

# 一种面向智能配电网的分布式并行电压优化方法

孙智卿<sup>1,2</sup>, 刘永梅<sup>2</sup>, 刘科研<sup>2</sup>

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100921)

**摘要:** 针对智能配电网中分布式电源(DG)接入及电网仿真实时响应的需求,提出一种分布式并行环境下求解智能配电网中各 DG 最优输出功率的方法,实现了快速高效的配电网电压优化。该方法首先基于凝聚层次聚类法(HAC),解决了智能配电网自动分区的问题,在此基础上,采用分布式序列二次规划(DSQP-DG)算法,通过内外层迭代交替并行求解出 DG 最优出力。以接入 DG 的 IEEE 33 节点系统算例对该方法进行测试验证可知,较之辅助问题原理(APP)方法,该方法具备更好的寻优能力和快速性,能够有效解决智能配电网分布式并行电压优化问题。

**关键词:** 智能配电网; 分布式电源; 电压优化; 凝聚层次聚类法; 分布式序列二次规划

**中图分类号:** TM 761

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.022

## 0 引言

配电网规模的不断扩大及用电质量要求的不断提高对配电网电压优化提出了更高的要求。作为智能配电网的一个主要元素,分布式电源(DG)被广泛应用于配电网中,能够有效改善系统电压质量,减少发电成本<sup>[1]</sup>。传统最优潮流(OPF)问题的提出和求解主要针对输电网而言,多用于输电阻塞管理成本最小等目标的求解<sup>[2]</sup>,未针对含有多 DG 的配电网特征做出相应改进,不能有效解决配电网电压优化问题。近年来,OPF 的研究已扩展到智能配电网领域。文献[3]应用遗传算法优化 DG 的位置和容量,考虑了 DG 对配电网潮流和线路负载能力的影响。文献[4]采用改进的自适应权重粒子群优化算法进行目标函数寻优,得到了有功线损最小的 DG 接入方案。文献[5]以满足负荷增长需求、考虑环境效益的供电公司年总规划成本现值最小为优化目标,对含有多种 DG 的分布式发电系统进行仿真分析,得到分布式发电系统的优化配置结果。在该类研究中,优化目标通常采用系统发电成本最小、最大化 DG 有功输出、有功线损最小及以上目标的组合优化等形式<sup>[6]</sup>。

另外,配电网快速仿真与模拟(DFSM)的提出与发展对配电网分析和计算的快速性提出了新的要求。例如,对于一条 300 个节点馈线的潮流计算可以在 1 s 内完成,但是对于含有 1000 条馈线的复杂环网连接方式下的潮流计算通常在 3 min 以上,而对含有 1000 条馈线的复杂环网优化分析则要花费更长时间。鉴于分布式并行计算是提高计算速度的有效方法,配电网分区及相应的分布式并行优化分解

协调算法值得深入研究。典型的优化问题分解算法有<sup>[7]</sup>:基于 PQ 分解技术的分解算法,其需要利用 PQ 解耦技术对有功、无功交替优化并计及有功、无功的耦合影响;基于拉格朗日松弛技术的分解算法,其重点是找到区域间合适的耦合约束并将耦合条件引入目标函数;基于辅助问题原理的分解算法<sup>[8]</sup>,其本质是增广拉格朗日松弛法的延伸;基于智能型算法的并行算法,其具有天然的并行性,但快速寻找最优解的能力较弱。

本文从智能配电网电压优化的分布式并行计算问题出发,针对考虑 DG 出力最大及全网有功线损最小的多目标优化模型,提出了一种新的配电网自动分区及分布式并行电压优化方法。该方法首先利用凝聚层次聚类(HAC)进行智能配电网自动分区,然后对各子区域建立解耦模型,并对增量形式的优化问题使用分布式序列二次规划(DSQP-DG)算法,通过内外层交替迭代求解 DG 的最优接入容量,实现配电网电压优化。

## 1 智能配电网电压优化模型

对于求解接入配电网 DG 容量的问题,现做基本假设如下:为简单起见,DG 接入点类型为 PQ 节点;由于 DG 输出功率不可控,其有功出力范围为 $[0, P_{DGmax}]$ ,DG 容量问题可转化为确定其出力上限  $P_{DGmax}$  的问题。本文提出的电压优化算法的控制变量为 DG 输出有功功率和无功功率,状态变量为节点电压、线路流经功率等<sup>[9]</sup>。

第 1 个优化目标是全网有功线损最小。DG 接入配电网将改变系统潮流分布,一般会减小支路潮流流动,从而有利于减小网损,但是当 DG 注入容量过高时,支路潮流流动反而增大,因而导致网损增加。

$$\min F_1(x) = \sum_{k=1}^{N_k} P_{Loss,k} = \sum_{k=1}^{N_k} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}) G_{ij} \quad (1)$$

收稿日期:2016-04-17;修回日期:2017-02-21

基金项目:国家电网公司研究项目(PD-71-15-042)

Project supported by State Grid Corporation of China Research Program(PD-71-15-042)

其中,  $U_i, U_j$  分别为支路  $k$  两端节点  $i, j$  电压幅值;  $G_{ij}$  为线路导纳的实部;  $N_b$  为线路数目。

