

间歇性分布式电源在主动配电网中的优化配置

张沈习¹, 李珂¹, 程浩忠¹, 张逸², 姚良忠³

(1. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240;

2. 国网福建省电力公司电力科学研究院, 福建 福州 350000; 3. 中国电力科学研究院, 北京 100085)

摘要: 以分布式风电和光伏为代表的间歇性分布式电源 IDG (Intermittent Distributed Generator) 得到了快速发展。考虑风速、光照强度和负荷之间的时序相关性, 以年碳排放量最小为目标建立了 IDG 在主动配电网中的多场景优化配置模型。该模型能够计及调节有载调压变压器抽头、切除 IDG 出力和调节 IDG 功率因数 3 种主动管理措施。利用 K-means 聚类法对场景数量进行缩减并得到每个场景发生的概率。提出采用自适应遗传算法和原对偶内点法相结合的混合求解策略对模型进行求解。IEEE 33 节点主动配电网算例仿真结果验证了所提模型与方法的有效性。

关键词: 主动配电网; 间歇性分布式电源; 优化配置; 主动管理措施; K-means 聚类法; 混合求解策略

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.11.008

0 引言

主动配电网 ADN (Active Distribution Network) 是目前智能配电网的一种发展模式, 能利用先进的自动化、通信和电力电子等新技术实现对接入配电网的分布式电源和其他设备进行主动管理 AM (Active Management)^[1-2]。ADN 的出现给分布式电源优化配置问题带来了新的挑战^[2-5]。

分布式电源按出力特性不同可分为稳定出力型和间歇出力型两大类, 其中后者可称为间歇性分布式电源 IDG (Intermittent Distributed Generator)。常见的 IDG 主要包括分布式风力发电 WTG (Wind Turbine Generator) 和光伏发电 PVG (PhotoVoltaic Generator) 2 种。为了充分发挥 IDG 在配电网中的作用, 需要对其进行优化配置^[2-7]。文献[2]以独立发电商收益最大为目标建立了 WTG 在 ADN 中的优化配置模型, 采用模拟植物生长算法和概率最优潮流法对模型进行求解; 文献[3-5]分别以网损最小、WTG 发电量消纳最大、WTG 渗透容量最大为目标建立模型, 均采用多时段最优潮流法对模型进行求解; 文献[6]以 IDG 投资费用最小和网损最小为目标, 建立了多目标 IDG 优化配置模型, 并采用非支配排序遗传算法得到帕累托最优解集, 供决策者选择; 文献[7]以 ADN 综合费用最小为目标研究了 IDG 和网架的联合优化问题。

从上述文献可以看出, IDG 在 ADN 中的优化配

置方法已经取得了一些研究成果。但上述模型均未专门针对 IDG 接入 ADN 后带来的碳减排效果进行分析和研究。

本文考虑多种 AM 措施和时序相关性, 以年碳排放量最小为目标建立了 IDG 在 ADN 中的多场景优化配置模型; 利用 K-means 聚类法对场景进行缩减并得到每个场景发生的概率, 采用自适应遗传算法和原对偶内点法相结合的混合求解策略对模型进行求解。最后, 在 IEEE 33 节点 ADN 算例上对提出的配置方法进行仿真, 对比了不同情景下的 IDG 优化配置结果, 研究了 AM 措施对碳减排的潜在贡献, 进一步得到了相关结论。

1 IDG 在 ADN 中的优化配置模型

1.1 IDG 出力建模

风速是影响 WTG 出力的最主要因素。通常观测到的风速是距离地面 10 m 高度的风速值 v_{10} , 需要根据所选 WTG 叶轮轮毂高度 h , 将 v_{10} 折算至对应风速 v_h ^[8]:

$$v_h = v_{10}(h/10)^{1/7} \quad (1)$$

WTG 的出力与叶轮轮毂处的风速之间的关系可近似用以下分段函数表示^[8-9]:

$$P_{WTG} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v_h < v_{ci} \text{ 或 } v_{co} \leq v_h \\ P_{WTG,r} \frac{v_h - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} \leq v_h < v_r \\ P_{WTG,r} & v_r \leq v_h < v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $P_{WTG,r}$ 为 WTG 的额定功率; v_{ci} 、 v_r 和 v_{co} 分别为 WTG 的切入风速、额定风速和切出风速。

PVG 方阵的出力受到光照强度、环境温度和湿度等的影响, 其中光照强度对其影响最大。PVG 出力与光照强度之间的关系可以近似表示为^[10]:

收稿日期: 2015-01-15; 修回日期: 2015-08-22
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51261130473); 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2014AA051901)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51261130473) and the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2014AA051901)

$$P_{PVG} = \begin{cases} P_{PVG,r} \frac{I}{I_r} & I \leq I_r \\ P_{PVG,r} & I > I_r \end{cases} \quad (3)$$

