

考虑主动管理的配电网分布式光伏并行优化配置

孙 旻¹, 余 愿², 曾 伟¹, 彭春华²

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096;

2. 华东交通大学 电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:主动管理技术的快速发展为分布式光伏发电大规模接入配电网提供了可能。将主动管理与分布式光伏优化配置相结合,以分布式光伏的安装位置、容量和主动管理措施为决策变量,建立以分布式光伏能量渗透率最大和电压偏差最小为目标函数的优化配置模型;利用基于二分 K -均值聚类的多场景分析法处理光伏出力及负荷的不确定性及时序特性,克服 K -均值聚类场景缩减对初始质心选取敏感的缺陷;提出基于并行计算的多场景分析和多目标分子微分进化算法对优化模型进行求解,得到配电网分布式光伏最优配置方案及主动管理策略。IEEE 33 节点配电系统仿真结果表明,所提优化配置方法可有效提高分布式光伏消纳量并保证供电质量。

关键词:主动管理;光伏优化配置;能量渗透率;电压偏差;并行计算;二分 K -均值

中图分类号:TM 761;TM 615

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.027

0 引言

在当前节能减排的背景下,光伏发电作为分布式清洁能源接入配电网已得到迅速发展,传统配电网也逐步向具有主动管理 AM (Active Management) 功能的主动配电网 ADN (Active Distribution Network) 形式转变。随着越来越多的分布式光伏电源接入配电网,对其进行优化配置以提高配电网对分布式电源的接纳能力变得越来越重要。此外,大量分布式光伏接入配电网也给配电网运行带来了诸多问题,常常导致配电网因电压质量等问题限制分布式光伏的接入容量,而 ADN 可充分利用灵活多变的 AM 措施对分布式光伏进行主动消纳以及对系统电压进行主动调节^[1]。因此,在对含分布式光伏电源的配电网进行规划时,不仅应将光伏消纳能力和电压质量作为优化目标,而且要充分考虑 AM 措施对配置方案的影响。

当前对于 ADN 中分布式光伏的优化配置已有较多研究。文献[2-3]分别以碳排放量最小和投资成本最小为目标函数,研究 AM 对分布式电源优化配置的影响。文献[4]中上层以电网侧综合费用最小为目标得出一组最优配置方案,下层在该配置方案基础上实现配电网 AM。文献[5]将以经济性为目标函数的优化模型分解为 3 层模型进行优化,3 层分别确定分布式电源的安装位置容量、重构类型及确定网络结构后的最优潮流。文献[6]考虑区域能源供应商的利益,首先确定分布式电源的安装位置和容量,再利用 AM 措施对每个场景进行优化得

出规划方案。文献[7]考虑风-光-荷联合时序场景对分布式电源进行规划,利用 AM 提升分布式电源的接入容量。上述文献均是基于分层优化的思想对 ADN 中的分布式电源进行规划,上层以经济性为目标进行选址定容,下层研究 AM 措施对规划结果的影响。分层规划方法的优势在于降低计算量,避免处理多目标函数问题^[8]。大多数分层优化上、下层分别设置不同的决策变量及约束条件,优化结果相互传递,可将其看作单目标优化问题。在研究 AM 措施对分布式光伏优化配置影响时,上述文献均是在得出配置方案后再通过 AM 措施对配置方案进行优化,并未给出 AM 的最佳实施方案。对于考虑 AM 以光伏消纳和电压质量为目标函数的优化问题,多目标优化方法相比于分层优化更具优势。此外,上述文献中多场景分析过程大多是采用 K -均值聚类算法实现场景缩减的,然而 K -均值聚类对初始质心的选择随机且比较敏感,容易导致场景缩减出现较大的误差。

鉴于以上研究现状,本文拟将分布式光伏的安装位置和容量以及各种 AM 措施的实施值作为决策变量,以光伏能量渗透率最大和电压偏差最小为目标函数建立优化配置模型。其中,光伏消纳包含就地消纳和外送消纳两部分,更加契合实际情况,避免了部分文献将分布式光伏安装容量作为消纳量计算带来的不准确性。在算法上,本文提出将并行计算与多场景分析及多目标分子微分进化(MOMDE)算法相结合,利用并行二分 K -均值聚类算法对大规模场景进行缩减,既提高了聚类速度,也避免了 K -均值聚类对初始质心选取敏感的问题,并通过采用分子微分进化(MDE)算法和并行计算核间通信交流以保证进化后期种群的多样性,可有效避免算法陷入早熟,从而实现分布式光伏电源最优配置方案

收稿日期:2018-06-08;**修回日期:**2019-01-04

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(52182017000W)
Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(52182017000W)