第 2 个优化目标为 DG 有功出力最大:

$$\max F_2(x) = \sum_{i=1}^{N_{DG}} P_{DG_i} \quad (2)$$

其中,  $P_{DG_i}$  为节点  $i$  处的 DG 有功出力;  $N_{DG}$  为接入 DG 数目。

针对以上 2 个目标函数, 采用惩罚因子的方式将多目标转化为单目标的优化问题, 目标函数如下:

$$\min F(x) = \sum_{i=k}^{N_b} P_{Loss_k} - \omega \sum_{i=1}^{N_{DG}} P_{DG_i} \quad (3)$$

其中,  $\omega$  为惩罚因子。

潮流方程作为等式约束:

$$P_{DG_i} - P_{D_i} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (4)$$

$$Q_{DG_i} - Q_{D_i} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (5)$$

其中,  $Q_{DG_i}$  为节点  $i$  处的 DG 无功出力;  $B_{ij}, \theta_{ij}$  分别为节点  $i, j$  之间的导纳虚部和相位差;  $N$  为节点数目。

不等式约束包括以下几项。

a. DG 出力约束:

$$P_{DG_i}^{\min} \leq P_{DG_i} \leq P_{DG_i}^{\max} \quad (6)$$

$$Q_{DG_i}^{\min} \leq Q_{DG_i} \leq Q_{DG_i}^{\max} \quad (7)$$

b. 节点电压约束:

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (8)$$

c. 支路功率约束:

$$|S_{ij}| = |U_i^2 G_{ij} - U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})| \leq S_{ij}^{\max} \quad (9)$$

d. DG 总接入容量限制:

$$\sum_{i=1}^{N_{DG}} P_{DG_i} \leq 0.25 S_{load}^{\max} \quad i \in \Phi_S \quad (10)$$

其中,  $S_{load}^{\max}$  为系统负荷总容量;  $\Phi_S$  为所有接入 DG 的集合。

## 2 智能配电网自动分区方法

本文提出一种基于 HAC 的智能配电网自动分区算法。HAC 采用自底向上的分类策略, 首先将每个节点单独作为一个类, 然后依次合并类间电气距离最近的 2 个类为一个新类, 直到所有节点都被合并为一个类<sup>[10]</sup>后, 再依据每一聚类层次对应的  $F$  值确定最优聚类层次。该最优聚类层次对应的聚类个数即为分区个数。根据该聚类层次对应的节点聚类状况, 确定分区状况, 即同一类节点覆盖的电网区域对应一个电网分区。据此, 可实现基于 HAC 的智能配电网自动分区。

### 2.1 聚类对象及对象特征的选取

本文提出的自动分区算法选取配电网节点作为聚类对象, 选用等效电气距离<sup>[11]</sup>作为对象特征。等效电气距离的远近表征 2 个节点之间电压幅值变化的

耦合程度, 距离越远则耦合程度越小, 反之亦然。利用其能够比较准确地反映电力网络节点间电气连接关系, HAC 将按照其描述的电气连接关系将节点自动划分到不同区域<sup>[12-13]</sup>。

### 2.2 类间距离的定义

自动分区算法使用类中对象的质心来代表类, 类与类之间的距离定义为类与类质心之间的距离。在此基础上对类间距离度量进行如下 2 点修正。

a. 引入规模因子  $\alpha$  和 DG 分布因子  $\beta$  进行修正:

$$D(K_i, K_j) = \text{dis}(K_i, K_j) \alpha^{N(i)+N(j)} \beta^{N_{DG}(i)+N_{DG}(j)} \quad (11)$$

其中,  $D(K_i, K_j)$  为修正后类间距离;  $\text{dis}(K_i, K_j)$  为通过质心距离定义的类间距离;  $N(i), N_{DG}(i)$  和  $N(j), N_{DG}(j)$  分别为子区域  $K_i, K_j$  中节点和 DG 的数目;  $\alpha, \beta$  取值区间为  $[1.0, 1.1]$ 。

修正后的电气距离可以有效反映区域内节点和 DG 数目对聚合过程的影响, 能够有效抑制分区结果子区域间节点规模差距悬殊的问题, 并有利于接入 DG 的节点在各子区域中合理分配。

b. 对于不存在任何联络线直接相连的 2 个子区域, 将其类间距离设置为无限大, 可以保证 2 个子区域被合并后不会存在孤立的节点。

### 2.3 聚类过程加速因子

$\delta$  被定义为每次聚合过程之后类间距离的最小值, 即在该次聚类过程中, 类间距离小于  $\delta$  的类对将同时被聚合, 避免传统 HAC 每次聚合过程只合并类间距离最小的 2 个类并需要重算类间距离所造成的时间大量消耗。 $\delta$  值在聚合迭代过程中需要不断更新以保证聚类过程合理, 本文将  $\delta$  值设置为上一次聚类过程完成后类间距离平均值的  $1/10$ 。

