

基于集群划分的高渗透率分布式系统无功优化

张 倩^{1,2}, 丁津津^{1,3}, 张道农⁴, 王群京^{1,5}, 马金辉⁶

- (1. 安徽大学电气工程与自动化学院, 安徽省合肥市 230601; 2. 合肥恒大江海泵业股份有限公司, 安徽省合肥市 231131;
3. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽省合肥市 230022;
4. 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京市 100120;
5. 安徽大学工业节电与电能质量控制协同创新中心, 安徽省合肥市 230601;
6. 国网安徽省电力有限公司, 安徽省合肥市 230061)

摘要: 可再生能源在电力系统的渗透率不断增长, 大规模分布式电源的接入对电力系统的优化调度带来新的挑战。在考虑分布式电源大规模接入的基础上, 对电力系统进行集群划分和无功优化研究。首先引入改进的电气距离的概念, 以此作为聚类算法的距离量度, 应用谱聚类方法, 将含高渗透率分布式可再生能源系统划分为若干亚群落, 并确定各集群内关键节点。再以网损和电压波动最小为优化目标, 调节关键节点处光伏逆变器的无功功率, 达到减小网损和稳定电压输出的目的。为求解所建立的双目标无功优化问题, 提出基于改进粒子群优化算法的智能调压策略, 对多个亚群落进行无功优化。将集群划分方法和无功优化策略应用于 IEEE 33 节点标准系统, 提高了节点电压稳定性, 降低了网损。针对大规模分布式能源系统, 进一步提出快速智能调压策略, 应用于安徽省金寨县某台区实际系统, 得到良好控制效果, 且在调节时间、运行成本、投入成本方面均有大幅削减。

关键词: 分布式能源系统; 集群划分; 电气距离; 无功优化; 粒子群优化算法

0 引言

风电、光伏 (photovoltaic, PV) 等新能源并网形成的集群系统, 具有多容量、高密度、大规模的特点^[1-3], 此类分布式电源 (distributed generator, DG) 的大规模接入, 易产生电压越限、功率倒送、线路过载等不良影响^[4], 并将传统的辐射状配电网逐渐转变为有源配电网^[5]。通过无功优化调度可以优化电网的无功潮流分布, 降低电网的有功损耗、电压偏移, 改善电压质量, 使用电设备安全可靠地运行^[6-14]。

PV 逆变器本身具有无功调节能力, 原则上逆变器的无功剩余容量如果能够得到充分利用, 可以达到良好的无功调节效果。但若集中对大规模 PV 系统中每个节点进行调节, 所需的数据处理量大, 且控制复杂。因此对大规模高渗透率可再生能源集群进行亚群落划分, 分别进行无功补偿, 可以有效减少

计算量和投切成本。在合理的集群划分基础上, 对高渗透率分布式能源系统进行调压^[15-24]具有重要的理论价值和工程意义。

含 DG 的电力系统无功优化研究方面, 文献[7, 10]提出的无功优化分层调度方法是基于 PV 电站设备级的分层方法, 未从分布式配电网分层分区角度展开; 文献[11-12]在分别考虑网络动态重构、集群划分的基础上, 基于二阶锥规划方法处理分布式系统无功优化及调压问题。电力系统区域划分方面, 传统方法多基于运行人员经验和自然归属地^[3], 无法反映目前高渗透率大规模分布式能源集群系统的网架拓扑及结构特征。文献[15]提出基于阻抗距离的复杂电网关键节点识别方法, 未进行后续优化或调压方法研究; 文献[19]提出应用灵敏度矩阵的分区方法, 提出的调压方法较为简单。

本文提出一种以阻抗距离和灵敏度为双重标准的改进电气距离定义; 综合考虑节点电气距离耦合连接度和 DG 分别接入后的电压灵敏度。应用谱聚类对高渗透率的含分布式可再生能源系统进行集群划分, 提出综合指标衡量划分结果。取聚类质心为关键节点, 将此节点作为调节无功输出的 PV 节点。

收稿日期: 2018-01-09; 修回日期: 2018-08-28。

上网日期: 2018-12-14。

国家重点研发计划资助项目 (2016YFB0900400); 国家自然科学基金资助项目 (51507001)。

以电压稳定输出和网损最小为优化目标,以关键节点 PV 逆变器无功功率为可调变量,应用改进的粒子群优化算法进行优化求解。针对大规模分布式系统计算量较大的问题,提出两步式无功优化策略,在指定周期内进行工作点辨识与粗调,在每个控制步长内,基于节点电压的线性化方程进行细调。将所提出的集群划分和无功调节策略应用于 IEEE 33 节点标准系统和安徽省金寨县某地区电网实际系统,仿真结果表明所提出的方法可有效地解决高渗透率可再生能源的过电压问题、减少网络损耗,并具有良好的实时性。

1 改进的电气距离

近年来有研究者对含 DG 的电力系统提出基于阻抗距离^[15-18]、模块化指标^[4,19]、灵敏度矩阵^[20-23]的集群划分。单纯考虑灵敏度系数,选择的关键节点集中在线路末端或重负荷区域,不适合无功分散补偿的原则^[22],且易造成补偿范围重叠^[23]。本文结合阻抗距离与灵敏度系数,定义改进的电气距离。