和 AM 策略的高效寻优。

1 基于二分 K-均值聚类的多场景分析

1.1 光伏出力和负荷的多场景分析

分布式光伏出力由于受到太阳辐射的影响具有时序特性和不确定性,因此不能将其作为常规恒定出力电源。此外,不同类型负荷也会表现出不同的时序特性。在配电网规划中,为了有效模拟分布式电源出力以及负荷需求的时序特性和不确定性,通常采用多场景分析方法^[2]。多场景分析包含 2 个阶段。

第一阶段:场景生成。场景生成已有较为成熟的研究,本文借鉴文献[9],首先对光伏和负荷的历史数据进行统计分析得出随机变量的概率密度函数,再将其离散化为 7 个区间,并通过轮盘赌选择计算每个场景发生的概率,如式(1)所示。

$$P_r(s) = \frac{\prod_{t=1}^{N_t} \left[\sum_{l=1}^7 (W_{l,t,s}^L \alpha_{l,t}) \sum_{p=1}^7 (W_{p,t,s}^P \beta_{p,t}) \right]}{\sum_{s=1}^{N_s} \prod_{t=1}^{N_t} \left[\sum_{l=1}^7 (W_{l,t,s}^L \alpha_{l,t}) \sum_{p=1}^7 (W_{p,t,s}^P \beta_{p,t}) \right]} \quad (1)$$

其中, N_t 为总时间; N_s 为场景数; $W_{l,t,s}^L$ 为 t 时刻负荷落入场景 s 的概率; $W_{p,t,s}^P$ 为 t 时刻光照强度落入场景 s 的概率; $\alpha_{l,t}$ 为 t 时刻第 l 个负荷误差区间; $\beta_{p,t}$ 为 t 时刻第 p 个负荷误差区间; $P_r(s)$ 为场景 s 发生的概率。

第二阶段:场景缩减。场景缩减是指为了减少多场景分析的计算量,对已生成的多场景使用场景聚类技术进行缩减得到满足计算要求的场景数。本文提出并行二分 K-均值聚类算法实现对数据量较大且随机性较强的分布式光伏出力和负荷数据的多场景缩减。

1.2 并行二分 K-均值聚类算法

并行二分 K-均值聚类算法的具体步骤如下^[10]:

- 将数据集按计算机核数进行划分,将数据子集分配到各个核中;
- 将所有的点作为一个簇,再将该簇一分为二;
- 基于最大限度降低误差平方和的原则选择其中的一簇继续划分;
- 重复步骤 c 直到簇数目等于指定的 K 值;
- 分别用所得到的聚类中心作为各个核的初始质心,对二分 K-均值聚类结果进行优化,并求得其平均值得到全局质心;
- 将全局质心传递到各个核,对各子数据集进行分类,再次计算质心;
- 计算步骤 f 所得到的各个质心均值并将其作为新的全局质心,判断质心是否稳定,如果稳定则得出聚类结果,否则继续交换数据,直到质心稳定得出

结果,结束场景缩减。

为了说明并行二分 K-均值聚类算法的有效性,在此对同一组数据分别采用二分 K-均值聚类以及传统 K-均值聚类 2 种算法各测试 2 次,聚类结果分别如图 1 和图 2 所示。通过对比可以看出,二分 K-均值聚类算法 2 次测试聚类结果相近,而传统 K-均值聚类由于初始质心的随机性,2 次聚类结果差别较大。因此,本文采用并行二分 K-均值聚类算法进行场景缩减,在保证缩减结果准确性的同时保证缩减效率。