### 2.4 分区数目的自动确定

自动分区算法通过分析统计量  $F$  值随分区数目的变化来确定分区数目<sup>[11]</sup>。 $F$  值越大, 说明类间特征差异越明显, 分类越合理。但分类数目过多会导致子区域间数据通信量增大、系统收敛速度变慢等问题。根据经验, 分类数目不应超过  $\sqrt[3]{N}$  ( $N$  为节点数目)。所以目标分区数目应确定为  $\sqrt[3]{N}$  以下且  $F$  统计量值最大处所对应的分类数目。

### 2.5 基于 HAC 的智能配电网自动分区方法

基于 HAC 自动分区方法的详细流程如下:

a. 求取节点间等效电气距离作为节点特征;

b. 将电力系统中每个节点单独分为一类, 计算类间距离;

c. 初始化  $\delta$ ;

d. 查找所有类间距离小于  $\delta$  的类对, 若没有符合该条件的类对, 则选取类间距离最小的类对;

e. 依次检验每个类对是否电气连通, 若无联络线相连则设置该类对之间电气距离为无穷大, 若有

联络线相连则将其合并为一个新类;

f. 更新类间距离以及  $\delta$  值;

g. 重复步骤 d—f, 直到所有节点归并为一个类;

h. 分析  $F$  统计量, 确定目标分区数目, 获得相应分区结果。

### 3 智能配电网分布式并行电压优化方法

#### 3.1 区域解耦模型

智能配电网电压优化问题分解协调的基本思想是子区域内独立内层迭代优化计算, 子区域间通过边界信息互换进行外层迭代求取全局潮流, 然后交换区域信息并重新进行子区域内优化计算, 重复上述的内外层迭代过程直至全局优化收敛。现以 2 个区域为例说明外层迭代求取全局潮流的分解协调方法思想。如图 1 所示, 配电网 S 的 2 个子区域 A 和 B 通过联络线支路  $i-j$  互联, 在支路  $i-j$  中点处靠近变电站母线的一端引入一个虚拟负荷, 另一端引入一个虚拟发电机, 从而“断开联络线”。每一个引入的虚拟节点对应一组变量  $\mathbf{x}_{b1}, \mathbf{x}_{b2}$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{b1} &= \{P_{ab1}, Q_{ab1}, U_{ab1}, \theta_{ab1}\} \\ \mathbf{x}_{b2} &= \{P_{ab2}, Q_{ab2}, U_{ab2}, \theta_{ab2}\} \end{aligned} \quad (12)$$

边界约束可表示为:

$$\xi_1 \mathbf{x}_{b1} - \xi_2 \mathbf{x}_{b2} = 0 \quad (13)$$

其中,  $\xi_1 = \text{diag}(\mathbf{I}, \mathbf{I}, \mathbf{I}, \mathbf{I})$ ,  $\xi_2 = \text{diag}(-\mathbf{I}, -\mathbf{I}, \mathbf{I}, \mathbf{I})$ 。

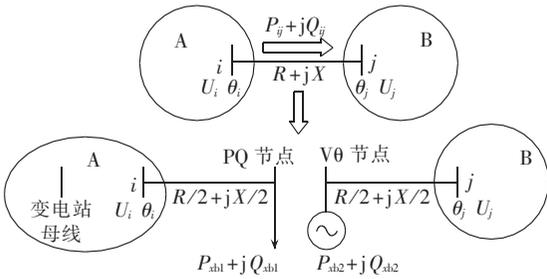


图 1 区域解耦模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of regional decoupling model

考虑到配电网的辐射型结构, 其全局潮流的分布式并行求解可描述为主从式问题<sup>[12]</sup>, 靠近变电站母线的区域为主区域, 其虚拟负荷节点为对应的虚拟发电机节点提供电压数据, 远离变电站母线的区域为从区域, 其虚拟发电机节点为虚拟负荷节点提供广义负荷的功率数据, 两者交换信息反复迭代直至收敛。在上述两分区配电系统中, 靠近变电站母线的区域 A 虚拟负荷节点应设置为 PQ 节点, 对应的区域 B 虚拟发电机节点应设置为 V0 节点。

#### 3.2 序列二次规划(SQP-DG)算法

本文提出的优化算法以增量形式描述控制变量 DG 出力对系统各状态变量的影响。假定  $DG_1 \in DG_A$ 、 $DG_2 \in DG_B$  分别于节点  $i, j$  处接入配电网, 其出力变

化增量可等效于在相应节点引入电流源, 可得电力网络的线性方程组:

$$\mathbf{Y} \Delta \mathbf{U}_N = \Delta \mathbf{I}_N \quad (14)$$

其中,  $\mathbf{Y}$  为节点导纳矩阵;  $\Delta \mathbf{U}_N$  为节点电压增量列向量;  $\Delta \mathbf{I}_N$  为节点注入电流增量列向量, 其非零元素位置对应接入 DG 的节点位置。

由节点电压增量列向量可得线路电流增量列向量:

$$\Delta \mathbf{I}_b = \text{diag}(\mathbf{Y}_b) \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{U}_N \quad (15)$$

其中,  $\mathbf{Y}_b$  为线路导纳列向量;  $\mathbf{A}$  为关联矩阵。

对于第  $k$  条支路, 其流经功率增量可表达为:

$$\Delta P_{bk} + j \Delta Q_{bk} = U_{bk} \cdot \Delta \mathbf{I}_{bk}^* \quad (16)$$