电力系统节点 i, j 之间等值阻抗 $Z_{ij, \text{equ}}$ 等于节点 i 注入单位电流源后节点 i, j 之间电压 $\dot{U}_{ij}$ ^[15] 即

$$Z_{ij, \text{equ}} = \frac{\dot{U}_{ij}}{I_i} = \dot{U}_{ij} \quad (1)$$

该数值可由节点阻抗矩阵元素计算,即

$$Z_{ij, \text{equ}} = (Z_{ii} - Z_{ij}) - (Z_{ij} - Z_{jj}) \quad (2)$$

式中: Z_{ij} 为系统节点阻抗矩阵第 i 行第 j 列元素。基于等值阻抗的指标可从电气学角度辨识一个节点是否处于系统电气结构的关键位置。

多 DG 接入后,在考虑各节点间阻抗距离关系的基础上,还需要分析 DG 出力变化时对其他节点的影响程度。根据功率变化对母线电压和相角影响,可定义 DG 接入后的电压灵敏度,有

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3)$$

利用雅可比矩阵 $\mathbf{J}$ 的逆矩阵构造在工况 Γ 含分布式可再生能源系统的电压有功灵敏度矩阵 $\mathbf{V}_{\text{sc}}^P|_{\Gamma}$ 、电压无功灵敏度矩阵 $\mathbf{V}_{\text{sc}}^Q|_{\Gamma}$,如式(14)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{\text{sc}}^P|_{\Gamma} = (\mathbf{V}_{\text{sc},ij}^P|_{\Gamma})_{N \times N} & \mathbf{V}_{\text{sc},ij}^P|_{\Gamma} = \frac{\partial V_j}{\partial P_i}|_{\Gamma} \\ \mathbf{V}_{\text{sc}}^Q|_{\Gamma} = (\mathbf{V}_{\text{sc},ij}^Q|_{\Gamma})_{N \times N} & \mathbf{V}_{\text{sc},ij}^Q|_{\Gamma} = \frac{\partial V_j}{\partial Q_i}|_{\Gamma} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $i, j \in N$, N 为分布式电力系统的总节点数; $\mathbf{V}_{\text{sc},ij}^P|_{\Gamma}$ 和 $\mathbf{V}_{\text{sc},ij}^Q|_{\Gamma}$ 分别为工况 Γ 下节点 i 对 j 的电压有功和无功灵敏度系数; P_i 和 Q_i 分别为节点 i

的有功和无功功率注入; V_j 为节点 j 电压幅值。

假设每个节点都有功率调节,且第 j 个节点的有功功率和无功功率分别调节 ΔP_j 和 ΔQ_j ,则节点 i 的电压变化为:

$$\Delta V = \sum_{j=1}^n \mathbf{V}_{\text{sc},ij}^P \Delta P_j + \sum_{j=1}^n \mathbf{V}_{\text{sc},ij}^Q \Delta Q_j \quad (5)$$

为区分不同接入点对其他节点的电压灵敏度,定义工况 Γ 下节点 i 对 j 的电压影响因子矩阵 $\mathbf{V}_{\text{if}}^P|_{\Gamma}$ 和 $\mathbf{V}_{\text{if}}^Q|_{\Gamma}$ 。

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{\text{if}}^P|_{\Gamma} = (\mathbf{V}_{\text{if},ij}^P|_{\Gamma})_{N \times N} & \mathbf{V}_{\text{if},ij}^P|_{\Gamma} = \frac{\partial V_j}{\partial P_i} \sum_{n=1}^N \frac{\partial P_i}{\partial V_n} \bigg|_{\Gamma} \\ \mathbf{V}_{\text{if}}^Q|_{\Gamma} = (\mathbf{V}_{\text{if},ij}^Q|_{\Gamma})_{N \times N} & \mathbf{V}_{\text{if},ij}^Q|_{\Gamma} = \frac{\partial V_j}{\partial Q_i} \sum_{n=1}^N \frac{\partial Q_i}{\partial V_n} \bigg|_{\Gamma} \end{cases} \quad (6)$$

考虑两种工况,即工况 Γ_1 ($\Delta P_k = 1 \text{ MW}$, $\Delta Q_k = 1 \text{ Mvar}$)和工况 Γ_2 ($\Delta P = 0.9 \text{ MW}$, $\Delta Q = 0.436 \text{ Mvar}$),研究不同有功及无功功率注入下节点的 $\mathbf{V}_{\text{if}}^P$ 和 $\mathbf{V}_{\text{if}}^Q$ 大小,结果如附录 B 表 B1 至 B3 所示。计算结果表明,以 IEEE 33 节点标准系统为例,某节点 $\mathbf{V}_{\text{if}}^P, \mathbf{V}_{\text{if}}^Q$ 数值与注入有功及无功变量基本呈线性关系。为了综合考虑电网拓扑结构中节点距离耦合连接度和 DG 分别接入后的电压灵敏度,本文将传统的等值阻抗与电压灵敏度相结合,构造改进的电气距离。

$$\begin{aligned} (e_{\Gamma}(i, j))_{N \times N} &= (\mathbf{V}_{\text{if},ij})_{N \times N} = \\ &= (\text{Re}(Z_{ij, \text{equ}}) \mathbf{V}_{\text{if},ij}^P|_{\Gamma})_{N \times N} + (\text{Im}(Z_{ij, \text{equ}}) \mathbf{V}_{\text{if},ij}^Q|_{\Gamma})_{N \times N} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $e_{\Gamma}(i, j)$ 为节点 i 到节点 j 的改进电气距离,可同时反映节点 i, j 之间等效阻抗距离 $Z_{ij, \text{equ}}$ 和电压影响因素。以下计算均在某确定工况上,因此省略下标 Γ 。

2 基于谱聚类的集群划分算法

2.1 谱聚类算法及应用

基于聚类分析方法进行集群划分是常用的分区策略,谱聚类算法^[4]和 K -means 聚类算法^[25]都被应用于电力系统集群划分问题中。谱聚类算法通过矩阵谱分析理论,导出表征聚类对象性质的特征值与特征向量,再利用新的数据特征对原数据进行聚类。该算法中构造归一化的特征向量空间,可在保留原始数据空间结构的同时,使数据空间样本组之间的相似性关系更直观^[26-27]。与其他聚类算法相比,谱聚类算法不易陷入局部最优解,且具有识别非凸分布的聚类的能力。