其中, $P_{PVG,r}$ 为 PVG 的额定出力; I 为光照强度; I_r 为 PVG 的额定光照强度。

1.2 IDG 优化配置模型

在含 IDG 的 ADN 中, AM 措施主要包括调节有载调压变压器抽头 OLTC(On-Load Tap Changer)、削减 IDG 有功出力、调节 IDG 功率因数三方面内容^[2-5]。本文以年碳排放总量最小为目标, 建立 IDG 在 ADN 中的优化配置模型。

由于 WTG 和 PVG 均属于“零碳电源”, 在运行过程中不产生碳排放, 故碳排放主要来自上级电网的供电, 其数学表达式为:

$$\min C = 8760 \eta \sum_{s=1}^S p_s P_{sub,s} \quad (4)$$

其中, η 为上级电网平均碳排放强度, 即发出单位电量所需排放的碳量; $P_{sub,s}$ 为上级电网在场景 s 对 ADN 的有功供电功率; p_s 为场景 s 发生的概率; S 为总场景数。

约束条件如下。

(1) 待选节点的 IDG 安装容量上限约束:

$$0 \leq P_{i,IDG}^r \leq P_{i,IDG}^{\max} \quad (5)$$

其中, $P_{i,IDG}^r$ 为安装在待选节点 i 的 IDG 容量; $P_{i,IDG}^{\max}$ 为待选节点 i 所允许安装的 IDG 容量上限。

(2) 待选节点 IDG 安装容量的离散性约束:

$$P_{i,IDG}^r = a_i P_{i,WTG,0}^r + b_i P_{i,PVG,0}^r \quad (6)$$

其中, $P_{i,WTG,0}^r$ 为安装在待选节点 i 的单台 WTG 额定容量; $P_{i,PVG,0}^r$ 为安装在待选节点 i 的单个 PVG 方阵的额定容量; a_i 和 b_i 为非负整数, 分别表示安装在待选节点 i 的 WTG 台数和 PVG 方阵数。

(3) ADN 的运行约束。

ADN 在每个场景的运行过程中需要满足一系列约束, 具体如下:

$$P_{i,s} - U_{i,s} \sum_{j=1}^{N_{bus}} U_{j,s} (G_{ij} \cos \delta_{ij,s} + B_{ij} \sin \delta_{ij,s}) = 0 \quad (7)$$

$$Q_{i,s} - U_{i,s} \sum_{j=1}^{N_{bus}} U_{j,s} (G_{ij} \sin \delta_{ij,s} - B_{ij} \cos \delta_{ij,s}) = 0 \quad (8)$$

$$Q_{n,s,IDG} = P_{n,s,IDG} \tan \varphi_{n,s} \quad (9)$$

$$(1 - \omega_{cur,s}) P_{n,s,IDG}^{\max} \leq P_{n,s,IDG} \leq P_{n,s,IDG}^{\max} \quad (10)$$

$$0 \leq P_{sub,s} \leq P_{sub}^{\max} \quad (11)$$

$$0 \leq Q_{sub,s} \leq Q_{sub}^{\max} \quad (12)$$

$$U_i^{\min} \leq U_{i,s} \leq U_i^{\max} \quad (13)$$

$$0 \leq S_{k,s} \leq S_k^{\max} \quad (14)$$

$$U_{OLTCm}^{\min} \leq U_{OLTCm,s} \leq U_{OLTCm}^{\max} \quad (15)$$

$$0 \leq \omega_{cur,s} \leq \omega_{cur}^{\max} \quad (16)$$

$$\varphi_n^{\min} \leq \varphi_{n,s} \leq \varphi_n^{\max} \quad (17)$$

其中, 下标中包含“ s ”的变量均表示场景 s 的值; N_{bus}

为 ADN 的节点数; $P_{i,s}$ 和 $Q_{i,s}$ 分别为节点 i 的有功和无功注入量; $U_{i,s}$ 和 $U_{j,s}$ 分别为节点 i 和 j 的电压幅值; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为导纳矩阵的实部和虚部; $\delta_{ij,s}$ 为节点 i 和 j 之间的相角差; $P_{n,s,IDG}$ 和 $Q_{n,s,IDG}$ 分别为第 n 个 IDG 的有功出力和无功出力; $\varphi_{n,s}$ 为第 n 台 IDG 的功率因数角; $P_{n,s,IDG}^{\max}$ 为第 n 台 IDG 有功出力被削减前的值; $\omega_{cur,s}$ 为 IDG 有功出力的削减率; $P_{sub,s}$ 和 $Q_{sub,s}$ 分别为变电站有功功率和无功功率, 对应的上限值分别为 P_{sub}^{\max} 和 Q_{sub}^{\max} ; U_i^{\min} 和 U_i^{\max} 分别为节点 i 所允许的电压最小值和最大值; $S_{k,s}$ 为支路 k 的视在功率幅值; S_k^{\max} 为支路 k 所能承载的功率最大值; $U_{OLTCm,s}$ 为第 m 个 OLTC 的二次侧电压, U_{OLTCm}^{\min} 和 U_{OLTCm}^{\max} 分别为其下限和上限; ω_{cur}^{\max} 为 IDG 有功出力的最大允许削减率; φ_n^{\min} 和 φ_n^{\max} 分别为第 n 个 IDG 功率因数角的最小值和最大值。式(7)和式(8)为潮流方程约束; 式(9)为 IDG 无功出力和有功出力的关系; 式(10)为 IDG 有功出力上下限约束; 式(11)和式(12)分别为变电站供电的有功约束和无功约束; 式(13)为节点电压约束; 式(14)为支路功率约束; 式(15)为 OLTC 二次侧电压约束; 式(16)为 IDG 有功切除率约束; 式(17)为 IDG 功率因数角上下限约束。