考虑到节点标幺电压始终保持在  $1 \angle 0^\circ$  附近, 联立式(14)—(16), 可得线路功率增量列向量:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{P}_b + j \Delta \mathbf{Q}_b &= \text{diag}(\mathbf{Y}_b^*) \mathbf{A}^T (\mathbf{Y}^{-1})^* \times \\ &\begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{2 \times N}^T \begin{bmatrix} \Delta P_{DG_i} + j \Delta Q_{DG_i} \\ \Delta P_{DG_j} + j \Delta Q_{DG_j} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

其中,  $\begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{2 \times N}^T$  非零元素分别对应接入 DG 的节点位置,  $N$  为节点数目。

由于 DG 的无功出力并非独立控制, 而是与其有功出力和网络参数有关, 现对 DG 出力增量  $\Delta P_{DG}$ 、 $\Delta Q_{DG}$  的关系进行讨论。

对于 PQ 型 DG, 考虑其恒功率特性, 存在  $\Delta Q_{DG} = M \Delta P_{DG}$ , 其中  $M = \text{diag}(\tan \theta)$ ,  $\theta$  为相应的功率因数角。

对于 PV 型 DG, 当其有功出力变化时, 无功出力会在其约束范围内做出调整使得节点电压幅值保持不变, 忽略节点电压虚部对幅值的影响, 有如下等式成立:

$$\mathbf{R} \Delta P_{DG} + \mathbf{X} \Delta Q_{DG} = 0 \quad (18)$$

$\mathbf{R}$  和  $\mathbf{X}$  分别为系统节点阻抗矩阵中 DG 接入节点对应行列的实部和虚部。定义矩阵  $\mathbf{M} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{X}$ , 则:

$$\Delta Q_{DG} = \mathbf{M} \Delta P_{DG} \quad (19)$$

故式(17)可用下式表达:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{P}_b = \mathbf{S}_P \times \Delta \mathbf{P}_{DG} \\ \Delta \mathbf{Q}_b = \mathbf{S}_Q \times \Delta \mathbf{P}_{DG} \end{cases} \quad (20)$$

其中,  $\mathbf{S}_P, \mathbf{S}_Q$  分别为线路流经有功、无功功率增量对于 DG 有功出力增量的灵敏度矩阵。

现将目标函数表述为增量形式:

$$\min F(\Delta \mathbf{P}_{DG}) = \sum_{k=1}^{N_b} \Delta P_{Lossk} - \omega \sum_{i=1}^{N_{DG}} \Delta P_{DG_i} \quad (21)$$

对于第  $k$  条支路, 存在有功线损增量形式:

$$\Delta P_{Lossk} = \frac{\Delta |S_{bk}|^2}{|U_{bk}|^2} R_{bk} \quad (22)$$

其中,  $R_{bk}$  为线路电阻, 且线路视在功率平方的增量可表示为:

$$\Delta |S_{bk}|^2 = 2 P_{bk} \Delta P_{bk} + 2 Q_{bk} \Delta Q_{bk} + \Delta P_{bk}^2 + \Delta Q_{bk}^2 \quad (23)$$

系统总的 DG 有功出力增量为:

$$\sum_{i=1}^{N_{DG}} \Delta P_{DG_i} = (1 \cdots 1)_{1 \times N_{DG}} \times \Delta P_{DG} \quad (24)$$

根据式(20)~(24),目标函数可表示为二次规划问题标准型:

$$\begin{aligned} \min F(\Delta P_{DG}) &= c \Delta P_{DG} + \Delta P_{DG}^T H \Delta P_{DG} \\ c &= (1 \cdots 1)_{1 \times N_b} \times \text{diag} \left( \frac{2P_b \cdot R_b}{|U_b|^2} \right) \times S_p + (1 \cdots 1)_{1 \times N_b} \times \\ &\quad \text{diag} \left( \frac{2Q_b \cdot R_b}{|U_b|^2} \right) \times S_Q - \omega \times (1 \cdots 1)_{1 \times N_{DG}} \\ H &= S_p^T \times \text{diag} \left( \frac{2P_b \cdot R_b}{|U_b|^2} \right) \times S_p + S_Q^T \times \text{diag} \left( \frac{2Q_b \cdot R_b}{|U_b|^2} \right) \times S_Q \end{aligned} \quad (25)$$

考虑线路功率极限值约束,将第  $k$  条线路视在功率约束不等式表示为增量形式:

$$\Delta |S_{lk}|^2 < \Delta |S_{lk}^{\max}|^2 = |S_{lk}^{\max}|^2 - |S_{lk}|^2 \quad (26)$$

其中,  $|S_{lk}^{\max}|$  为线路  $k$  视在功率的最大值;  $|S_{lk}|$  为当前线路视在功率。

将式(23)省略二次项,代入式(26),并表示为列向量形式:

$$[\text{diag}(2P_b) \times S_p + \text{diag}(2Q_b) \times S_Q] \Delta P_{DG} < \Delta |S_{lk}^{\max}|^2 \quad (27)$$