将含 DG 的电力系统集群划分问题表述为聚类

集成问题。数据集 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_N\}$ 为电力系统中的 N 个节点, E 为数据集里所有边的集合, 则根据图论, 该电力系统构成无向图 $G(V, E)$ 。应用改进的电气距离 $e(i, j)$ 定义对称权重矩阵 W 如下:

$$W = (e_{ij})_{N \times N} \quad e_{ij} = \frac{e(i, j) + e(j, i)}{2} \quad (8)$$

构造 $N \times N$ 型矩阵 D 作为度矩阵, 如式(9)所示。

$$D = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_N) \quad d_i = \sum_{j=1}^n e_{ij} \quad (9)$$

计算标准化的拉普拉斯矩阵 L 为:

$$L = D^{-\frac{1}{2}} (D - W) D^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

对 L 作特征值分解, 求得特征值和特征向量。按从小到大对特征值排序, 取前 k_1 个特征值, 并用对应的特征向量构成 $N \times k_1$ 维特征矩阵 $F \in \mathbf{R}^{N \times k_1}$ 。原电力系统的节点映射为 F 的每一行谱数据点, 引入的拉普拉斯变换有效实现数据降维。设 $l_i \in \mathbf{R}^{k_1}$ 为 F 的第 i 个列向量, 用 K -means 算法将 $L = (l_i)_{i \times N}$ 聚为 n 个亚群落(簇) $\{C_1, C_2, \dots, C_k, \dots, C_n\}$ 。第 k 个亚群落 C_k 中包含节点数 N_k ; 其中关键节点选取为聚类质心 μ_{C_k} , 记为 $V_{C_k}^\mu$; 剩下的 $N_k - 1$ 个节点 $V_{C_k}^1, V_{C_k}^2, \dots, V_{C_k}^{N_k-1}$ 为普通节点。为达到最佳电压调节效果, 降低安装成本, 将可控 PV 节点选址于关键节点。式(7)定义的改进电气距离大的节点, 阻抗距离大、电压灵敏度高, 以此参数作为聚类算法的量度参数, 可有效地选择关键节点。

2.2 集群划分结果评估指标

为衡量聚类算法在电力系统中集群划分的结果, 在不同算法中取最优或在相同算法中找到参数的最佳位置, 引入戴维森保丁指数(Davies Bouldin index, DBI)^[27]、剪影指数(silhouette index, SI)、邓恩(DUNN)指数与归一化的均方误差指标相结合, 作为集群划分的综合衡量指标。

设亚群落 C_i 和 C_j 的质心分别为 $V_{C_i}^\mu$ 和 $V_{C_j}^\mu$, $e(V_{C_i}^\mu, V_{C_j}^\mu)$ 为两者之间改进电气距离。记 $\hat{e}(\Omega_k)$ 为第 k 个亚群落内其他节点 $\{V_{C_k}^m | V_{C_k}^m \in C_k, m = 1, 2, \dots, N_k, m \neq \mu\}$ 到关键节点的平均改进电气距离, 表达式为:

$$\hat{e}(\Omega_k) = \frac{1}{N_k} \sum_{m=1, m \neq \mu}^{N_k} e(V_{C_k}^m, V_{C_k}^\mu) \quad (11)$$

电力系统集群划分的 DBI 定义为:

$$I_{DB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \max_{i \neq j} \frac{\hat{e}(\Omega_i) + \hat{e}(\Omega_j)}{e(V_{C_i}^\mu, V_{C_j}^\mu)} \quad (12)$$

I_{DB} 越小, 表明集群划分的个数合理、群间电气距离大、群内关联度高。

SI 反映了类的紧密性(即类内平均距离)和可分性(最小类间距离)^[28]。设亚群落 C_k 内第 i 个节点到同一集群内其他节点的平均距离为 a_i , 该节点到其他集群内最大平均距离为 b_i , 其剪影宽度(silhouette width, SD)为 s_i , 表达式分别如下。

$$s_i = \frac{b_i - a_i}{\max\{a_i, b_i\}} \quad (13)$$

$$a_i = \frac{1}{N_k} \sum_{j=1, j \neq i}^{N_k} e(V_{C_k}^i, V_{C_k}^j) \quad (14)$$

$$b_i = \min_{\substack{1 \leq l \leq n \\ l \neq k}} \frac{1}{N_l} \sum_{m=1, m \in C_l}^{N_l} e(V_{C_k}^i, V_{C_l}^m) \quad (15)$$

对包含 N 个节点的电力系统, 集群划分结果为 n 个亚群落 $\{C_1, C_2, \dots, C_k, \dots, C_n\}$, 第 k 个亚群落 C_k 中包含节点数 N_k 。则 SI 定义为:

$$I_S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{N_k} \sum_{j=1}^{N_k} s_i(j) \right) \quad (16)$$

邓恩指数用亚群落的直径表示集群的紧密性, 用亚群落间距离表示不同集群间的分离程度, I_{DUNN} 表达式如下^[29]。

$$d_{C_k} = \max_{V_{C_k}^i, V_{C_k}^j \in C_k} e(V_{C_k}^i, V_{C_k}^j) \quad (17)$$

$$D(i) = \min_{j=i+1, i+2, \dots, n} \frac{d(C_i, C_j)}{\max_{k=1, 2, \dots, n} d_{C_k}} \quad (18)$$

$$I_{DUNN} = \min_{i=1, 2, \dots, n} D(i) \quad (19)$$

式中: d_{C_k} 为第 k 个亚群落 C_k 的直径, 即集群内节点间改进电气距离的最大值; $d(C_i, C_j)$ 为集群间节点的最短距离; $D(i)$ 为中间变量。

