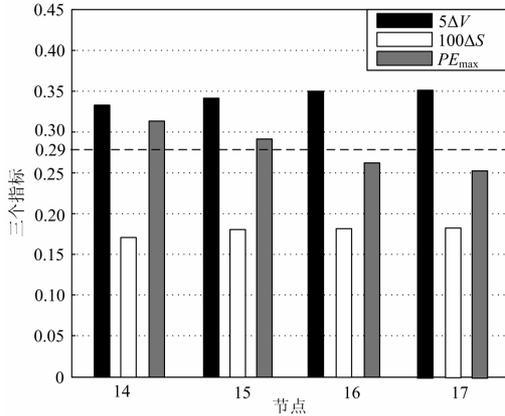


图 3 主要节点筛选结果

Fig. 3 Selected results of the primary node

当节点 15 为 DG 的候选节点时, 选取第二个 DG 候选节点, 则有两个 DG 安装节点, 每个 DG 节点的渗透率为 $40\%/2=20\%$, 且满足渗透率 $24\% \leq PE_{max}$ 。敏感性计算结果如表 2, 主要节点筛选结果如图 4 所示。

表 2 节点敏感性分析结果

Table 2 Results of node sensitivity analysis	
敏感性	节点(敏感性从大到小)
ΔV_z	16、17、15、14、13、12、11、10、9、32
ΔS	32、31、30、29、28、27、26、9、8、7

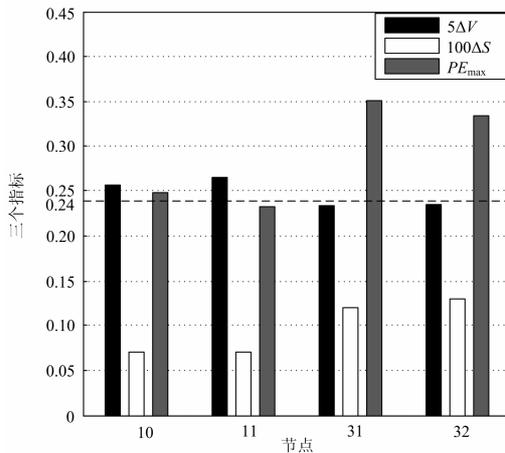


图 4 主要节点筛选结果

Fig. 4 Selected results of the primary node

在满足最大渗透率 PE_{max} 约束条件时, 节点 10 是电压敏感性最大的节点, 节点 32 是网损敏感性最大的节点, 故选取 32、10 同时作为 DG 候选安装节点。

在配电网每个节点上安装分布式电源更有利于提高网络的稳定性, 但是相对集中的配置 DG 更利于管理和维护, 本文只选择三个 DG 待选安装节点分别为 10、15、32。

3 DG 和负荷时序模型

为了反映分布式电源和负荷的时序特点, 本文根据规划地区光照强度、风力大小和负荷大小的全年历史数据(以该地区每小时记录所得数据)建立 DG 和负荷的时序模型, 具体步骤如下:

(1) 将全年分成 4 个季节, 可以利用每个季节的历史数据生成 1 天的概率分布模型来代表该季节的数据分布情况; 其中将每 1 天具体分成 24 个时段, 这样全年将会划分为 $96(4 \times 24)$ 个时段; 考虑每个月有 30 天, 这样每个时段将会有 $90(30 \text{ 天} \times 3 \text{ 个月})$ 个数据生成每个时段的概率分布。

(2) 光照强度、风力大小和负荷大小每个时段概率分布分别采用 weibull 分布、beta 分布和 Gaussian 分布。根据每个时段的历史数据可以计算得式(20)weibull 分布的 k 、 c 参数, 式(21)beta 分布的 α 、 β 参数, 式(22)Gaussian 分布的 μ 、 σ 参数。

(3) 根据每个时段的光照、风力、负荷概率分布情况, 分别将其分 10 个状态, 利用分布函数计算每个状态的概率大小, 这样全年数据最终被划分为 960 个状态, 可得到光照强度、风力大小、负荷时序数据简化状态概率分布情况。

(4) 测试算例的风机和光伏输出功率时序模型可以根据其输出功率与风力大小、光照强度的关系求出, 测试算例的负荷功率数据时序模型可以根据 IEEE33 标准算例中负荷数据乘以实际负荷的时序特性求出。这样就得到风机输出功率、光伏输出功率和负荷功率的时序模型。