节点电压、DG 最大出力等约束也可以方便地表示为控制变量的线性不等式。综上,含 DG 接入的配电网电压优化模型可描述为:

$$\begin{aligned} \min F(\Delta P_{DG}) &= c \Delta P_{DG} + \Delta P_{DG}^T H \Delta P_{DG} \\ \text{s.t. } W \Delta P_{DG} &\leq b \end{aligned} \quad (28)$$

其中,  $W$ 、 $b$  为不等式约束确定的矩阵。

如上所述,OPF 问题转换一个二次规划的问题,控制变量仅为 DG 的有功出力,其数目远小于系统节点数目,且约束条件中不存在潮流等式约束,保证了求解过程快速收敛。根据求解的 DG 增量结果调整出力,重算潮流并形成新的二次规划问题,重复上述二次规划问题求解过程,直至 DG 增量满足收敛条件。以上迭代过程即为子区域内优化 DG 出力所使用的 SQP-DG 算法。

### 3.3 DSQP-DG 算法

本文提出的 DSQP-DG 算法通过内外层异步迭代实现优化问题的分布式并行求解。内层迭代是子区域利用上节所述的 SQP-DG 算法求解区域内 DG 的最优出力,外层迭代是根据内层求解得到的 DG 出力,通过边界节点信息的互换求解全局潮流。外层迭代之后,各子区域根据当前潮流信息确定本区域有功线损增量对于其他区域各 DG 出力增量的灵敏度矩阵,并将其传递给相应 DG 所在区域用于该区域的内层 SQP-DG 算法求解。重复上述内外层迭代及数据传递过程,直至各 DG 出力满足收敛要求。

以两分区配电网为例,简述 DSQP-DG 算法计算步骤:

- a. 初始化各 DG 出力为 0,并设外层迭代计数  $j=1$ ;
- b. 利用 HAC 自动分区算法获取分区方案;
- c. 执行分区及网络等效;
- d. 在当前 DG 出力情况下,求解区域内潮流;
- e. 判断外层收敛条件  $|\xi_1 x_{b1} - \xi_2 x_{b2}| \leq \varepsilon_{ex}$  是否满足,若满足则转至步骤 g,否则转至步骤 f;
- f. 区域间交换对应边界向量,并转至步骤 d;
- g. 更新并传递各区域有功线损增量对区域外 DG 出力增量的灵敏度矩阵;
- h. 子区域更新目标函数及约束方程表达式;
- i. 子区域求解二次规划问题,更新 DG 出力,  $k=k+1$ ;
- j. 子区域判断内层收敛条件  $\Delta P_{DG} \leq \varepsilon_{in}$  是否满足,若满足则转至步骤 l,否则转至步骤 k;
- k. 子区域求解当前 DG 出力情况下的区域内潮流,并转至步骤 h;
- l. 判断  $\max \left( \left[ \begin{array}{c} DG_A^{(k+1)} \\ DG_B^{(k+1)} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} DG_A^{(k)} \\ DG_B^{(k)} \end{array} \right] \right) \leq \varepsilon_{DG}$  这一全局 DG 出力的收敛条件是否满足,若满足则优化求解结束,否则令  $j=j+1$  并转至步骤 d。

## 4 算例分析与比较

### 4.1 实验建立

为验证本文所提方法的可行性,对接入 DG 的 IEEE 33 节点系统算例进行电压优化。利用 MATLAB 编写程序,运行环境为 Intel i5-3210M 2.5 GHz 处理器,4 GB RAM。如图 2 所示,节点 0 为平衡节点,在节点 15 和 32 处接入 2 个 PQ 型 DG,其参数如表 1 所示。

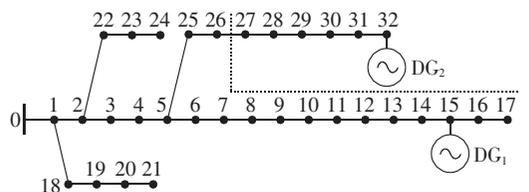


图 2 IEEE 33 节点系统及分区示意图

Fig.2 IEEE 33-bus system and its partition

表 1 DG<sub>1</sub>、DG<sub>2</sub> 参数

Table 1 Parameters of DG<sub>1</sub> and DG<sub>2</sub>

DG	有功出力范围/MW	无功出力范围/MW	接入节点电压幅值	功率因数
DG <sub>1</sub>	0~5	0~5	0.9~1.1 p.u.	0.95
DG <sub>2</sub>	0~5	0~5	0.9~1.1 p.u.	0.95

### 4.2 自动分区算法的比较

模糊聚类 FC(Fuzzy Clustering)是另一种广泛使用的依据对象特征进行聚类的算法<sup>[14-15]</sup>。利用统计量  $F$  来表征分区的合理程度,比较相同数目下 HAC 和 FC 算法分区结果  $F$  值,如图 3 所示,可得分区数目较小时两者持平,分区数目较大时 HAC 分区算法