融合多个量度指标进行聚类结果的有效性量度, 应用于谱聚类算法的 K -means 聚类阶段, 定义聚类适应度函数为:

$$f_{\text{cluster}} = I_{DB}^{\lambda_1} I_S^{-\lambda_2} I_{DUNN}^{-\lambda_3} \quad (20)$$

式中: $\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\} \in [0, 1]$ 分别为 I_{DB}, I_S, I_{DUNN} 指标的权重程度, 在聚类算法中应使 f_{cluster} 最小化。该指标从不同角度体现了电力系统集群划分的群内电气耦合紧密度、群间分离程度和集群个数合理性。

2.3 电力系统集群划分算法流程

根据式(7)定义的电气距离作为 DG 电力系统集群划分的距离测度, 由式(8)至式(10)构造权重矩阵 W , 对角线矩阵 D , 标准化的拉普拉斯矩阵 L , 并通过特征值分解降维。应用 K -means 算法对 L 聚类, 其中聚类适应度函数由式(11)至式(20)定义, 将电力系统内 N 个节点划分为 n 个亚群落。其流程图如附录 A 图 A1 所示。

3 基于混合粒子群算法的无功调节策略

3.1 无功优化问题描述

假设可控 PV 单元有足够的无功调节裕量,控制目标为节点电压在设定值上下摄动最小,控制变量为可控 PV 节点无功功率,遵从潮流计算和设备物理条件约束。

$$F_1 = \min |U - U_{pu}| \quad (21)$$

$$F_2 = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (22)$$

$$\text{s. t. } P_{PV,i} - P_{D,i} = U_i \sum_{j=1}^{N_k} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (23)$$

$$Q_{PV,i} - Q_{D,i} = U_i \sum_{j=1}^{N_k} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (24)$$

$$-a \cos 0.9 \leq \varphi_{PV,k} \leq a \cos 0.9 \quad (25)$$

$$P_{\min} \leq \Delta P_{PV,k} \leq P_{\max} \quad (26)$$

式中: $i=1,2,\dots,n$; $k=1,2,\dots,N_k$; U_{pu} 为期望的节点电压; $P_{PV,i}$ 和 $Q_{PV,i}$ 分别为第 i 个 PV 节点的有功和无功功率输出; $P_{D,i}$ 和 $Q_{D,i}$ 分别为第 i 个 DG 的有功和无功出力; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点 i,j 间阻抗矩阵和导纳矩阵; θ_{ij} 为其相位差; $\varphi_{PV,k}$ 为第 k 个可控 PV 单元的逆变器功率因数角。

2 个优化目标以线性加权法处理为单目标问题,如式(27)所示。

$$F = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 \quad (27)$$

研究中主要关注电压调节问题,因此将目标 1 即与标准电压偏差的权值设置较高,目标 2 网损权值较低。在具体程序中,取 $\alpha_1=0.8, \alpha_2=0.2$ 。

3.2 基于混合粒子群算法的无功优化策略

粒子群优化算法可处理有约束问题,被应用于电压调节问题^[4]。本文将布谷鸟算法^[30]中的淘汰机制和 Lévy 飞行策略引入传统粒子群优化算法,形成的混合粒子群(hybrid particle swarm optimization, HPSO)算法具有良好的寻优能力和收敛速度。算法基本原理和在调压问题中的步骤如下,流程图如图 1 所示。

本文中可调变量为能控 PV 单元的有功剪切 $\Delta P_{PV,k}$, $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n] = [\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n]$, 其中 n 为含 DG 的电力系统节点划分的亚群落数目。迭代优化中,第 t 代粒子位置为 $x_{ij}(t)$, 速度为 $v_{ij}(t)$ ($i=1,2,\dots,N_{\text{hpso}}; j=1,2,\dots,n$)。全局最优位置为 $\mathbf{G}_{\text{best}} = [G_{\text{best}1}, G_{\text{best}2}, \dots, G_{\text{best}n}]$ 局部最优位置 $\mathbf{P}_{\text{best},i} = [P_{\text{best},i1}, P_{\text{best},i2}, \dots, P_{\text{best},in}]$ 。

步骤 1: 初始化算法中需要的参数,如个体规模

N 、维数 n 、权重因子 w 的上下限($W_{\max}$ 和 $W_{\min}$)、加速度系数 c_1 和 c_2 、学习因子 β 、淘汰概率 P_a 等。

步骤 2: 设定每个元素的搜索范围和速度变化范围(注:在设定时需根据具体电力系统电压调节问题中设备单元的物理约束,同一个个体中不同元素的搜索范围和速度范围不一定相同)。

步骤 3: 在搜索范围内随机初始化第一代个体中各个元素, $\mathbf{X}_1 = [x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}]$ 。

步骤 4: 计算并比较 N 个个体的适应度函数值,选取适应度函数最佳的个体最优 $\mathbf{P}_{\text{best}}(t)$,并在不同迭代周期产生的个体最优中选出群体最优 $\mathbf{G}_{\text{best}}(t)$ 。

步骤 5: 以概率 P_a 选择适应度较差的个体,并随机引入新的个体取代之。

步骤 6: 实时更新权重因子 w 为

$$w = W_{\max} - \frac{W_{\max} - W_{\min}}{T} t \quad (28)$$

式中: T 为总迭代步数。

遵从 Lévy 飞行模式(9)至式(11)更新个体速度:

$$v_{ij}(t+1) = w v_{ij}(t) + (c_1 \oplus \text{Lévy}(\lambda))(P_{\text{best},ij}(t) - x_{ij}(t)) + (c_2 \oplus \text{Lévy}(\lambda))(G_{\text{best},j}(t) - x_{ij}(t)) \quad (29)$$