2 模型分析和求解

2.1 模型分析

上述 IDG 优化配置模型在优化 IDG 配置方案的同时, 需要优化 ADN 在各个场景时的运行方式。根据双层规划理论^[11], 可将该模型整理为图 1 所示的双层规划模型框架。从图 1 中可知: 上层规划模型用于确定 IDG 的配置方案, 下层规划模型则是求解满足各种约束条件下的 ADN 最优运行方式, 属于典型的最优潮流问题。

上下层规划的传递关系为: 上层规划将 IDG 的

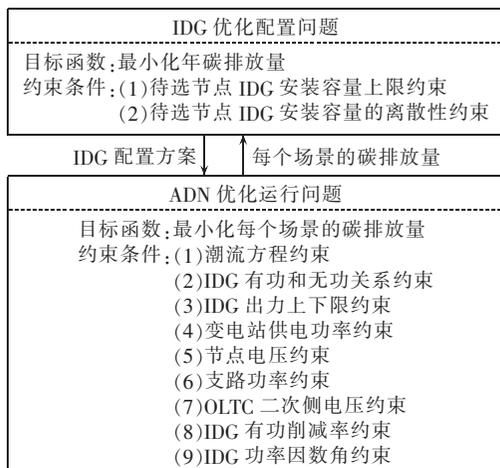


图 1 IDG 优化配置的双层规划模型框架
Fig.1 Framework of bi-level programming model with optimal IDGs allocation

配置方案(IDG 的类型、位置和容量)传递给下层,下层规划则在此基础上对 ADN 的每个场景进行优化运行模拟,并将计算结果(每个场景的碳排放量)传递给上层,上层规划再利用下层规划传递来的结果计算目标函数值(年碳排放总量)。

2.2 模型求解策略

该模型属于复杂的混合整数非线性双层规划问题,难以依靠单一方法求解。本文提出了自适应遗传算法^[12]AGA(Adaptive Genetic Algorithm)和原对偶内点法^[13]PDIPM(Primal-Dual Interior Point Method)相结合的混合策略对其进行求解。其中,AGA 是整个混合求解策略的外部框架,用于确定 WTG 和 PVG 方阵的配置方案,在 AGA 的每次迭代过程中,采用 PDIPM 求解每个场景的碳排放量,进一步计算 AGA 中个体的目标函数值(年碳排放总量)并评估个体的适应度值。

采用 AGA 和 PDIPM 相结合的混合策略对 IDG 优化配置模型进行求解,具体过程如下。

a. 初始化 AGA 种群。按照式(18)的编码方式对 AGA 中的个体进行十进制编码,随机产生 N_p 个初始个体。其中,每个个体代表一种 IDG 配置方案。

$$\mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_{N_{\text{IDG}}}, z_{N_{\text{IDG}}+1}, z_{N_{\text{IDG}}+2}, \dots, z_{2N_{\text{IDG}}}] \quad (18)$$

其中,前 N_{IDG} 个变量和后 N_{IDG} 个变量分别表示各待选节点 WTG 和 PVG 方阵的安装数量。

b. 计算初始种群的适应度值。用 PDIPM 对每个个体对应的 IDG 配置方案进行最优潮流计算,得到每个场景对应的碳排放量,具体计算过程将在 2.3 节中介绍。然后计算年总碳排放量 C ,进一步计算每个个体的适应度值 $\delta_{\text{fitness}} = F_0 - C$ (其中, F_0 为足够大的常数,以保证适应度值恒为正值)。对于违法约束的个体采用惩罚函数法降低其适应度值。适应度函数值 δ_{fitness} 计算公式如下:

$$\delta_{\text{fitness}} = \begin{cases} F_0 - C & \text{无约束被违反} \\ (F_0 - C)/d & \text{有约束被违反} \end{cases} \quad (19)$$

其中, d 为大于 1 的常数,使得违法约束的个体的适应度值能够得到降低。

c. 置迭代次数: $G_{\text{iter}} = 1$ 。

d. 遗传操作产生新种群。其中,选择操作采用轮转盘赌选择并加入最优个体保持策略,以保证算法的全局收敛性。为了兼顾算法的收敛速度和全局最优性,交叉操作和变异操作分别采用自适应两点交叉算子和自适应多点变异算子。

e. 计算新种群的适应度值。按照步骤 **b** 中的方法计算新种群中每个个体的适应度值。

f. 更新迭代次数: $G_{\text{iter}} = G_{\text{iter}} + 1$ 。

g. 判断 AGA 是否收敛,若是,则输出结果,退出循环;否则转步骤 **d**。

2.3 PDIPM 计算每个场景的碳排放量

PDIPM 具有收敛迅速、鲁棒性强等优点,被广泛用于求解含连续变量的非线性优化问题上。本文将用于求解以碳排放量最小为目标的 ADN 在每个场景时的最优运行方式,具体步骤如下。

a. 将式(7)~(17)中的所有变量统一用 \mathbf{x} 表示,则以每个场景的碳排放量最小为目标的最优潮流问题可写为:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 \\ \mathbf{g} \leq \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \bar{\mathbf{g}} \end{cases} \quad (20)$$