(5) 根据得到的时序模型, 利用蒙特卡洛模拟法对光伏出力、风机出力、负荷功率在对应时段的时序模型进行随机抽样, 并利用确定潮流计算方法获得节点电压、功率损耗等系统状态概率分布情况, 进而得到每种方案的节点电压、功率损耗等系统状态期望值。

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (20)$$

$$f(r) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) + \Gamma(\beta)} \left(\frac{r}{r_{max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r}{r_{max}}\right)^{\beta-1} \quad (21)$$

$$f(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(p-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (22)$$

式中: v 为风速大小; k 为形状参数; c 为尺度参数; r 和 r_{\max} 分别为光照大小和最大光照大小; α 和 β 为形状参数; Γ 表示 Gamma 函数; p 为负荷大小; μ 、 σ 为期望和方差。

4 精英策略遗传算法

本文采用精英策略的遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 进行优化计算。GA 是模拟基因遗传与进化原理的自适应概率优化方法, 通过基因的编码组合表示问题的解, 适合处理离散变量问题。基本计算步骤如下:

(1) 利用 DG 时序数据, 计算 WG 的容量系数对 WG 选址, 利用 DG、负荷时序特点对 PV 进行选址, 确定 DG 的位置。输入 GA 的基本参数; 根据待安装 PV、WG 的节点个数确定基因的数目以及染色体个数 N ; 并随机产生待选位置 DG 的容量初值。

(2) 修改子代种群, 利用时序处理方法得到网络电压、支路潮流等状态和目标函数值, 并判断节点电压和支路潮流是否满足约束条件置信水平, 如不满足条件则直接将目标函数赋值无穷小, 在“精英保留”操作中将其剔除。并对进行个体适应度值从大到小排序。

(3) 进行选择、交叉、变异遗传操作, 用子种群取代父种群; 并且通过“精英保留策略”将前 n 个最优个体完成插入到当前种群, 用子代代替父代并返回结构种群。

(4) 判断是否满足收敛条件或达到算法的代数, 否则转步骤(2)。

5 算例分析

本文采用 IEEE-33 系统作为算例, 如图 5 所示, 基准电压为 12.66 kV, 三相功率基准值 10 MVA。图中 0~32 为节点编号, $l_1 \sim l_{32}$ 为网络支路编号。网络支路参数见文献[17]。遗传算法基本参数设置如下: 种群个数为 100, 最大迭代次数 100 次, 交叉率为 0.8, 变异率为 0.2。

本文电压水平波动取 0.95~1.05 p.u. 为合格, $l_1 \sim l_5$ 支路潮流小于 4 MVA 为合格, $l_6 \sim l_{32}$ 支路潮流小于 2 MVA 为合格, 机会约束条件取电压约束 $\lambda_u=95\%$, 支路功率约束 $\lambda_f=95\%$ 。

本文选择 6 种场景进行算例分析: 其中场景 1~4 利用本文提出的综合敏感性分析得到 DG 安装节

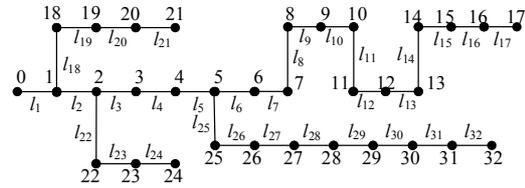


图 5 IEEE-33 配电网系统

Fig. 5 IEEE-33 power distribution system

点, 场景 5 只利用节点电压敏感性分析得到 DG 安装节点, 场景 6 直接给定 DG 安装节点, 本文在上述六种场景下利用相同的方法对 DG 定容优化。对场景 1~4, 根据第 2 节 DG 敏感性分析选址可得: 节点 10、15、32 为 DG 的待选安装节点。场景 1: 没有 DG 并入配电网; 场景 2: 只有光伏电源 PV 并入配电网; 场景 3: 只有风机 WG 并入配电网; 场景 4: 风机 WG 和光伏电源 PV 同时并入配电网; 场景 5: 只利用节点电压敏感性分析选取 9、10、15 为 DG 待选安装节点, PV 和 WG 同时并入网络; 场景 6: 根据经验选择各支路末点为 DG 安装位置, 17、21、32 为 DG 安装节点, PV 和 WG 同时并入网络。其中单台 WG 额定容量为 100 kW, 单台 PV 额定容量为 100 kW, 功率因素为 0.9, 仿真结果如表 3, DG(数量)表示: DG 并入的节点(该节点安装的 DG 数量); 提高电压水平指标 I_{volt} 、网络损耗减少指标 I_{loss} 分别如表 3, 对六种场景下节点电压的期望值和支路总网损的期望值如图 6、图 7 所示。