式中: $\oplus$ 为点乘; $\text{Lévy}(\lambda)$ 为 Lévy 随机搜索路径, $1 \leq \lambda \leq 3$, Lévy 飞行策略见文献[30]。

步骤 7: 增加迭代步数($t=t+1$)。终止条件为是否小于最大迭代步数,或适应度函数的数值是否满足精度要求。若不满足终止条件,则跳回步骤 4; 否则结束循环,并输出最优解 $\mathbf{X}_{\text{best}}$ 并绘制适应度函数收敛曲线。

3.3 快速智能调压算法

基于混合粒子群算法的智能调压策略需要在每个采样周期内执行进化类算法,计算量较大,需要运算时间长。因此考虑在现有智能调压算法的基础上,减少混合粒子群优化算法的运行次数。如间隔 15 min/3 h/4 h/12 h,应用混合粒子群算法;寻找合适的工况 Γ 。在其他采样周期内基于式(5)进行线性调节。快速调压算法的流程图如附录 A 图 A2。在大规模分布式实际系统中,较适合应用快速智能调压策略。

4 仿真实验及分析

对 IEEE 33 节点标准系统进行集群划分,考虑 PV 并入后对调压策略进行研究,获得良好节点电压控制效果;并将本文提出的方法应用于安徽省金寨县某实际高渗透率大规模分布式电力系统。

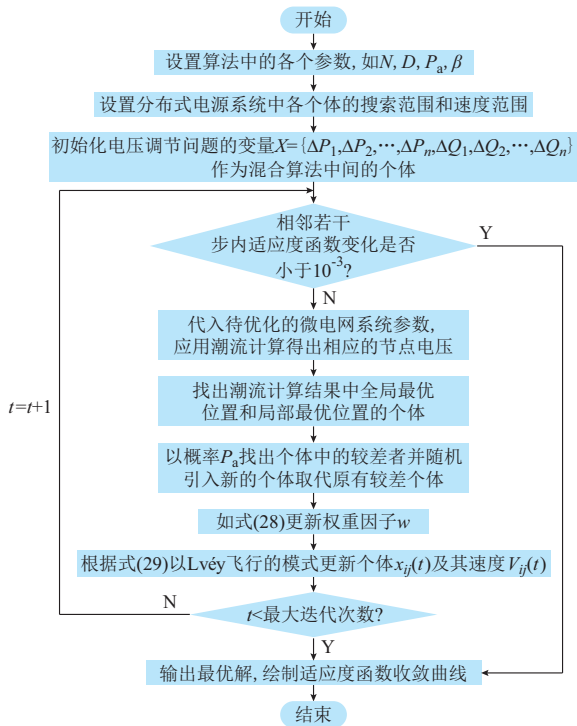


图 1 基于混合粒子群算法的无功优化策略
Fig. 1 Reactive power optimization strategy based on hybrid particle swarm optimization

4.1 仿真模型 1

IEEE 33 节点标准系统馈线的正常负荷为 3.715 MW+j2.3 MVar。考虑每个节点都有 PV 单元并入,但考虑优化运行问题,仅在有限节点的可控 PV 单元上进行无功调节。

为了找出适合进行无功调节的 PV 单元节点,首先根据式(1)至式(7)计算各节点的改进电气距离($e_r(i,j)$)和 $V_{IF,ij}^P, V_{IF,ij}^Q, V_{SC}^P, V_{SC}^Q$;再应用第 2 节提出的谱聚类集群划分方法,由式(11)至式(19)构建集群划分滚动指标,并在改进粒子群算法中将其最小化。所得电气距离($e_r(i,j)$)及 $V_{IF,ij}^P, V_{IF,ij}^Q, V_{SC}^P, V_{SC}^Q$ 均为 33×33 型矩阵。

节点 i 的总有功和无功电压影响因子 $V_{IF,i}^P$ 和 $V_{IF,i}^Q$ 为:

$$\begin{cases} V_{IF,i}^P = \sum_{j=1, j \neq i}^N V_{IF,ij}^P \\ V_{IF,i}^Q = \sum_{j=1, j \neq i}^N V_{IF,ij}^Q \end{cases} \quad (30)$$

为方便列举及比较,将 IEEE 33 节点系统中每个节点与剩余节点的改进电气距离 $e_r(i,j)$ 之和标准化,并定义为 $e_{total,i}$,如式(31)所示。标准化后结果如附录 B 表 B4 及附录 A 图 A3 所示。

$$e_{total,i} = \sum_{j=1, j \neq i}^N e_r(i,j) \quad (31)$$

基于 $e_r(i,j)$ 应用 2.3 节提出的集群划分算法流程,将含 PV 接入的 IEEE 33 节点系统划分为 5 个亚群落,划分结果如附录 A 图 A4。其中节点 1-5,19 为集群 1;节点 6-12,26,27 为集群 2;节点 13-18 为集群 3;节点 20-25 为集群 4;节点 26-33 构成集群 5。形成的关键节点 3,7,13,24,29 均为附录 A 图 A4 曲线中的局部极小值点。调节安装于关键节点的 PV 逆变器无功功率,可以在考虑经济性和有效性下,达到最佳的无功优化结果。