其中, $f(\mathbf{x})$ 为目标函数; $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 分别表示等式约束和不等式约束; $\bar{\mathbf{g}}$ 和 $\underline{\mathbf{g}}$ 分别表示不等式约束的上、下限。

b. 引入松弛变量,将式(20)中的不等式约束转化为等式约束,并构造对数障碍函数对松弛变量进行约束,得到拉格朗日函数 L :

$$L = f(\mathbf{x}) - \mathbf{y}^T \mathbf{h}(\mathbf{x}) - \mathbf{z}^T (\mathbf{g}(\mathbf{x}) - \mathbf{l} - \mathbf{g}) - \mathbf{w}^T (\mathbf{g}(\mathbf{x}) + \mathbf{u} - \bar{\mathbf{g}}) - \mu \sum \ln \mathbf{u} - \mu \sum \ln \mathbf{l} \quad (21)$$

其中, $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_r]^T$ 和 $\mathbf{l} = [l_1, l_2, \dots, l_r]^T$ 为松弛变量,且满足 $\mathbf{u} > 0$ 、 $\mathbf{l} > 0$; μ 为障碍常数; \mathbf{y} 、 \mathbf{z} 和 \mathbf{w} 为拉格朗日乘子。

c. 令拉格朗日函数 L 对所有变量和乘子的偏导数为 0,得到一组非线性方程组:

$$\begin{cases} L_x = \nabla_x f(\mathbf{x}) - \nabla_x \mathbf{h}(\mathbf{x}) \mathbf{y} - \nabla_x \mathbf{g}(\mathbf{x}) (\mathbf{z} + \mathbf{w}) = 0 \\ L_y = \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 \\ L_z = \mathbf{g}(\mathbf{x}) - \mathbf{l} - \mathbf{g} = 0 \\ L_w = \mathbf{g}(\mathbf{x}) + \mathbf{u} - \bar{\mathbf{g}} = 0 \\ L_l = \mathbf{z} - \mu \mathbf{U}^{-1} \mathbf{e} = 0 \\ L_u = -\mathbf{w} - \mu \mathbf{L}^{-1} \mathbf{e} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

其中, ∇_x 为对变量 \mathbf{x} 的一阶偏导算子; $\mathbf{L}^{-1} = \text{diag}(1/l_1, \dots, 1/l_r)$; $\mathbf{U}^{-1} = \text{diag}(1/u_1, \dots, 1/u_r)$; \mathbf{e} 为单位列向量。

式(22)是一组非线性方程组,可通过牛顿拉夫逊法进行求解,详细过程可参见文献[13]。

2.4 K-means 聚类法简化场景数

若风速、光照强度和负荷的样本数据之间的时间间隔为 1 h,则一年共有 8760 个数据样本,即有 8760 个场景。在求解模型时,如果对每个样本(场景)进行一次最优潮流计算,计算量大、耗时长。本文在采用混合策略对模型进行求解前,先采用 K-means 聚类算法对研究时段内具有相似特征的样本(场景)数据进行归类,从而简化原始数据,达到减少计算量和计算耗时的目的。

K-means 算法是一种高效的聚类方法,其基本思想是^[14]:随机选取样本空间中的 K 个点作为初始聚类中心值,以欧氏距离作为样本相似性的评价指标(距离越小,相似性越高),通过迭代逐次更新 K 个聚

类中心值,直到获取最优聚类结果为止。假设样本数为 N ,聚类数为 K ,则采用 K -means 算法对风速、光照强度和负荷进行聚类的过程如下。

a. 从数据样本集 $\{x_i\}_{i=1}^N$ 中任意选取 K 个样本值赋给初始聚类中心 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_K$, 并记 C_k 为第 k 个类别的样本集合。

b. 对于第 i 个样本点 x_i , 计算其与各个聚类中心 μ_k 的欧氏距离 $d(x_i, \mu_k)$, 找出使得欧氏距离最小的聚类中心, 将样本 x_i 归入该聚类中心对应的样本集中。

c. 当所有样本被分类后, 统计落入每个类别的样本数 $N_k (k=1, 2, \dots, K)$, 按式(23)重新计算 K 个聚类中心:

$$\mu_k = \frac{1}{N_k} \sum_{x_i \in C_k} x_i \quad (23)$$

d. 按式(24)计算第 g 次迭代的收敛准则函数值:

$$E(g) = \sum_{k=1}^K \sum_{x_i \in C_k} d(x_i, \mu_k) \quad (24)$$

e. 判断是否收敛。若 $|E(g) - E(g-1)| > \varepsilon$, 则表示没有收敛, 转到步骤 b; 反之, 聚类结束并输出结果。

聚类完成后, 可将 N 个“风速-光照强度-负荷”场景简化为 K 个场景, 并可过式(25)计算得到每个场景发生的频率 p_k :

$$p_k = \frac{N_k}{N} \quad (25)$$

根据大数定律, 只要样本数 N 足够大, 频率 p_k 即为概率。

K -means 聚类完成后, 可按照 1.1 节的方法计算 WTG 和 PVG 方阵在每个场景时的出力。

3 算例仿真和分析

3.1 算例

本文在 IEEE 33 节点 ADN 算例上对提出的模型和求解方法进行验证。IEEE 33 节点 ADN 如图 2 所示, 电压等级为 12.66 kV, 原始线路数据和节点数据参见文献[15]。

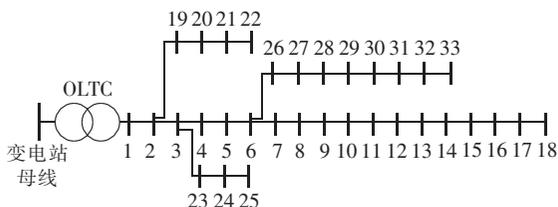


图 2 IEEE 33 节点 ADN

Fig.2 IEEE 33-bus active distribution network

部分参数设置如下: IDG 的待选安装节点为 7、11、15、18、29 和 32, 每个待选节点所允许安装 IDG 额定容量上限为 1000 kW; 单台 WTG 的额定容量为 100 kW, 叶轮轮毂高度 30 m, 切入风速、额定风速和切出风速分别为 4.1、7.7 和 17.9 m/s; 每个 PVG 方阵

的额定容量为 100 kW, PVG 的额定光照强度为 1000 W/m²; ADN 的节点电压所允许范围为 0.93 ~ 1.07 p.u.^[16]; 节点 1 到节点 5 之间的线路容量上限为 6 MV·A, 其他线路的容量上限为 4 MV·A; 变电站最大供电功率为 6 MV·A; 上级电网碳排放强度为 639.2 kg/(MW·h)^[17]; K -means 聚类数为 50; AGA 参数中, 种群规模为 50, 最大迭代次数为 50, 最大和最小交叉率分别为 0.9 和 0.1, 最大和最小变异率分别为 0.5 和 0.1。

AM 控制措施参数调节范围如表 1 所示, 表中 OLTC 二次侧电压为标么值。设该 ADN 所在区域 10 m 高的风速、光照强度和负荷的年变化曲线如图 3 所示, 图中负荷为标么值。

表 1 AM 控制措施的调节范围

Table 1 Control range of active management measures

参数	下限	上限
OLTC 二次侧电压	0.95	1.05
IDG 有功切除率/%	0	20
IDG 功率因数	0.95(迟相)	0.95(进相)

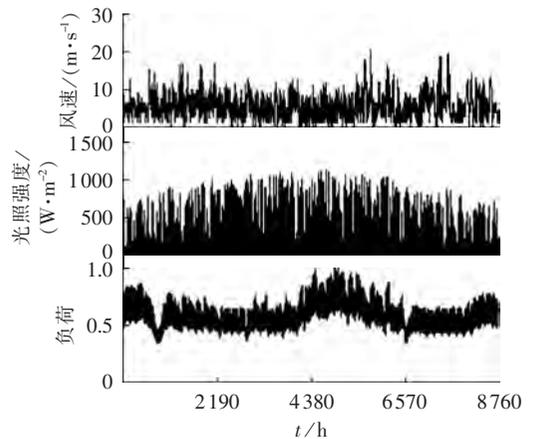


图 3 风速、光照强度和负荷的年变化曲线

Fig.3 Annual variation curve of wind speed, illumination intensity and load

3.2 优化配置结果

首先按照 2.4 节的 K -means 方法对图 3 中的时序风速、光照强度和负荷数据进行聚类, 得到 50 个场景和相应的概率; 然后根据式(1)~(3)计算每个场景对应的 WTG 和 PVG 方阵的出力。在不考虑 IDG 接入且不考虑 AM 措施的情况下, 按照式(4)计算初始配电网的年碳排放量, 为 12.9568×10^6 kg。

考虑 3 种 AM 措施, 采用提出的混合求解策略分别对“方式 1: 单独配置 WTG”、“方式 2: 单独配置 PVG”和“方式 3: WTG 和 PVG 联合配置”3 种方式下的模型进行求解, 得到的最优配置方案和相应的年碳排放量、IDG 渗透容量如表 2 所示。