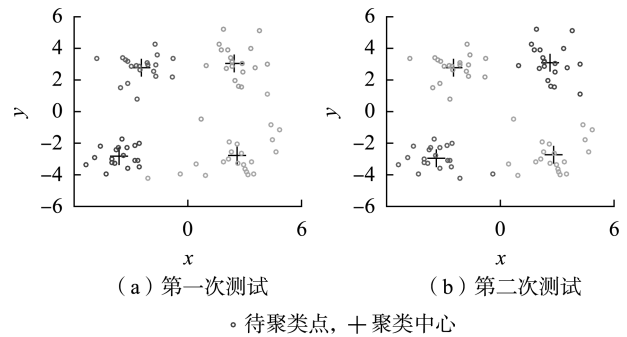


图 1 二分 K-均值聚类结果

Fig.1 Results of dichotomous K-means clustering

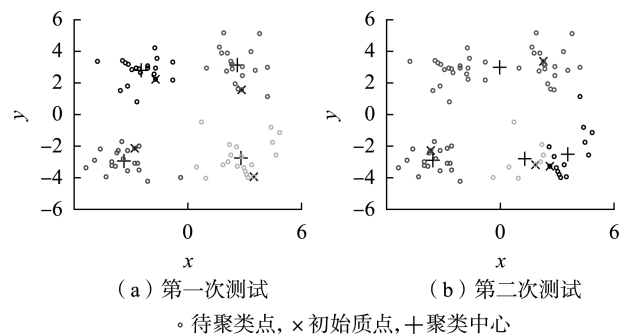


图 2 传统 K-均值聚类结果

Fig.2 Results of traditional K-means clustering

2 考虑 AM 的配电网分布式光伏优化配置模型

2.1 考虑 AM 的分布式光伏规划框架

本文在构建规划框架时考虑的 AM 措施主要包括消减分布式光伏有功出力、调节有载调压变压器 OLTC (On-Load Tap Changer) 抽头和需求侧响应 3 种。其中,需求侧响应主要考虑可中断负荷 IL (Interruptible Load),以 IL 位置和中断率作为需求响应决策值。综上可以构建考虑 AM 的分布式光伏规划框架如图 3 所示,即在电网安全稳定运行以及决策变量满足约束条件的前提下,在电源侧和电网侧分别考虑对分布式光伏出力和 OLTC 电压的主动调节,同时在需求侧控制 IL 主动适应分布式光伏出力,实现基于源-网-荷协调控制的 ADN 光伏电源优化配置。

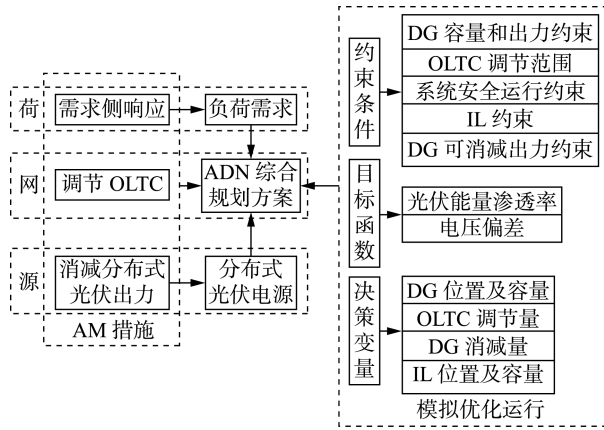


图3 考虑AM的分布式光伏规划框架

Fig.3 Distributed photovoltaic planning framework considering AM

2.2 考虑AM的分布式光伏优化配置模型

本文以光伏能量渗透率最大和电压偏差率最小为目标函数,构建考虑AM的分布式光伏电源优化配置模型。

2.2.1 光伏能量渗透率

对于光伏采取优先就地消纳余量上网的策略。考虑AM的光伏电源全年消纳量为消减分布式电源出力后全年的就地消纳量和上网电量之和,全年总负荷需求为减去IL后的总负荷需求。为了表征光伏消纳与负荷需求的关系,引入光伏能量渗透率的概念^[11],将区域配电网内光伏全年消纳量与区域内全年总负荷需求的比值定义为光伏能量渗透率 λ_{EP} 。考虑AM的多场景光伏能量渗透率计算式见式(2)。

$$\lambda_{EP} = \frac{\sum_{t=1}^{N_t} \sum_{s=1}^{N_s} \left[P_r(s) \sum_{p=1}^{N_p} (P_{pg,s}^t + P_{pc,s}^t) \right]}{\sum_{t=1}^{N_t} \sum_{s=1}^{N_s} \left[P_r(s) \sum_{g=1}^{N_g} (P_{L,g,s}^t - P_{LDR,g,s}^t) \right]} \quad (2)$$

其中, $P_{pg,s}^t$ 为场景 s 下节点 p 分布式光伏出力消减后的上网电量; $P_{pc,s}^t$ 为场景 s 下分布式光伏出力消减后节点 p 的自发自用电量; N_p 为分布式光伏的安装节点数; N_g 为系统节点数; $P_{L,g,s}^t$ 为时刻 t 场景 s 下节点 g 所接负荷量; $P_{LDR,g,s}^t$ 为时刻 t 场景 s 下节点 g 中断负荷量。

2.2.2 考虑AM的电压偏差率

分布式光伏接入配电网对配电网电压的影响是制约其消纳的主要因素。分布式光伏的安装位置容量和各AM措施的实施均会对配电网电压产生影响,因此本文将电压偏差率 I_V 最小作为目标函数之一。将AM的电压偏差率定义为调节OLTC后二次侧首节点电压与其他节点电压偏差的平均值^[12],如式(3)所示。

$$I_V = \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{s=1}^{N_s} \left[P_r(s) \left(\frac{1}{N_g} \sum_{g=1}^{N_g} \left| \frac{V_{p,g,s}^t - V_{o,g,s}^t}{V_{o,g,s}^t} \right| \right) \right] \quad (3)$$