考虑在原有 IEEE 33 系统每个节点上都加入 PV 节点,渗透率接近 100%。在这种场景下,原节点电压被抬高,产生过电压现象,如图 2 中蓝色曲线。应用基于混合粒子群算法的无功优化策略,取期望的节点电压设定值为 $U_{pu}=1.05$ 。混合粒子群算法中各参数设定为 $P_{max}=500 \text{ kW}, Q_{min}=-500 \text{ kW}, Q_{max}=500 \text{ kW}, W_{max}=0.9, W_{min}=0.4, c_1=c_2=2, N_{pso}=20$,及 $p_a=0.15$ 。无功优化算法作用下,IEEE 33 节点系统中,节点电压基本接近设定值 1.05(标么值),如图 2 中绿色曲线所示。以上文算例中,额定状态 Γ_1 和欠功率状态 Γ_2 下,在集群划分的基础上,应用基于混合粒子群优化算法的无功优化策略,计算和比较优化前后网损。额定状态下无功网损由 9.82%降为 8.1%;欠功率状态下,无功网损由 11.28%降为 8.99%。

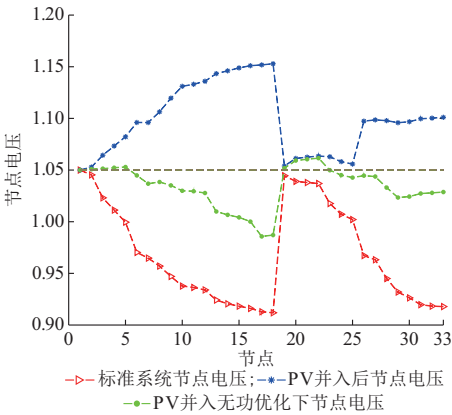


图 2 不同场景下 IEEE 33 节点系统节点电压
Fig. 2 Node voltage of IEEE 33-bus system in different scenarios

由附录 B 表 B4 和图 2 对比曲线可见,在对 IEEE 33 节点合理分区的基础上,在所选择的关键节点调节 PV 逆变器无功功率,基于混合粒子群的无功优化算法可在有限步长内收敛。在额定状态和欠功率状态下均可降低网损,并有效对节点电压智能调控,因此将所提方法应用于实际 DG 系统中。

4.2 仿真模型 2

考虑安徽省金寨县某区域的 10 kV 电力系统该系统中有 61 个节点,馈线总负荷为 1.16 MW+

j0.69 Mvar,如附录 A 图 A5 所示。目前已有 27 个节点安装了 PV 系统,未来将有共 5.01 MW 的 PV 系统并入,具体安装点和容量见附录 A 图 A6,PV 渗透率达到 143%。记录现场一年的数据进行分析,选取每个月第一周的周日、周三作为典型日,记录典型日 24 h 的 PV 输出、负荷数据和节点电压,形成共计 $24 \times 2 \times 12 = 576$ 个时间断面。

应用基于谱聚类的集群划分方法,将 61 节点的实际系统划分为 5 个亚群落,只有节点 61 与相距较远的其他节点共同构成亚群落 1,这是因为位于节点 61 处为一水力发电站,向亚群落 1 其他节点所处地域供电,因此电气距离较近。可见划分结果合理。

附录 B 表 B5 所示的 PV 接入场景下,未经过治理的节点电压在 576 个断面上的情况如附录 A 图 A6 所示,有明显的过电压现象。为方便仿真分析及对比,称基于混合粒子群算法的无功方法称为所提算法 I,称快速智能调压算法为所提算法 II。应用经调试的智能优化算法参数,设定值为 1.05(标么值),基于混合粒子群算法对 61 节点实际系统进行电压调节。对每个时间断面实施快速智能调压算法,在 576 个全时间断面下,61 个节点的节点电压控制效果如图 3 所示。

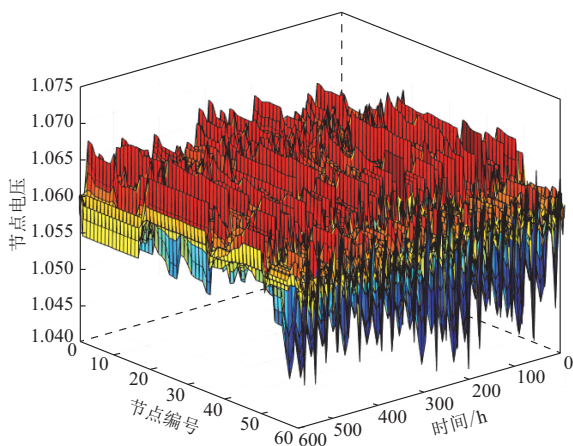


图 3 PV 大规模接入后智能调压策略下系统节点电压
Fig. 3 System node voltage under intelligent voltage regulation strategy after large-scale PV access

实际系统无功优化前网损为 10.69%;无集群划分的无功优化平均运行时间为 1 551.73 s,网损数值为 7.91%;所提算法 I 运行时间为 372.21 s,网损为 7.97%;所提算法平均运行时间 130.64 s,网损为 8.03%。从网损结果上,所提算法 I 在投入可调 PV 节点数由 61 个减少到 5 个的前提下,优化结果与传统无功优化结果相近,计算所需平均时间减少;对大规模实际配电网系统,在引入快速调压思想后,进一步将算法运行时间降低。所提出的无功优化策略可在保证降低网损和调压效果的基础上,

使实际运行成本和基础设备投入有大幅削减。

过电压是高渗透率分布式系统常见的不良现象,在有限的可控 PV 设备介入下,对大规模配电系统中节点电压进行有效调节具有重要意义。为便于比较,选取光照强度最大的典型工作日某时间断面,比较 PV 并入前、PV 并入后未进行无功优化和 PV 并入后未进行无功优化的节点电压,如附录 A 图 A7 所示。

5 结语

随着分布式能源系统的渗透率不断提高,规模不断扩大,给电力系统的安全运行和优化调度问题带来更多挑战。本文应用集群划分和智能控制算法对高渗透率大规模分布式系统进行无功优化。