从表 2 中可以看出, 年碳排放量最小的是方式 3 的最优配置方案, 排放量为 7.3852×10^6 kg。这主

表 2 不同方式下的最优配置结果

Table 2 Results of optimal allocation for different modes

方式	配置方案	年碳排放量/kg	IDG 渗透容量/kW
1	7(7), 11(2), 15(3), 18(1), 29(4), 32(4)	8.0241×10^6	2100
2	7(6), 11(5), 15(4), 18(3), 29(10), 32(7)	9.5609×10^6	3500
3	7(4,0), 11(0,2), 15(2,4), 18(4,3), 29(4,2), 32(7,0)	7.3852×10^6	3200

注:方式 1 中的 7(7)表示节点 7 安装了 7 台 WTG,方式 2 中的 7(6)表示节点 7 安装了 6 个 PVG 方阵,方式 3 中的 7(4,0)表示节点 7 安装了 4 台 WTG 和 0 个 PVG 方阵,其他依此类推。

要是因为风光资源存在一定的互补特性,使得 WTG 和 PVG 的出力也存在互补性,能让 ADN 在满足各种约束条件的基础上接纳更多的 IDG,利于减少传统电源的供电量,从而减少年碳排放量。

此外,从表 2 中还可以看到,方式 2 的最优方案对应的 IDG 渗透容量(3500 kW 的 PVG 方阵)比方式 1 的最优方案对应的 IDG 渗透容量(2100 kW 的 WTG)大,但是碳排放量仍然大于后者,这主要是因为 WTG 的容量系数比 PVG 方阵的容量系数大很多(通过计算可得 WTG 和 PVG 方阵的容量系数分别为 0.417 和 0.173),使得方式 1 的最优配置方案对应的 IDG 年发电量大于方式 2 的最优配置方案对应的年 IDG 发电量,从而减少了传统电源的供电量和碳排放量。其中,WTG 和 PVG 的容量系数可分别通过式(26)和式(27)进行近似计算得到:

$$C_{FWTG} = \sum_{t=1}^{8760} P_{WTG,t} / (8760 P_{WTG,r}) \quad (26)$$

$$C_{FPVG} = \sum_{t=1}^{8760} P_{PVG,t} / (8760 P_{PVG,r}) \quad (27)$$

其中, C_{FWTG} 和 C_{FPVG} 分别为 WTG 和 PVG 的容量系数; $P_{WTG,t}$ 和 $P_{PVG,t}$ 分别为 WTG 和 PVG 在 t 时段的有功出力。

3 种方式的最优配置方案对应的年碳减排量如图 4 所示,从图中可以看出:方式 3 的最优配置方案对应的碳减排量比方式 1 和方式 2 的最优配置方案分别多 6.389×10^5 kg 和 2.1757×10^6 kg,多出的比例

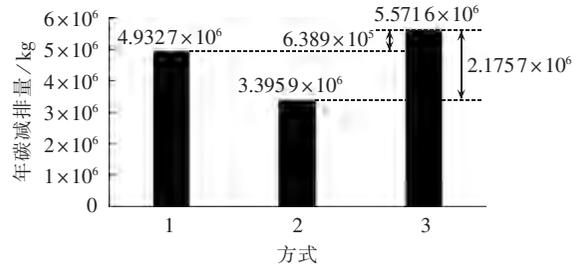


图 4 不同方式下最优配置方案对应的碳减排量

Fig.4 Carbon emission reduction by optimal allocation for different modes

分别达 12.95% 和 64.07%。

分别采用遍历法(即不采用 K-means 聚类法缩减场景,直接采用 8760 个场景)和 K-means 聚类法计算表 2 中各方式下的最优配置方案对应的年碳排放量,得到的结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出:采用 K-means 聚类法对场景进行缩减后得到的计算结果和采用遍历法得到的结果非常接近,两者的误差非常小。这表明“先采用 K-means 聚类法对场景进行简化,然后再计算年碳排放量的策略”是有效的,该策略能在大幅降低计算量(即减少计算时间)的基础上,保证较高的计算精度。

表 3 K-means 聚类法和遍历法的对比

Table 3 Comparison between K-means clustering method and traversing method

方式	年碳排放量/kg		误差/%
	遍历法	K-means 聚类法	
1	8.0228×10^6	8.0241×10^6	0.014
2	9.5573×10^6	9.5609×10^6	0.038
3	7.3876×10^6	7.3852×10^6	-0.025

3.3 AM 措施对优化配置结果的影响

为了研究 AM 措施对 IDG 优化配置结果的影响,在不同 AM 措施组合下分别对 3 种方式下的优化配置模型进行求解,得到的结果如表 4、图 5 和图 6 所示。从表 4、图 5 和图 6 中可得到如下结论。

(1)在每种方式下,对比表 4 中情景 A 和 H 的相关结果可见,AM 措施对 3 种方式下最优配置方案带来的潜在碳减排量相当可观,分别达 9.0860×10^5 kg、