其中, $V_{p,g,s}^t$ 为光伏接入后场景 s 下节点 g 的电压幅值; $V_{o,g,s}^t$ 为调节OLTC后场景 s 下二次侧首节点电压值。

2.3 约束条件

a. 潮流约束。

配电网安全运行应满足如式(4)所示的潮流方程。

$$\begin{cases} P_{i,s} - P_{L,s} = V_{i,s} \sum_{j=1}^{N_g} V_{j,s} (G_{i,j} \cos \delta_{i,j} + B_{i,j} \sin \delta_{i,j}) \\ Q_{i,s} - Q_{L,s} = V_{i,s} \sum_{j=1}^{N_g} V_{j,s} (G_{i,j} \sin \delta_{i,j} - B_{i,j} \cos \delta_{i,j}) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $V_{i,s}$ 、 $V_{j,s}$ 分别为节点 i 、 j 在场景 s 下的电压; $P_{i,s}$ 、 $P_{L,s}$ 分别为在场景 s 下节点 i 电源输出的有功功率、负荷消耗的有功功率; $Q_{i,s}$ 、 $Q_{L,s}$ 分别为在场景 s 下节点 i 电源输出的无功功率、负荷消耗的无功功率; $G_{i,j}$ 、 $B_{i,j}$ 和 $\delta_{i,j}$ 分别为节点 i 和 j 之间的电导、电纳和相角差。

b. 节点电压约束。

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (5)$$

其中, $V_i^{\max}$ 和 $V_i^{\min}$ 分别为节点电压幅值上、下限值。节点电压约束通过设置越限惩罚项 P_u 来实现,如式(6)所示,式中 μ 为惩罚因子。

$$P_u = \mu [\max(V_i^{\min} - V_i, 0) + \max(V_i - V_i^{\max}, 0)] \quad (6)$$

c. OLTC 二次侧电压约束。

$$U_{OLTC}^{\min} \leq U_{OLTC} \leq U_{OLTC}^{\max} \quad (7)$$

其中, U_{OLTC} 为OLTC二次侧电压值; $U_{OLTC}^{\max}$ 、 $U_{OLTC}^{\min}$ 分别为OLTC二次侧电压值的上、下限。

d. 分布式光伏接入容量限制。

$$0 \leq P_{PV,i} \leq P_{PV,i}^{\max} \quad (8)$$

其中, $P_{PV,i}$ 为节点 i 接入的光伏容量; $P_{PV,i}^{\max}$ 为节点 i 允许接入的分布式光伏最大容量。

e. 消减分布式光伏出力约束。

$$0 \leq C_{PV,n,s} \leq C_{PV,n,s}^{\max} \quad (9)$$

其中, $C_{PV,n,s}$ 为场景 s 下第 n 台分布式光伏出力消减率; $C_{PV,n,s}^{\max}$ 为场景 s 下第 n 台分布式光伏出力允许的最大消减率。

f. IL 容量约束。

$$0 \leq L_{DR,k,s} \leq L_{DR,k,s}^{\max} \quad (10)$$

其中, $L_{DR,k,s}$ 为场景 s 下第 k 个IL中断率; $L_{DR,k,s}^{\max}$ 为场景 s 下第 k 个IL的最大中断率。

3 求解算法

3.1 多目标分子微分进化算法

相比于其他常用优化算法,微分进化(DE)算法具有简单、高效、稳定性好等特点,主要包括选择、交

叉和变异 3 种操作,具体介绍可参考文献[13]。然而,在解决多变量复杂多目标优化问题时,传统的微分进化算法在进化后期变异阶段容易出现种群多样性下降等问题。分子微分进化算法可以有效解决该问题^[14]。分子微分进化在普通微分进化算法的进化变异阶段将个体作为分子来处理,利用分子间的斥力原理,当 2 个个体很接近时,自动增加变异差分,使得个体间差异变大,确保进化后期种群的多样性。在多目标优化问题中,不同的目标函数常常相互制约,无法同时求出各自的最优解。此时,可通过对 Pareto 非劣解进行排序并保留精英个体,求得一系列有效解,称为 Pareto 最优解。最后,为帮助决策者确定最终的实施方案,通常还需要在一系列最优解中选取一个最优折中解,可根据模糊集理论来确定最优折中解^[15]。