集群划分方面,提出基于阻抗距离和电压灵敏度的改进电气距离;整合了类间相异度、类内相似度、异质性等方面的聚类指标,定义综合的集群划分评估指标;应用谱聚类算法对大规模分布式系统进行亚群落划分与关节节点搜索。无功优化方面,将高渗透率分布式系统的无功调节描述为有约束非线性优化问题,提出基于混合粒子群算法的智能调压策略及其快速算法,在集群划分的基础上进行潮流计算,通过调节可控 PV 设备的无功功率,得出高渗透率分布式系统无功优化方案。IEEE 33 节点和安徽省某 61 节点系统的仿真实验证明所提出基于集群划分的无功优化策略有效性、实时性。

后续将结合改进的电气距离、综合聚类适应度函数及分布式能源系统结构特征,对集群划分的聚类过程进行进一步改进。并争取在实际系统中验证本文中提出的集群划分和无功优化方法。

本文在完成过程中,受到安徽大学 2015 博士科研启动项目(J01001929)的资助,谨此致谢。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 肖浩,裴玮,邓卫,等.分布式电源对配电网电压的影响分析及其优化控制策略[J].电工技术学报,2016,31(增刊1):203-213.
XIAO Hao, PEI Wei, DENG Wei, et al. Analysis of the impact of distributed generation on distribution network voltage and its optimal control strategy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(Supplement 1): 203-213.
- [2] 康重庆,姚良忠.高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J].电力系统自动化,2017,41(9):2-11. DOI: 10.7500/AEPS20170120004.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high

proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11. DOI: 10.7500/AEPS20170120004.

[3] VALLEE F, BRUNIEAU G, PILOT M, et al. Optimal wind clustering methodology for adequacy evaluation in system generation studies using non-sequential Monte Carlo simulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2173-2184.

[4] ZHAO Bo, XU Zhicheng, XU Chen, et al. Network partition-based zonal voltage control for distribution networks with distributed PV systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4087-4098.

[5] 丁明,王伟胜,王秀丽,等.大规模光伏发电对电力系统影响综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):2-14.

DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 2-14.

[6] 刘公博,颜文涛,张文斌,等.含分布式电源的配电网动态无功优化调度方法[J].电力系统自动化,2015,39(15):49-54. DOI: 10.7500/AEPS20141013016.

LIU Gongbo, YAN Wentao, ZHANG Wenbin, et al. Optimization and dispatching method of dynamic reactive power in distribution network with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 49-54. DOI: 10.7500/AEPS20141013016.

[7] 刘双,张建周,王汉林,等.考虑多无功源的光伏电站两阶段无功电压协调控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(11):120-125. DOI:10.7500/AEPS20160708004.

LIU Shuang, ZHANG Jianzhou, WANG Hanlin, et al. Two stage reactive power and voltage coordinated control strategy for photovoltaic power station considering multiple reactive power sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 120-125. DOI: 10.7500/AEPS20160708004.

[8] CARERI F, GENESI C, MARANNINO P, et al. Definition of a zonal reactive power market based on the adoption of a hierarchical voltage control[C]// 7th International Conference on the European Energy Market, June 23-25, 2010, Madrid, Spain: 1-7.

[9] KANKANALA P, SRIVASTAVA S C, SRIVASTAVA A K, et al. Optimal control of voltage and power in a multi-zonal MVDC shipboard power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 27(2): 642-650.

[10] 李鹏,于航,夏曼,等.分布式光伏集群分层多模式无功控制策略[J].电网技术,2016,40(10):3038-3044.

LI Peng, YU Hang, XIA Man, et al. A hierarchical multi-mode var control strategy for grid-connected PV clusters[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3038-3044.

[11] 朱俊澎,顾伟,张韩旦,等.考虑网络动态重构的分布式电源选址定容优化方法[J].电力系统自动化,2018,42(5):1-9. DOI: 10.7500/AEPS20170605016.

ZHU Junpeng, GU Wei, ZHANG Handan, et al. Optimal allocation of distributed generators considering dynamic network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 111-119. DOI: 10.7500/AEPS20170605016.

[12] 田园,汪可友,李国杰,等.计及风电相关性的二阶锥动态随机最优潮流[J].电力系统自动化,2018,42(5):41-47. DOI: 10.7500/AEPS20170605003.

TIAN Yuan, WANG Keyou, LI Guojie, et al. Dynamic stochastic optimal power flow based on second-order cone programming considering wind power correlation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 41-47. DOI: 10.7500/AEPS20170605003.

[13] YANG S, WANG W, LIU C, et al. Optimal reactive power dispatch of wind power plant cluster considering static voltage stability for low-carbon power system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(1): 114-122.

[14] SAMIMI A, NIKZAD M. Complete active-reactive power resource scheduling of smart distribution system with high penetration of distributed energy resources [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(6): 863-875.

[15] 谭玉东,李欣然,蔡晔,等.基于电气距离的复杂电网关键节点识别[J].中国电机工程学报,2014,34(1):146-152.

TAN Yudong, LI Xinran, CAI Ye, et al. Critical node identification for complex power grid based on electrical distance[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 146-152.

[16] 陈厚合,运奕竹,邢文洋,等.基于聚类分析方法的电力系统负荷节点分区策略[J].电力系统保护与控制,2013,41(12): 47-53.

CHEN Houhe, YUN Yizhu, XING Wenyang, et al. A novel strategy of network partitioning for load node in power systems using spectral clustering [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 47-53.

[17] 颜伟,王芳,唐文左,等.基于电源分区与短路阻抗距离的电压无功分区方法[J].电力系统保护与控制,2013,41(7):109-115.