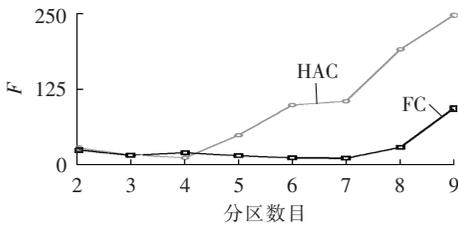


图 3 HAC 与 FC 分区结果  $F$  值  
Fig.3 Comparison of partitioning index  $F$  between HAC and FC

明显优于 FC 算法。故 HAC 分区算法更适合应用于分区数目较多的情况,其优越性在规模较大的配电系统中更为突出。

### 4.3 优化结果

根据自动分区算法,在分区数目小于  $\sqrt[3]{33}$  的前提下,选择  $F$  值较大处对应的分区数目,可得 IEEE 33 节点系统被分割为 2 个区域,具体的分区方案如图 2 中虚线所示。设置内外层迭代收敛精度均为  $\varepsilon=10^{-3}$ ,惩罚因子  $\omega=0.1$ ,得到:  $DG_1$  有功出力 1.449 MW,无功出力 0.483 MW;  $DG_2$  有功出力 2.111 MW,无功出力 0.692 MW。

DG 的接入改变了系统潮流,其对节点电压幅值(标幺值)的影响如图 4 所示。

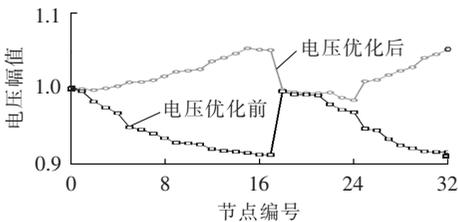


图 4 IEEE 33 节点系统电压幅值  
Fig.4 Nodal voltage amplitudes of IEEE 33-bus system

由图 4 可见,电压优化前节点电压幅值随着远离变电站母线而依次下降,电压优化后 DG 接入节点附近线路出现反向潮流,各节点电压幅值维持在 1 p.u. 附近,系统电压质量显著提升。电压优化前、后有功线损分别为 0.203 MW、0.134 MW,数值明显降低。

### 4.4 收敛精度对算法收敛性能的影响

本文算法内外层迭代可使用相同的收敛精度,现分别将其设置为  $10^{-2}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$  和  $10^{-5}$ ,研究不同收敛精度对算法收敛性能的影响。一次外层迭代收敛后,各子区域进行一次 SQP-DG 求解,重复上述过程直至全局优化收敛。如表 2 所示,收敛精度每提高 10 倍,SQP-DG 次数基本以某常数递增,与此同时,内、外层迭代总数皆以小于 1 倍数目增长,且各子区域内层迭代 QP 总次数相近。说明算法各收敛精度下皆有较好的收敛性能,且各子区域运算量相近,并行计算可有效提高计算效率。

表 2 不同收敛精度下迭代次数  
Table 2 Iteration turns for different convergence precisions

收敛精度	SQP-DG 次数	外层迭代总数	内层迭代 QP 总次数	
			子区域 1	子区域 2
$10^{-2}$	7	13	11	8
$10^{-3}$	12	31	23	20
$10^{-4}$	17	48	40	35
$10^{-5}$	23	75	65	53

### 4.5 惩罚系数对算法的影响

惩罚系数  $\omega$  对优化结果的影响如表 3 所示。DG 出力随惩罚系数升高而增加,这是在目标函数中 DG 有功出力最大所占权重逐渐升高导致的必然结果。随着 DG 出力升高,系统潮流逆向流动增强,导致有功线损随之增加。值得说明的是,当  $\omega=0$  时,目标函数相当于只考虑有功线损最小,而当  $\omega \geq 0.2$  时,接入 DG 处节点电压幅值将达到上限。

表 3 不同惩罚系数下优化结果  
Table 3 Optimization results for different penalty coefficients

惩罚系数	$DG_1$ 有功出力/MW	$DG_2$ 有功出力/MW	有功线损/MW
0	0.804	1.124	0.056
0.1	1.449	2.111	0.134
0.15	1.808	2.667	0.236
0.2	2.033	3.038	0.321

### 4.6 DSQP-DG 与 APP 算法的比较

辅助问题原理 APP(Auxiliary Principle Problem) 算法在目标函数可分解的前提下,通过引入辅助问题来并行求解增广拉格朗日函数最小值问题。本文对 DSQP-DG 与 APP 算法进行比较。IEEE 33 节点系统分区方案如图 2 所示,分别在收敛精度为  $10^{-3}$  和  $10^{-4}$  的条件下,以系统有功线损最小为优化目标,使用 DSQP-DG 与 APP 算法进行优化求解。DSQP-DG 算法中  $\omega=0$ ,APP 算法中相关参数设置为  $\beta=1.75$ 、 $c=0.85$  及  $\varepsilon=0.85$ 。优化结果如表 4 所示。

表 4 DSQP-DG 与 APP 优化结果  
Table 4 Optimization results of DSQP-DG and APP

算法	收敛精度	$DG_1$ 有功出力/MW	$DG_2$ 有功出力/MW	有功线损/MW	内层迭代收敛次数
DSQP-DG	$10^{-3}$	0.804	1.124	0.0564	12
	$10^{-4}$	0.805	1.123	0.0564	17
APP	$10^{-3}$	1.019	1.257	0.0603	46
	$10^{-4}$	0.939	1.230	0.0581	97