(1) 通过比较场景 2、3、4 得出, WG 比 PV 有更高的利用效率, WG 在并网数目相对 PV 较少的情况下, 对于减少网络损耗、提高电压水平更明显。同时 WG、PV 联合并网对于降低网损、提高电压水平更为有效。

(2) 比较场景 4 和场景 5, 场景 4 的 I_{volt} 、 I_{loss} 指标分别为 0.648 1、0.720 1, 场景 5 的 I_{volt} 、 I_{loss} 指标分别为 0.669 7、0.453 5。看出只利用节点电压敏感性得到 DG 安装节点, 对于网络电压提高稍好些, 但对于减少网络损耗效果将会差很多。

(3) 比较场景 4 和场景 6, 场景 4 的 I_{volt} 、 I_{loss} 指标分别为 0.648 1、0.720 1, 场景 6 的 I_{volt} 、 I_{loss} 指标分别为 0.623 7、0.648 6。场景 6 的 DG 安装节点是根据经验得到, 对于提高节点电压、降低网损有较好的效果, 但是利用本文综合敏感性分析得到 DG 安装节点的效果更佳显著。

表 3 选址定容优化结果

Table 3 Optimization results of locating and sizing

	PV(数量)	WG(数量)	I_{volt} (电压)	I_{loss} (网损)
场景 1	10(0) 15(0) 32(0)	10(0) 15(0) 32(0)	0	0
场景 2	10(15) 15(8) 32(15)	10(0) 15(0) 32(0)	0.284 7	0.214 1
场景 3	10(0) 15(0) 32(0)	10(6) 15(5) 32(10)	0.570 6	0.708 1
场景 4	10(7) 15(3) 32(6)	10(7) 15(5) 32(7)	0.648 1	0.720 1
场景 5	9(3) 10(6) 15(5)	9(2) 10(9) 15(8)	0.669 7	0.453 5
场景 6	17(3) 21(4) 32(6)	17(9) 21(2) 32(10)	0.623 7	0.648 6

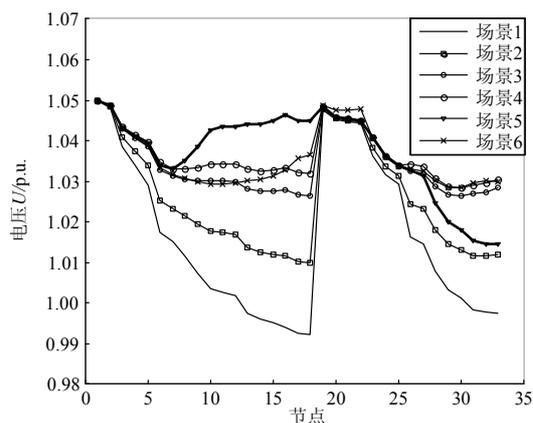


图 6 六种场景下各节点电压期望值

Fig. 6 Node voltage expectations of four scenarios

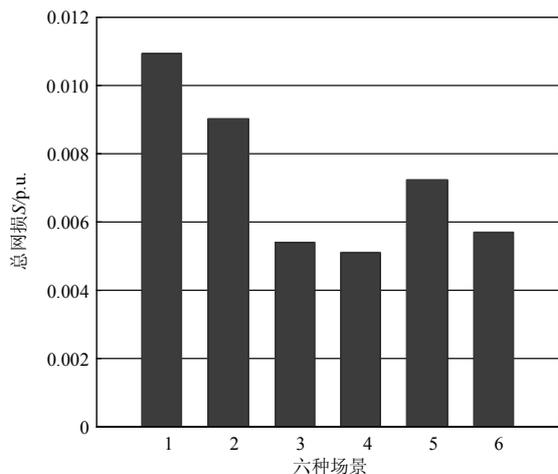


图 7 六种场景下配电网总网损期望值

Fig. 7 Distribution network total network loss expectations of four scenarios

6 结语

(1) 在 DG 的优化配置中不同 DG 安装位置对于改善配电网指标有很大的影响。相对于利用经验直接给出 DG 的安装位置, 本文提出了一种利用综

合敏感性分析的方法对 DG 安装节点进行优化, 选择出 DG 的最佳安装位置。该综合敏感性方法对于提高节点电压、降低网损有较好的效果。

(2) 本文考虑了 DG 和负荷的时序特性, 能够真实地反映配电网的实际运行情况, 并通过划分时段的方法建立了 DG、负荷的时序模型。

本文仅从技术层面考虑了 DG 并网对配电网电压水平、网络损耗的影响, 而对于 DG 的并网规划实际应用则需要进一步考虑 DG 的成本和环保效益等引入目标函数。

参考文献

[1] 王旭强, 刘广一, 曾沅, 等. 分布式电源接入下配电网电压无功控制效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 47-53.
WANG Xuqiang, LIU Guangyi, ZENG Yuan, et al. Analysis on the effects of Volt/Var control method considering distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 47-53.