综上所述,本文将利用性能优越的多目标分子微分进化算法^[14]对目标函数进行优化求解。

3.2 并行计算

目前,计算机微处理器普遍含多个核心,可以使多个核心同时进行计算来提高算法的计算效率。由于本文研究的配电网分布式光伏优化配置问题中需要考虑 AM 并进行多场景分析,模型求解计算量较大,为了实现并行化二分 K -均值聚类以及提高计算效率,并克服单种群多目标进化算法近亲繁殖和收敛速度慢的弊端,本文引入并行计算技术与多场景分析和多目标分子微分进化相结合,实现并行化的多场景分析和优化求解过程。该过程主要包括并行化二分 K -均值聚类和并行多目标分子微分进化 (PMOMDE) 两部分,其中并行二分 K -均值实现步骤前文已有描述。

PMOMDE 算法是在将种群分为多个子种群并分配到不同的计算核心后,分别进行多目标分子微分进化操作。各个核内种群在进化到一定的代数后需要相互间进行通信,交换数据,以此来保证种群的多样性。并行计算主要分为同步并行、异步并行和粗略异步并行^[16]3 类。为使核与核之间便于通信,本文选择同步并行计算,通过设置核间等待时间实现同步,即让各核心在运行到相同的代数时进行通信。设定以下通信机制:前期种群多样性较高,通信频率较小即 2 次通信间隔代数较大;后期种群多样性降低时通信频率增加,此时减小种群间通信间隔代数,达到动态调整的目的。

4 算例分析

4.1 参数设置

本文采用 IEEE 33 节点典型配电系统进行仿真计算,网络首端基准电压为 12.66 kV,网络总负荷为 5 084.26+j2 547.32 kV·A,配电网原始数据来源于文

献[17],配电系统结构如图 4 所示。结合我国当前分布式光伏配置区域的主要负荷类型,假定节点 2—13 接入商业负荷,节点 14—25 接入居民负荷,节点 26—33 接入农业负荷。不同类型负荷需求以及光伏出力数据来源于文献[18]。生成的场景数为 1 000,缩减后的场景数为 10。

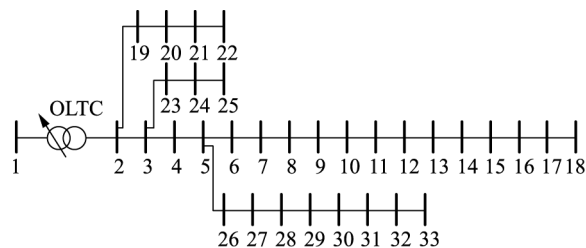


图 4 IEEE 33 节点配电系统图

Fig.4 IEEE 33-bus distribution system

假定在系统规划时节点 2—32 为待选节点,可任选其中 6 个节点接入分布式光伏(单组容量为 100 kW),任选其中 4 个节点设置 IL 控制。采用 PMOMDE 算法求解本文提出的分布式光伏多目标优化配置模型,各种群规模设为 100,种群最大迭代代数设为 1 000 代,交叉概率为 0.6,变异尺度因子为 0.3。计算平台为 MATLAB2016a,计算机内存为 8 GB,微处理器为 4 核。约束条件设置参考文献[6],设置情况见表 1(表中电压均为标幺值,后同)。

表 1 约束条件范围设置

Table 1 Constraint range setting

参数	节点电压	OLTC 二次侧电压	光伏接入容量/kW	光伏消减率/%	IL 中断率/%
下限	0.93	0.95	100	0	0
上限	1.07	1.05	1 500	50	100

4.2 结果分析

4.2.1 AM 措施对配置结果的影响

为研究 AM 对光伏消纳及电压质量的影响,本文分 2 种情况进行优化计算:第一种情况,仅将分布式光伏的安装位置及容量作为决策变量,未考虑 AM 措施;第二种情况,将各 AM 措施实施值作为决策变量加入分布式光伏优化配置中。

为了进一步分析本文方法的经济性,设分布式光伏的安装成本为 8 500 元/kW,光伏使用年限为 20 a,运行维护费用为 0.2 元/(kW·h),光伏发电余量上网电价为 0.41 元/(kW·h),户用电价为 0.62 元/(kW·h),国家补贴电价为 0.37 元/(kW·h),IL 的补偿电价为 1.5 元/(kW·h)^[6],由此可计算出各配置方案的年周期收益率(即年总收益和年总成本的比值)^[19]。通过优化求解得到上述 2 种情况下的 Pareto 最优前沿和最优折中解如图 5 所示。2 种情况最优折中方案的效果对比如表 2 所示。由图 5 和表 2 可以看出,采取 AM 措施后,不仅分布式光伏的消纳量会增加,且电压偏差也有所下降。考虑 AM