和 APP 算法结果相比,DSQP-DG 算法有功线损和内层迭代收敛次数都更为可观,说明其可在更好的收敛性能下获得更精确的最优解,而 APP 算法收敛性能和优化结果受收敛精度影响较大,其最优解易陷入局部最优。可见,本文提出的 DSQP-DG 算法具有更好的寻优能力和快速性。

## 5 结论

本文形成了智能配电网自动分区方案,建立了针对配电网拓扑结构的分解协调模型,采用增量表达式描述智能配电网电压优化模型,并提出了 DSQP-DG 算法用于并行求解 DG 最优出力。通过优化前后节点电压变化情况以及本方法与其他并行求解方法优化结果的对比,证明所提出的 DSQP-DG 方法可显著改善系统电压质量、减少发电成本及网络有功损耗。所提方法具有如下优点:

a. 提出的分区算法利用节点电气特征自动分区,过程快速合理;

b. 提出的分解协调模型有效针对配电网结构特点,简便易行;

c. 提出的优化算法控制变量仅为 DG 有功、无功出力增量,有效提高优化求解速度;

d. 采用分布式并行处理机制,通过区域间少量信息交换,各子区域可实现分布式并行求解且保证求解精度。

将所提方法在 IEEE 33 节点系统上进行了验证。对于分区算法,电网规模越大则加速计算的效果越明显。而对于网络规模较小的电网,由于各分区之间的交互增加了计算量,分区算法对于提高速度的优势体现较弱。此外,本文提出方法由于对复杂连接的收敛性稍差,故对于网格状电网的分布式并行优化计算适用性较低。仿真结果表明,该方法可用于大规模配电网电压优化,在电力系统中有着良好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 王成山,李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):10-14.  
WANG Chengshan,LI Peng. Development and challenges of distributed generation,the micro-grid and smart distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(2):10-14.
- [2] LIU Keyan,SHENG Wanxing,SHENG Cheng,et al. A trust region SQP method for coordinated voltage control in smart distribution grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2016,7(1):381-391.
- [3] 王成山,陈恺,谢莹华,等. 配电网扩展规划中分布式电源的选址和定容[J]. 电力系统自动化,2006,30(3):38-43.  
WANG Chengshan,CHEN Kai,XIE Yinghua,et al. Siting and sizing of distributed generation in distribution network expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(3):38-43.
- [4] 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.
- [5] 付丽伟,王守相,张永武,等. 多类型分布式电源在配电网中的优化配置[J]. 电网技术,2012,36(1):79-84.  
FU Liwei,WANG Shouxiang,ZHANG Yongwu,et al. Optimal selection and configuration of multi-types of distributed generators in distributed network [J]. Power System Technology,2012,36(1):79-84.
- [6] 方斯顿,程浩忠,徐国栋,等. 随机最优潮流及其应用的研究综述[J]. 电力自动化设备,2016,36(11):1-10.  
FANG Sidun,CHENG Haozhong,XU Guodong,et al. Reviews on stochastic optimal power flow and its application [J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(11):1-10.
- [7] 王斌,夏叶,夏清,等. 基于 Benders 分解法的交直流互联电网安全约束经济调度[J]. 中国电机工程学报,2016,36(6):1588-1595.  
WANG Bin,XIA Ye,XIA Qing,et al. Security-constrained economic dispatch with AC/DC interconnection system based on Benders decomposition method [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(6):1588-1595.
- [8] LIU Keyan,LI Yunhua,SHENG Wanxing. The decomposition and computation method for distributed optimal power flow based on Message Passing Interface(MPI)[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2011,33(5):1185-1193.
- [9] 孙国强,任宾,卫志农,等. 基于自适应加权预测-校正内点法的含 VSC-HVDC 电力系统最优潮流[J]. 电力自动化设备,2015,35(3):54-59.  
SUN Guoqiang,REN Bin,WEI Zhinong,et al. Optimal power flow of power system with VSC-HVDC based on AWPC-IPM [J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(3):54-59.
- [10] DAVIDSON I,RAVI S S. Agglomerative hierarchical clustering with constraints:theoretical and empirical results[C]//Knowledge Discovery in Databases:PKDD 2005. Heidelberg,Germany: Springer,2005:59-70.
- [11] 刘科研. 复杂有源配电网优化与分析关键技术研究[D]. 北京:中国电力科学研究院,2014.  
LIU Keyan. The optimization technology and computation analysis research in active distribution network [D]. Beijing:China Electric Power Research Institute,2014.
- [12] WANG Chunheng,FU Yong. Fully parallel stochastic security-constrained unit commitment [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2016,31(5):3561-3571.
- [13] KANG D,GOKARAJU R. A new method for blocking third-zone distance relays during stable power swings [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2016,31(4):1836-1843.
- [14] 徐芮,刘俊勇,刘友波,等. 考虑负荷聚类分区与分布式发电接入的配电网主次网架规划方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):48-55.  
XU Rui,LIU Junyong,LIU Youbo,et al. Primary and subordinate distribution network planning considering load clustering partition and DG integration [J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):48-55.
- [15] WANG Yurong,LI Fangxing,WAN Qiulan,et al. Reactive power planning based on fuzzy clustering,gray code,and simulated annealing [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(4):2246-2255.