YAN Wei, WANG Fang, TANG Wenzuo, et al. Network partition for reactive power/voltage control based on power sources clustering and short-circuit impedance distance [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 109-115.

[18] COTILLA-SANCHEZ E, HINES P D H, BARROWS C, et al. Multi-attribute partitioning of power networks based on electrical distance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4979-4987.

[19] 肖传亮,赵波,周金辉,等.配电网中基于网络分区的高比例分布式光伏集群电压控制[J].电力系统自动化,2017,41(21): 147-155. DOI:10.7500/AEPS20170101002.

XIAO Chuanliang, ZHAO Bo, ZHOU Jinhui, et al. Network partition based cluster voltage control of high proportion distributed photovoltaic systems in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 147-155. DOI: 10.7500/AEPS20170101002.

[20] 孟庭如,邹贵彬,许春华,等.一种分区协调控制的有源配电网调压方法[J].中国电机工程学报,2017,37(10):2852-2860.

MENG Tingru, ZOU Guibin, XU Chunhua, et al. A voltage regulation method based on district-dividing coordinated control for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2852-2860.

[21] BAHRAMIPANAH M, CHERKAoui R, PAOLONE M. Decentralized voltage control of clustered active distribution network by means of energy storage systems [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 136: 370-382.

[22] JIA Y, XU Z. A direct solution to bi-objective partitioning

- problem in electric power networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2481-2483.
- [23] ELRAZAZ Z S. Optimization allocation of reactors for lightload operation [J]. IEE Proceeding: Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(4): 350-354
- [24] 刘科研,盛万兴,李运华. 基于改进遗传模拟退火算法的无功优化[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 13-18.
LIU keyan, SHENG Wanxing, LI Yunhua. Research on reactive power optimization based on improved genetic simulated annealing algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 13-18.
- [25] ZHANG M, CHEN J. Islanding and scheduling of power distribution systems with distributed generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3120-3129.
- [26] 林俐,潘险险. 基于分裂层次半监督谱聚类算法的风电场机群划分方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 8-14.
LIN Li, PAN Xianxian. Wind turbine grouping based on semi-supervised split-hierarchical spectral clustering algorithm for wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 8-14.
- [27] 周林,平西建,徐森,等. 基于谱聚类的聚类集成算法[J]. 自动化学报, 2012, 38(8): 1335-1342.
ZHOU Lin, PING Xijian, XU Sen, et al. Cluster ensemble based on spectral clustering[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(8): 1335-1342.
- [28] JAIN R, KORONIOS A. Innovation in the cluster validating techniques [J]. Fuzzy Optimization & Decision Making, 2008, 7(3): 233-241.
- [29] 庄楚天,吴戈. 基于站点爬虫数据的公共自行车系统时空特征分析[J]. 交通信息与安全, 2017, 35(3): 51-58.
ZHUANG Chutian, WU Ge. Spatial-temporal characteristics of a shared bicycle system based on web crawler data[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2017, 35(3): 51-58.
- [30] YANG X S. Nature-inspired metaheuristic algorithms [M]. 2nd ed. UK: Luniver Press, 2010: 105-108.

张 倩(1984—),女,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:多目标优化。E-mail: qianzh@ahu.edu.cn

丁津津(1985—),男,博士研究生,高级工程师,主要研究方向:分布式电网与新能源技术。E-mail: djinjin123@126.com

张道农(1961—),男,教授级高级工程师,主要研究方向:继电保护及安全自动装置。E-mail: zhangdn@ncpe.com.cn

王群京(1961—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电能质量、电机控制。E-mail: wangqunjing@ahu.edu.cn

(编辑 施冬敏 蔡静雯)

Reactive Power Optimization of High-penetration Distributed Generation System Based on Clusters Partition

ZHANG Qian^{1,2}, DING Jinjin^{1,3}, ZHANG Daonong⁴, WANG Qunjing^{1,5}, MA Jinhui⁶

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China;

2. Hefei Hengda Jianghai Pump Co. Ltd., Hefei 231131, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Co. Ltd., Hefei 230022, China;

4. North China Electric Power Design Institute Co. Ltd. of China Electrical Consulting Group, Beijing 100120, China;

5. Collaborative Innovation Center of Industrial Energy-saving and Power Quality Control,
Anhui University, Hefei 230601, China;

6. State Grid Anhui Electric Power Co. Ltd., Hefei 230061, China)

Abstract: With the increase of distributed generator (DG) penetration in the power system, new challenges have been taken to the optimal operation of distributed system in large scale. The reactive power optimization is analyzed on the basis of cluster division with the consideration of DG integration. The modified electrical distance is introduced as the distance measurement in clustering algorithm. The spectral clustering method is applied to divide the high-denetration distributed renewable energy system into several sub-communities and determine the key nodes in each cluster. With the minimum network loss and voltage fluctuation as the optimization goal, the reactive power of the photovoltaic inverter at the key node is adjusted to reduce the network loss and stabilize the voltage output. In order to solve the problem of dual-objective reactive power optimization, an intelligent voltage regulation strategy based on improved particle swarm optimization algorithm is proposed to optimize reactive power for multiple sub-communities. The cluster division method and the reactive power optimization strategy are applied to the IEEE 33-bus standard system, which improves the node voltage stability and reduces the network loss. Aiming at the large-scale distributed energy system, a fast intelligent voltage regulation strategy is further proposed, which is applied to the actual system of a certain district in Jinzhai County, Anhui Province, and has good control effect, and has been greatly reduced in terms of adjustment time, operation cost and input cost.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0900400) and National Natural Science Foundation of China (No. 51507001).

Key words: distributed energy network; cluster partition; electrical distance; reactive power optimization; particle swarm optimization algorithm