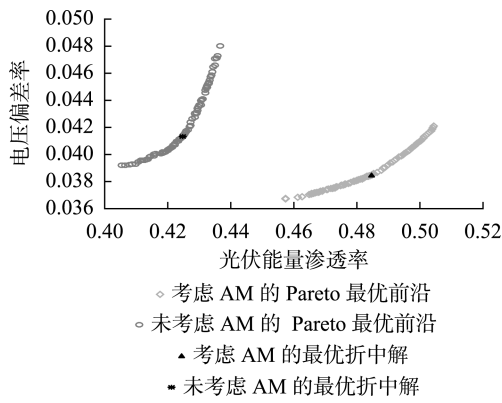


图 5 不同情况下 Pareto 最优前沿

Fig.5 Optimal Pareto frontier for different cases

表 2 不同情况下最优折中解对比

Table 2 Comparison of best compromise solutions between different situations

情况	能量渗透率	电压偏差率	年收益率
考虑 AM	0.484 77	0.038 49	1.453 1
不考虑 AM	0.424 76	0.041 31	1.145 4

表 3 不同配置方案及 AM 实施方案对比

Table 3 Comparison of different configuration schemes and AM implementation schemes

方案	光伏安装位置(组数)	AM 实施方案			优化目标值	
		OLTC 二次侧电压	光伏出力消减位置(消减率)	IL 位置(中断率)	光伏能量渗透率	电压偏差率
1	4(15), 8(11), 13(9), 23(8), 27(8), 33(5)	0.97	4(9%), 8(6%), 13(0), 23(21%), 27(0), 33(14%)	8(8.6%), 18(19.3%), 21(2%), 24(6%)	0.500 96	0.041 20
2	3(14), 4(12), 8(10), 17(3), 26(11), 30(4)	0.99	3(0), 4(8%), 8(23%), 17(0), 26(17%), 30(1%)	7(12%), 13(34%), 29(16%), 31(4%)	0.484 77	0.038 49
3	3(12), 5(13), 11(5), 20(7), 23(4), 28(8)	1.03	3(12%), 5(17%), 11(1%), 20(0), 23(24%), 28(22%)	9(24%), 18(17%), 25(9%), 32(31%)	0.457 36	0.036 74

4.2.2 并行计算效率分析

本文提出的 PMOMDE 算法将并行计算应用于二分 K -均值场景缩减和分子微分进化算法 2 个阶段。为了分析并行计算的效率,本文在算法参数设置相同的情况下,分别采用基于双核并行、四核并行的 PMOMDE 算法和基于单核串行的多目标分子微分进化算法对分布式光伏多目标优化配置模型进行多次求解,算法平均耗时如表 4 所示,结果表明并行计算可明显减少计算时间,提高计算效率。

表 4 不同计算方式所需计算时间

Table 4 Calculation time required for different calculation methods

计算方式	计算时间/s
单核串行	28 566.979
双核并行	15 270.326
四核并行	8 409.615

5 结论

本文考虑分布式光伏出力及负荷的不确定性和时序特性,通过对考虑 AM 的分布式光伏电源优化配置来提高分布式光伏的消纳以及保证电压质量,

的最优折中解的能量渗透率更大且电压偏差率更小,同时年寿命周期收益率也更高,这是因为考虑 AM 措施后,虽然由于需要补偿 IL 等原因而导致年总成本会增加 85.548 万元,但光伏消纳量增大可带来年收益增加 232.417 万元,从而使得年寿命周期收益率增加了 30.77%。

表 3 列出了部分考虑 AM 措施的分布式光伏优化配置方案和相应的 AM 最佳实施方案。表中,光伏配置方案 4(15)表示节点 4 接入 15 组光伏电源,AM 实施方案 4(9%)表示节点 4 光伏出力消减 9%,8(8.6%)表示节点 8 负荷中断率为 8.6%,其他类似。其中,方案 2 为最优折中解。由规划方案可以看出,距离首节点较近的节点可接入容量较大,距离首节点较远的节点可接入较小容量的光伏电源来补偿高负荷带来的电压降,改善电压分布;调节 OLTC 可以改善节点电压分布,提高光伏的消纳;消减分布式光伏的有功出力可以增加其他节点分布式光伏的接入容量,间接增加了分布式光伏的总消纳量。

并采用基于并行计算的多场景分析和多目标分子微分进化算法对优化模型进行求解,得出以下结论。

a. 将 AM 措施作为决策变量引入分布式电源的优化配置中,得出分布式电源的最优安装位置及容量和 AM 措施最佳实施方案,可以有效提高分布式电源的消纳以及改善电压质量,对于工程实践具有指导意义。

b. 并行计算相比于串行计算可以更加充分发挥计算机效率,节约计算时间。在配电网分布式光伏电源优化配置中,采用并行二分 K -均值聚类可以实现更加快速准确的聚类和多场景分析,采用 PMOMDE 算法可快速准确地得到多目标最优解。

本文研究可为 ADN 的分布式光伏电源规划提供科学指导,同时也可当前光伏扶贫地区存在的弃光问题提供一种解决方案。

参考文献:

[1] 邢海军,程浩忠,曾平良,等. 基于二阶锥规划的间歇性分布式电源消纳研究[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):74-80.
XING Haijun, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al. IDG accommodation based on second-order cone programming[J]. Electric

- Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 74-80.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 林君豪, 张焰, 陈思, 等. 考虑可控负荷影响的主动配电系统分布式电源优化配置[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 46-53, 73.
LIN Junhao, ZHANG Yan, CHEN Si, et al. Optimal DG allocation considering effect of controllable load for active distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 46-53, 73.
- [5] 张沈习, 袁加妍, 程浩忠, 等. 主动配电网中考虑需求侧管理和网络重构的分布式电源规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(增刊1): 1-9.
ZHANG Shenxi, YUAN Jiayan, CHENG Haozhong, et al. Optimal distributed generation planning in active distribution network considering demand side management and network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(Supplement1): 1-9.
- [6] 严艺芬, 吴文宣, 张逸, 等. 考虑区域能源供应商利益的主动配电网间歇性分布式电源优化配置[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 752-758.
YAN Yifen, WU Wenxuan, ZHANG Yi, et al. Optimal allocation of intermittent distributed generation in active distribution network considering benefit of regional energy supplier[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 752-758.
- [7] 陈碧云, 闭晚霞, 李欣桐, 等. 考虑风-光-荷联合时序场景的分布式电源接入容量规划策略[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 755-761.
CHEN Biyun, BI Wanxia, LI Xintong, et al. Capacity planning strategies for distributed generation considering wind-photovoltaic-load joint time sequential scenarios[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 755-761.
- [8] 程浩忠, 高赐威, 马则良, 等. 多目标电网规划的分层最优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 11-16.
CHENG Haozhong, GAO Ciwei, MA Zeliang, et al. The lexicographically stratified method for multi-object optimal electric power network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 11-16.
- [9] JAMSHID A, TAHER N, RASOUL A A, et al. Scenario based dynamic economic emission dispatch considering load and wind power uncertainties[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2013(47): 351-367.
- [10] 张军伟, 王念滨, 黄少滨, 等. 二分K-均值聚类算法优化及并行化研究[J]. 计算机工程, 2011, 37(17): 23-25.
ZHANG Junwei, WANG Nianbin, HUANG Shaobin, et al. Research on bisecting K-means clustering algorithm optimization and parallelism[J]. Computer Engineering, 2011, 37(17): 23-25.
- [11] 赵波, 肖传亮, 徐琛, 等. 基于渗透率的区域配电网分布式光伏并网消纳能力分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 105-111.
ZHAO Bo, XIAO Chuanliang, XU Chen, et al. Penetration based accommodation capacity analysis on distributed photovoltaic connection in regional distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 105-111.
- [12] 程庭莉, 陈民铀, 罗欢. 含可再生能源发电的配网储能多目标优化配置方法[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2808-2815.
CHENG Tingli, CHEN Minyou, LUO Huan. Multi objective allocation of energy storage in distribution network penetrated with renewable energy generation[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2808-2815.
- [13] STORN R, PRICE K. Differential evolution: a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous space[J]. Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359.
- [14] 彭春华, 姜磊, 刘君, 等. 采用极限学习机预测优化的超高压输电线路畸变电场屏蔽[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3655-3662.
PENG Chunhua, JIANG Lei, LIU Jun, et al. Distorted electric field shielding of EHV transmission line based on extreme learning machine prediction optimization model[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3655-3662.
- [15] GALLANO R J C, NERVES A C. Multi-objective optimization of distribution network reconfiguration with capacitor and distributed generator placement[C]//TENCON 2014-2014 IEEE Region 10 Conference. Bangkok, Thailand; [s.n.], 2014: 1-6.
- [16] TSUTSUI S, FUJIMOTO N. Parallel ant colony optimization algorithm on a multi-core processor[C]//International Conference on Swarm Intelligence. Brussels, Belgium; Springer-Verlag, 2010: 488-495.
- [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): 1401-1407.
- [18] 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, 128.
LI Liang, TANG Wei, BAI Muke, et al. Multi-objective locating and sizing of distributed generators based on time sequence characteristic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 58-63, 128.
- [19] 苏剑, 周莉梅, 李蕊. 分布式光伏发电并网的成本/效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 50-56.
SU Jian, ZHOU Limei, LI Rui. Cost-benefit analysis of distributed grid-connected photovoltaic power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 50-56.

