

一种低压微电网中的分布式电压控制算法

殷桂梁, 侯嘉怡

(燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为了实现电压调节和提高供电能力, 提出了一种在低压微电网中利用分布式电源(Distributed Generators, DGs)发出的有功来进行电压控制的分布式电压算法。针对低压微电网的线路阻抗特性, 分析了电压和有功的关系。由系统线路结构建立通信链路, 并对电压超出上下限的母线初始化, 计算出所需补偿的有功功率。基于本地信息, 利用参数化状态转移矩阵对电压进行修正, 并考虑了分布式电源的有功容量限制。通过该算法协调和分配各分布式电源所需承担的功率, 共同作用实现电压控制。仿真结果表明该算法能够有效实现电压调节和减小电压偏差, 提高电压质量。

关键词: 分布式电源; 微电网; 电压控制; 有功功率; 分布式算法

A distributed voltage control algorithm in the low voltage microgrid

YIN Gui-liang, HOU Jia-yi

(School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: To achieve voltage control and improve the power supply capacity, a distributed algorithm for voltage control in the microgrid is proposed with active power injections provided by DGs. First, for the property of line impedance in the low voltage microgrid, the relationship between voltage and active power is analyzed. Then, a communication link is established according to the system structure, and the bus voltage that exceeds the upper and lower limit is initiated by computing the active power needed. Based on the local information, the bus voltage is corrected by a parametric state transition matrix with the consideration of active power capacity limits. Eventually, the active power of DGs is coordinated and distributed through the algorithm to achieve voltage control collectively. Simulation results show that the proposed algorithm can effectively achieve voltage control and decrease voltage deviation, so as to improve the voltage quality.

Key words: distributed generators; microgrid; voltage control; active power; distributed algorithm

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)20-0075-06

0 引言

在微电网环境下, 系统对电网电压的调节、控制能力要求越来越高。并网运行方式下, 分布式电源除了发出有功功率, 还能以局部电压支撑的形式提供辅助服务^[1-2]。由于低压微电网传输线路的电阻较大, 传统的电压和无功的关系不再适用, 母线电压受有功功率的影响更大。考虑到在大电网有功输出比较充裕的情况下, 系统对于分布式电源有功功率的输出要求不是十分迫切, 而且分布式电源可以通过 PQ 控制具备一定的有功调节能力^[3-4], 因此可以利用分布式电源发出的有功来进行电压控制, 提高供电能力。微网中单个分布式电源的容量很小, 调节能力也比较有限, 但多个和多种分布式电源接入微电网可以互为冗余, 通过适当的协调控制实现

优势互补, 为电网提供电压支持, 克服分布式电源出力不稳而造成的电压波动, 提高供电可靠性^[5]。

分布式电源之间的协调控制分为集中控制策略^[6-7]和分布式控制策略^[2,8-11]。分布式控制策略中, 每个分布式电源可以和附近的几个分布式电源进行信息交换, 并基于这些信息做出本地控制决策。

文献[2]提出了一种基于图论的分布式算法, 将每个分布式电源看作一个节点, 用拓扑图表示分布式电源之间的连接关系, 通过一种分布式算法实现各分布式电源的功率分配, 为电网提供某种辅助服务。文献[8]介绍了三种分布式算法, 实现分布式电源的协调控制和功率分配。三种算法中, 各节点值收敛到一个区间, 满足节点容量的上下限要求。通过对算法中状态转移矩阵的修改, 加快了收敛速度。文献[9]将分布式算法和协调控制器结合, 利用分布

式算法计算出电压波动时各分布式电源所需输出的无功功率,实现微电网的电压调节。但是该方法并没有考虑到各节点的分布式电源的容量限制问题。文献[10]提出了一种自适应分布式控制算法,根据当前电压值不断协调改变分布式电源的无功输出来调节电压。其研究对象是辐射状微电网,该方法考虑了辐射状电网的电压降落,但是没有考虑分布式电源的有功功率对电压的影响。文献[11]提出了一种两阶段的分布式电压控制结构,第一阶段根据母线电压敏感度计算出各节点所需的无功功率,如自身节点可以提供所需功率的大小,则不需要进行第二阶段;如所需无功功率超出或低于自身节点所能提供的无功功率上下限,则需要进行第二阶段,根据分布式算法,由其他节点共同提供额外的无功功率。同样该方法也没有考虑分布式电源的有功功率对电压的影响。

智能微电网多为低压配电网结构,线路的阻抗与电抗之比 R/X 很大,这意味着有功功率的变化对母线电压影响更大^[12-13]。在有分布式电源并网的智能微电网中,当大电网输出的有功功率相对于负荷而言比较充裕时,分布式电源可以不必总是输出最大有功功率,可以利用对分布式电源所发有功功率增加或减少的控制^[14],进行电压波动的调节。

因此,本文在上述文献的基础上,提出一种基于图论的分布式电源有功控制的分布式算法,当某条母线上的电压出现波动,超出其规定的上限或下限值时,通过该分布式算法,估算出所需的有功功率,在含分布式电源的相邻母线之间进行通信和功率分配,由相邻母线上的分布式电源共同提供所需功率,从而实现电压控制。

1 低压微电网中有功和电压的关系

电力系统中,功率变化对于母线电压和相角的变化关系如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ K & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (1)$$

以本文讨论的 380 V 等级的低压微电网为例,目前我国配电网的输电线路的 R/X 约为 5 至几十,远远大于 110 kV 以上电压等级的输电线路的 R/X (一般小于 1),因此功率对电压的影响也不同于传统大电网。根据文献[13]中推导的低压配电网中电压和功率的关系:电压变化主要与有功功率有关,而无功功率则影响相角的变化,式(1)可以解耦为