## 作者简介:



孙智卿

孙智卿(1986—),男,河北石家庄人,博士研究生,研究方向为电力需求侧管理、智能用电技术(E-mail:sunzq@tju.edu.cn);

刘永梅(1978—),女,山东济宁人,高级工程师,主要研究方向为配电网建模与运行分析、保护(E-mail:liuympri@163.com);

刘科研(1978—),男,高级工程师,博士,主要研究方向为配电网运行控制技术(E-mail:

liukeyan@epri.sgcc.com.cn)。

(下转第 178 页 continued on page 178)

signal reconstruction[C]//IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies. Tianjin, China;IEEE,2012:1-5.

[17] 王彭,周峰,黄震宇,等. 基于时域准同步的谐波和间谐波检测算法[J]. 仪器仪表学报,2013,34(2):275-280.

WANG Peng,ZHOU Feng,HUANG Zhenyu,et al. Harmonic and interharmonic detection algorithm based on time-domain quasi-synchronous technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2013,34(2):275-280.

[18] IEEE recommended practice for monitoring electric power quality: IEEE Std. 1159-1995[S]. [S.L.];IEEE,1995.

[19] WEN He,DAI Huifang,TENG Zhaosheng,et al. Performance comparison of windowed interpolation FFT and quasisynchronous sampling algorithm for frequency estimation[J]. Mathematical Problems in Engineering,2014,2014:1-7.

作者简介:



李 宁

李 宁(1968—),男,新疆乌鲁木齐人,工程师,从事电测技术研究;

左培丽(1990—),女,新疆鄯善人,硕士研究生,从事电测技术研究;

王新刚(1970—),男,新疆乌鲁木齐人,工程师,从事电测技术研究;

唐 求(1970—),女,湖南长沙人,副教授,博士研究生导师,博士,从事电测技术研究;

滕召胜(1963—),男,湖南辰溪人,教授,博士研究生导师,博士,从事电测技术研究;

陈 桃(1964—),女,湖南长沙人,硕士,通信作者,从事电测技术研究(E-mail:gracechen2000ca@yahoo.com)。

## Inter-harmonic detection based on improved DFT and time-domain quasi-synchronization

LI Ning<sup>1</sup>,ZUO Peili<sup>2</sup>,WANG Xingang<sup>1</sup>,TANG Qiu<sup>2</sup>,TENG Zhaosheng<sup>2</sup>,CHEN Tao<sup>2</sup>

(1. State Grid Electric Power Research Institute of Xinjiang Electric Power Company,Urumqi 830011,China;

2. College of Electrical and Information Engineering,Hunan University,Changsha 410082,China)

**Abstract:** The spectrum interference between harmonic and inter-harmonic due to the spectrum leakage and fence effect occurred in the FFT(Fast Fourier Transform) under asynchronous sampling condition may seriously affect the measuring accuracy of inter-harmonic parameters,aiming at which,an inter-harmonic detection algorithm based on improved DFT(Discrete Fourier Transform) and time-domain quasi-synchronization is proposed. It adopts the improved DFT algorithm to accurately estimate the fundamental frequency,uses the cubic spline interpolation to reconstruct the quasi-synchronous sampling sequence,applies the FFT to process the reconstructed quasi-synchronous sampling sequence for one cycle to obtain all parameters of fundamental and harmonics,subtracts the fundamental and harmonic components from the reconstructed quasi-synchronous sampling sequence,and applies the FFT again,together with the maximum peak search,to process the remaining sequence for determining the parameters of each inter-harmonic. Simulative results show that,the proposed algorithm not only improves the frequency resolution but also effectively eliminates the spectrum interference between harmonic and inter-harmonic. It has high inter-harmonic detection accuracy,good stability and small calculating load.

**Key words:** spectrum interference; improved DFT; time-domain quasi-synchronization; inter-harmonic detection; peak search; harmonic analysis

(上接第 152 页 continued from page 152)

## Distributed and parallel voltage optimization of smart distribution network

SUN Zhiqing<sup>1,2</sup>,LIU Yongmei<sup>2</sup>,LIU Keyan<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education,Tianjin University,Tianjin 300072,China;

2. China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China)

**Abstract:** In order to meet the requirements of smart distribution network for the grid-connection of DG (Distributed Generation) and the real-time response of grid simulation,a method is proposed to determine the optimal power output of each DG for the fast and effective voltage optimization of distribution network in the distributed and parallel environment,which applies the method of hierarchical agglomerative clustering to automatically partition the distribution network and then the algorithm of distributed sequential quadratic programming for DG to obtain in parallel the optimal outputs of DGs by the alternative internal and external iterations. IEEE 33-bus system with DGs is taken to test and verify the proposed method. Compared with the method of auxiliary problem principle,the proposed method has better performance and rapidity in the distributed and parallel voltage optimization of smart distribution network.

**Key words:** smart distribution network; distributed generation; voltage optimization; hierarchical agglomerative clustering; distributed sequential quadratic programming for DG