[2] 麻秀范, 崔换君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 175-181.
MA Xiufan, CUI Huanjun. An improved genetic algorithm for distribution network planning with distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 175-181.

[3] 朱勇, 杨京燕, 张冬清. 基于有功网损最优的分布式电源规划[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 12-16.
ZHU Yong, YANG Jingyan, ZHANG Dongqing. Planning of distributed generation based on optimal real power losses[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 12-16.

[4] 张建华, 曾博, 张玉莹, 等. 主动配电网规划关键问题与研究展望[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 13-23.
ZHANG Jianhua, ZENG Bo, ZHANG Yuying, et al. Key issues and research prospects of active distribution network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 13-23.

[5] 宋卓然, 陈国龙, 赫鑫, 等. 光伏发电的发展及其对电网规划的影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(7): 92-96.
SONG Zhuoran, CHEN Guolong, HE Xin, et al. Study on development of PV generation and its impacts on distribution network planning[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(7): 92-96.

- [6] 赵波, 张雪松, 洪博文. 大量分布式光伏电源接入智能配电网后的能量渗透率研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 95-100.
ZHAO Bo, ZHANG Xuesong, HONG Bowen. Energy penetration of large-scale distributed photovoltaic sources integrated into smart distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 95-100.
- [7] ETTEHADI M, GHASEMI H, VAEZ-ZADEH S. Voltage stability-based DG placement in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 171-178.
- [8] 李亮, 唐巍, 白牧可, 等. 考虑时序特性的多目标分布式电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 58-63.
LI Liang, TANG Wei, BAI Muke, et al. Multi-objective locating and sizing of distributed generators based on time-sequence characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 58-63.
- [9] 徐玉琴, 李雪冬, 张继刚, 等. 考虑分布式发电的配电网规划问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 87-117.
XU Yuqin, LI Xuedong, ZHANG Jigang, et al. Research on distribution network planning considering DGs[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 87-117.
- [10] 于青, 刘刚, 刘自发, 等. 基于量子微分进化算法的分布式电源多目标优化规划[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 66-72.
YU Qing, LIU Gang, LIU Zifa, et al. Multi-objective optimal planning of distributed generation based on quantum differential evolution algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 66-72.
- [11] 卢洋, 卢锦玲, 石少通, 等. 考虑随机特性的微电网电源优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(3): 108-114.
LU Yang, LU Jinling, SHI Shaotong, et al. Optimal siting and sizing of distributed generation planning in microgrid by considering stochastic characteristic[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(3): 108-114.
- [12] 邓威, 李欣然, 李培强, 等. 基于互补性的间歇性分布式电源在配网中的优化配置[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 216-225.
DENG Wei, LI Xinran, LI Peiqiang, et al. Optimal allocation of intermittent distributed generation considering complementarity in distributed network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 216-225.
- [13] 徐迅, 陈楷, 龙禹, 等. 考虑环境成本和时序特性的微电网多类型分布式电源选址定容规划[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 914-921.
XU Xun, CHEN Kai, LONG Yu, et al. Optimal site selection and capacity determination of multi-types of distributed generation in microgrid considering environment cost and timing characteristics[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 914-921.
- [14] ETTEHADI M, GHASEMI H, VAEZ-ZADEH S. Voltage stability-based dg placement in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 171-178.
- [15] 张节潭, 程浩忠, 姚良忠, 等. 分布式风电源选址定容规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 26(16): 1-7.
ZHANG Jietan, CHENG Haozhong, YAO Liangzhong, et al. Study on siting and sizing of distributed wind generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 26(16): 1-7.
- [16] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 437-439.
- [17] 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): 1401-1406.

收稿日期: 2014-08-05; 修回日期: 2014-10-13

作者简介:

黄付顺(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网的新能源规划; E-mail: happywolfing@163.com

王倩(1962-), 女, 教授, 研究方向为电力调度综合自动化系统、电力系统运行与控制等;

何美华(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统经济调度。

(编辑 葛艳娜)