表 4 AM 措施对优化配置结果的影响

Table 4 Influence of active management measures on optimal allocation

情景	调节 OLTC	削减有功出力	IDG 调节的功率因数	方式 1			方式 2			方式 3		
				年碳排放量/kg	潜在减排量/kg	IDG 渗透容量/kW	年碳排放量/kg	潜在减排量/kg	IDG 渗透容量/kW	年碳排放量/kg	潜在减排量/kg	IDG 渗透容量/kW
A	√	√	√	8.0241×10^6	9.086×10^5	2100	9.5609×10^6	6.906×10^5	3500	7.3852×10^6	1.0759×10^5	3200
B	√	√	×	8.0525×10^6	8.802×10^5	2100	9.6555×10^6	5.960×10^5	3400	7.4868×10^6	9.7430×10^5	3100
C	√	×	√	8.8350×10^6	9.770×10^4	1700	1.01239×10^7	1.276×10^5	2800	8.0550×10^6	4.0610×10^5	2500
D	×	√	√	8.0307×10^6	9.020×10^5	2100	9.6351×10^6	6.164×10^5	3500	7.5235×10^6	9.3760×10^5	3100
E	√	×	×	8.8893×10^6	4.340×10^4	1700	1.02401×10^7	1.140×10^4	2900	8.3318×10^6	1.2930×10^5	2500
F	×	√	×	8.0658×10^6	8.669×10^5	2100	9.6605×10^6	5.910×10^5	3400	7.5908×10^6	8.7030×10^5	3100
G	×	×	√	8.8512×10^6	8.150×10^4	1700	1.01342×10^7	1.173×10^5	2800	8.0949×10^6	3.6620×10^5	2500
H	×	×	×	8.9327×10^6	—	1700	1.02515×10^7	—	2700	8.4611×10^6	—	2400

注:“√”表示在 ADN 中采用了该 AM 措施,“×”则表示没有采用。

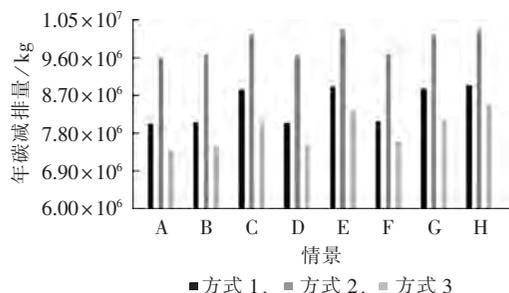


图 5 不同方式下采用不同 AM 措施组合对应的 ADN 年碳排放量

Fig.5 Annual carbon emission of active distribution network with different active management measures for different modes

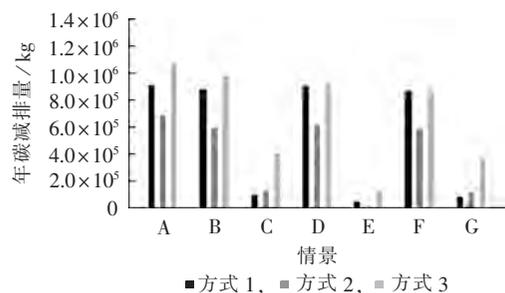


图 6 不同方式下采用不同 AM 措施组合对应的 ADN 年碳减排量

Fig.6 Annual carbon emission reduction of active distribution network with different active management measures for different modes

6.9060×10^5 kg 和 1.0759×10^6 kg。分析其原因:从表 4 中可以发现采用 AM 措施后,能够增加 IDG 在 ADN 中的渗透容量,从而减少传统电源的发电量,达到减少碳排放的效果。

(2)在每种方式下,对比表 4、图 5 和图 6 中的情景 E、F 和 G 可以看出,“F:削减 IDG 有功出力”这种 AM 措施对 ADN 具有最大的碳减排潜力。虽然 IDG 的出力被削减,但是能够增加 IDG 渗透容量,总体来看增加了 IDG 发电量,减少了碳排放量。

(3)此外,在各种情景下,方式 3 的减排效果最好,进一步说明了风光互补在碳减排方面的优越性。

4 结论

考虑 AM 措施和时序相关性,基于双层规划理论,以年碳排放量最小为目标建立了 IDG 在 ADN 中的多场景优化配置模型。首先利用 K-means 聚类法对场景进行缩减并得到每个场景发生的概率,然后利用 AGA 和 PDIPM 相结合的混合求解策略对模型进行求解,最后通过 IEEE 33 节点算例仿真表明:

(1)AM 措施利于增加 IDG 在 ADN 中的渗透容量,提高 ADN 对 IDG 的消纳能力,从而减少传统电源的发电量,达到减少碳排放的效果;

(2)3 种 AM 措施中,削减 IDG 的有功出力对碳减排的效果最明显,可在 ADN 中优先考虑采用这种

AM 措施;

(3)相对于 WTG 或 PVG 的单独优化配置,WTG 和 PVG 的联合优化配置更有利于碳减排,因此在优化配置 IDG 时可优先考虑风光联合配置。

参考文献:

- [1] 尤毅,刘东,于文鹏,等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化,2012,36(18):10-16.
YOU Yi,LIU Dong,YU Wenpeng,et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(18):10-16.
- [2] ZHANG J T,FAN H,TANG W,et al. Planning for distributed wind generation under active management mode[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2013,47:140-146.
- [3] OCHOA L F,HARRISON G P. Minimizing energy losses:optimal accommodation and smart operation of renewable distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(1):198-205.
- [4] OCHOA L F,DENT C J,HARRISON G P. Distribution network capacity assessment:variable DG and active networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(1):87-95.
- [5] SIANO P,CHEN P,CHEN Z,et al. Evaluating maximum wind energy exploitation in active distribution networks[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2010,4(5):598-608.
- [6] 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.
ZHANG Xiang,CHENG Haozhong,FANG Chen,et al. Multi-objective distributed generation planning considering active management[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2014,48(9):1231-1238.
- [7] MARTINS V F,BORGES C L T. Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(4):2164-2172.
- [8] 谢建民,邱毓昌,张治源. 风力发电机优化选型与云南省风电场规划研究[J]. 电力建设,2001,22(5):27-31.
XIE Jianmin,QU Yuchang,ZHANG Zhiyuan. Study on optimized model selection of wind-power units and plan of wind power field in Yunnan province[J]. Electric Power Construction,2001,22(5):27-31.
- [9] 李存斌,常昊,冯霞,等. 智能电网下风力-火电联合发电在微电网系统中的扩展规划[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):47-51.
LI Cunbin,CHANG Hao,FENG Xia,et al. Expansion planning of wind-thermal co-generation system in microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):47-51.
- [10] ZHANG S X,CHENG H Z,ZHANG L B,et al. Probabilistic evaluation of available load supply capability for distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(3):3215-3225.
- [11] 滕春贤,李智慧. 二层规划的理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2002:45-48.
- [12] SRINIVAS M,PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Systems,Man and Cybernetics,1994,24(4):656-667.
- [13] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出

版社,2003:120-134.

- [14] MACQUEEN J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations[C]//Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability,1967. [S.L.]:University of California Press,1967:281-297.
- [15] 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(2):1401-1407.
- [16] 段建东,杨杉. 基于改进差分进化法的含双馈型风电场的配电网无功优化[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):123-127. DUAN Jiandong,YANG Shan. Reactive power optimization based on modified differential evolution algorithm for power distribution system with DFIG wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):123-127.
- [17] 赵国波,刘天琪,李兴源. 分布式发电作为备用电源的优化配置

[J]. 电力系统自动化,2009,33(1):85-89.

ZHAO Guobo,LIU Tianqi,LI Xingyuan. Optimal deployment of distributed generation as backup generators[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(1):85-89.

作者简介:



张沈习

张沈习(1988—),男,浙江宁波人,博士研究生,研究方向为电力系统分析、电力系统优化规划(E-mail:willzsx@163.com);

李珂(1989—),男,浙江金华人,博士研究生,研究方向为电力系统优化;

程浩忠(1962—),男,浙江金华人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统规划、电压稳定、电能质量。

Optimal allocation of intermittent distributed generator in active distribution network

ZHANG Shenxi¹,LI Ke¹,CHENG Haozhong¹,ZHANG Yi²,YAO Liangzhong³

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350000, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: Since the IDG (Intermittent Distributed Generator), mainly the distributed wind farms and photovoltaic fields, is rapidly developed, a multi-scenario optimal IDGs allocation model with the minimum annual carbon emission as its objective is built for the active distribution network, which considers the sequential correlation among wind speed, illumination intensity and load, as well as three active management measures: transformer OLTC (On-Load Tap Changer) adjustment, IDG output power shedding and IDG power factor regulation. The *K*-means clustering method is adopted to reduce the quantity of scenarios and obtain the probability of each scenario. The adaptive genetic algorithm and the primal-dual interior point method are combined to solve the model. The simulative results of IEEE 33-bus active distribution network verify the effectiveness of the proposed model and method.

Key words: active distribution network; intermittent distributed generator; optimal allocation; active management measure; *K*-means clustering method; hybrid solving strategy

(上接第 44 页 continued from page 44)

Optimal active power dispatch based on slack tie-line power for bi-level power system with wind farm

LI Hongmei¹, LI Haifeng², CUI Hantao³, WAN Qiulan¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210008, China; 3. Department of Electrical Engineering and Computer Science, The University of Tennessee, Knoxville 37996, USA)

Abstract: The large-scale integration of centralized wind power brings challenges to the active power dispatch and control of power system. A strategy of interactive and coordinative dispatch according to the jurisdiction of wind power dispatch is proposed for the bi-level power system with wind power. The concept of slack tie-line power and slack wind power is proposed and used as the interactive dispatch interface between the upper and lower grids to deal with the impact of wind power fluctuation on the power grid dispatch and improve the wind power integration capacity to the utmost, based on which, an economically-optimal dispatch model is built. Since the inter-region dispatch is involved, the marginal cost is used for calculating the wind power cost and tie-line power cost, for which, different marginal cost calculation methods are analyzed. Simulative results show that, when the jurisdiction of wind power dispatch is at the lower grid and the average marginal cost of two regions is taken as the tie-line power cost, the economy of whole system is the best.

Key words: wind power; dispatch; interactive dispatch; slack tie-line power; slack wind power; marginal cost