作者简介:



孙旻

孙旻(1970—),男,江西南昌人,教授级高级工程师,研究方向为电能质量、新能源技术等(E-mail: zysyw@163.com);

余愿(1990—),男,河南信阳人,硕士研究生,研究方向为主动配电网规划(E-mail: 552444672@qq.com);

曾伟(1979—),男,重庆人,高级工程师,博士,研究方向为新能源技术等;

彭春华(1973—),男,江西乐平人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统优化调度、配电网规划(E-mail: chinapch@163.com)。

(下转第181页 continued on page 181)

- [15] SKRIMPAS G A, KLEANI K, MIJATOVIĆ N, et al. Detection of icing on wind turbine blades by means of vibration and power curve analysis[J]. Wind Energy, 2016, 19(10): 1819-1832.
- [16] EFRON B, HASTIE T. Computer age statistical inference [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2016.
- [17] ZHAO J, GUO Z, SU Z, et al. An improved multi-step forecasting model based on WRF ensembles and creative fuzzy systems for wind speed[J]. Applied Energy, 2016, 162: 808-826.
- [18] 杨正瓴, 刘阳, 张泽, 等. 采用最近历史观测值和 PLSR 进行空间相关性超短期风速预测[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1815-1822.
- YANG Zhengling, LIU Yang, ZHANG Ze, et al. Ultra-short-term wind speed prediction with spatial correlation using recent historical observations and PLSR[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1815-1822.
- [19] HAGSPIEL S, PAPAEMANNOUIL A, SCHMID M, et al. Copula-based modeling of stochastic wind power in Europe and implications

for the Swiss Power Grid[J]. Applied Energy, 2012, 96: 33-44.

- [20] LI X, HU F, LIU G. Characteristics of chaotic attractors in atmospheric boundary-layer turbulence[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2001, 99(2): 335-345.

作者简介:



杨正瓴

杨正瓴(1964—),男,河北灵寿人,副教授,博士,主要研究方向为风电功率预测、电力负荷预测、混沌理论及其在电力系统中的应用(E-mail: zlyang@tju.edu.cn);

赵强(1992—),男,辽宁昌图人,硕士研究生,主要研究方向为风电功率预测(E-mail: zhaoqiangtju@163.com);

吴炳卫(1994—),男,安徽滁州人,硕士研究生,主要研究方向为风电功率预测(E-mail: 1264461864@qq.com)。

Ultra-short term wind speed prediction based on spatial correlation by k -nearest neighbor

YANG Zhengling¹, ZHAO Qiang¹, WU Bingwei¹, HOU Jinyi¹, CHEN Xi¹, ZHANG Jun²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Process Measurement and Control, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: One approach to improve the accuracy and reliability of ultra-short term wind speed prediction is to thoroughly exploit the characteristics and laws of wind speed correlation from historical observations. The reference vector of k -nearest neighbor prediction based on spatial correlation is formed by the combination of latest local wind speed historical observations and upstream wind speed observations adjusted by its optimal lag time. The correlation coefficient is taken as the concrete evaluation index, and k most similar neighbours of the reference vector are optimally selected from the wind speed historical observations. Seven regression models are adopted for the future local wind speed prediction. The simulative results of wind speed prediction of Huibertgat, Holland in winter show that the optimal number of k -nearest neighbours is about 100 and the optimal year number of historical data is 10 a by the prediction of three optimal models, i.e. linear regression, partial least squares regression and least squares support vector machine regression, and the proposed method can effectively use the similarity of historical data for reliable ultrashort term wind speed prediction.

Key words: wind speed prediction; ultra-short term; spatial correlation; k -nearest neighbor; historical observations

(上接第 174 页 continued from page 174)

Parallel optimal allocation of distributed PV in distribution network considering active management

SUN Min¹, YU Yuan², ZENG Wei¹, PENG Chunhua²

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China;

2. School of Electrical & Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The rapid development of AM (Active Management) technology provides possibility for large-scale distributed PV (PhotoVoltaic) power generation accessing to distribution network. An optimal allocation model with the combination of AM and optimal distributed PV allocation, which takes the installation position, capacity, and AM measures as its decision variables and the maximum distributed PV energy permeability and the minimum voltage deviation as its objectives. The multi-scenario analysis based on dichotomous K -means clustering is used to deal with the uncertainties and temporal characteristics of PV output and load, which overcomes the shortage that K -means clustering scenario reduction is sensitive to the selection of initial centroid. The multi-scenario analysis and multi-objective differential evolution algorithm based on parallel computing are proposed to solve the optimization model, and the optimal PV allocation scheme and AM strategy of distribution network are obtained. The simulative results of IEEE 33-bus distribution network show that the proposed method can effectively improve the distributed PV penetration amount and ensure the power supply quality.

Key words: active management; optimal photovoltaic allocation; energy permeability; voltage deviation; parallel computing; dichotomous K -means