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial U} \Delta U \quad (2)$$

$$\Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial \theta} \Delta \theta \quad (3)$$

因此本文主要采用分布式电源发出的有功功率对各母线电压进行调节,使其满足 $\underline{U} \leq U_i \leq \bar{U}$ 。当电压高于上限值 \bar{U} 时,通过减少 DGs 的有功出力(即 $\Delta P[k] < 0$),采用分布式算法对功率进行协调控制来降低节点电压,称为过电压算法;同样,当电压低于其下限值 \underline{U} 时,通过增加 DGs 的有功出力(即 $\Delta P[k] > 0$)来提高节点电压,称为欠电压算法。

2 分布式电压算法

假定一个微电网系统除馈线外有 n 条母线,分布式算法实现的是各母线上的分布式电源的功率增量 $\Delta P_i[k]$ 在各节点之间的分配过程(若某条母线上不含分布式电源,则 $\Delta P_i[k] = 0$)。

$$\Delta P[k+1] = \mathbf{T}[k] \cdot \Delta P[k] \quad (4)$$

其中: k 为迭代次数; $\Delta P[k]$ 为 $n \times 1$ 阶列向量; $\mathbf{T}[k]$ 为表示 DGs 之间通信关系的 $n \times n$ 阶参数化状态转移矩阵,具体构建形式见 2.1 节。算法收敛的必要条件为 $\mathbf{T}[k]$ 为列随机和本原矩阵,关于分布式算法解的证明见文献[2]。该算法的核心是通过对 $\mathbf{T}[k]$ 的修改,使功率分配结果满足电压和 DGs 的容量限制要求。系统在时间间隔 r 进行一次完整的分布式算法,令其在 r 和 $r+1$ 之间规定的 k_0 次迭代内收敛。在时间间隔 $(r, r+1)$ 内,前 $k_0/2$ 次不考虑 DGs 的容量限制,计算功率分配来调节电压,后 $k_0/2$ 次迭代修改功率分配结果以满足 DGs 的容量限制。

2.1 通信结构的建立

根据微电网系统建立算法所需的通信结构图,将各系统母线视为一个节点,母线之间的通信链路定义为连接节点的有向边。算法所需的通信图必须是强连通的,我们可以假设母线之间的通信通过电力线路来实现,这样建立的通信图与系统的电网结构是一致的,且为双向通信。这样各节点只在相邻节点之间进行通信,不需要知道整个网络的信息,实现了分布式控制策略的分布性。如果某条母线上接有 DGs,可以提供用于电压调节的有功功率,则该节点包含自循环,否则,则不含自循环。图的边权重用电压-有功敏感度矩阵 $\overline{SEN}_p = \partial P / \partial U$ 来表示,并构建状态转移矩阵 $\mathbf{T}[k]$ 。该分布式算法保证在相邻节点之间交换信息,且稳态解将会收敛到预期的区域周围。由于是分布式控制策略,因此各节点只知道与其直接相连的节点的敏感度矩阵,因此对敏感度矩阵进行修改:

(1) 对于节点上含 DGs 的节点

$$\overline{SEN}_{P,ji} = \begin{cases} \overline{SEN}_{P,ji} & i \in \{N_j \cup j\} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad \forall j \quad (5)$$

(2) 对于节点上不含 DGs 的节点

$$\overline{SEN}_{P,ji} = \begin{cases} \overline{SEN}_{P,ji} & i \in \{N_j\} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad \forall j \quad (6)$$

其中, N_j 表示与节点 j 直接相连的节点集。算法若要收敛, 状态转移矩阵 $\mathbf{T}[k]$ 必须为列随机矩阵, 因此状态转移矩阵的初值 \mathbf{T}_0 的项为

$$T_{ij} = \frac{\overline{SEN}_{P,ji}}{\sum_{i \in \{N_j \cup j\}} \overline{SEN}_{P,ji}} \quad \forall j \quad (7)$$

后面要用到的对角项为零的列随机矩阵 $\bar{\mathbf{T}}$ 为

$$\bar{T}_{ij} = \begin{cases} \frac{\overline{SEN}_{P,ji}}{\sum_{i \in N_j} \overline{SEN}_{P,ji}} & i \neq j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad \forall j \quad (8)$$

2.2 初始化

在每个时刻 r 对系统进行一次潮流计算, 得到各节点电压。当节点电压大于 \bar{U} 时, 估算出使电压恢复到低于 \bar{U} 所需的有功功率。假设节点和相邻母线具有相似的运行条件, 因此, 在初始化过程中可以引入一定的近似假设。

对于含 DGs 的节点上发生过电压时, 需要减少 DGs 发出的有功功率来降低电压, $\Delta P_j^r[0]$ 为需要减少的功率的估计量。

$$\Delta P_j^r[0] = \begin{cases} \frac{\bar{U}_j - U_j^r}{\overline{SEN}_{P,ji} n_j} & U_j^r > \bar{U}_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad \forall j \quad (9)$$

其中, n_j 表示节点 j 及与节点 j 直接相连的节点数。由式(6)可知, 当某个节点不含 DGs 时, $\overline{SEN}_{P,ji} = 0$, 上式初始化公式不再适用, 那么采用该节点与其相邻节点的敏感度 $\overline{SEN}_{P,ji}$ 来代替。所以对于不含 DGs 的节点, 过电压初始化为

$$\Delta P_j^r[0] = \begin{cases} \frac{\bar{U}_j - U_j^r}{\overline{SEN}_{P,ji} n_j} & U_j^r > \bar{U}_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad \forall j \quad (10)$$

同样对于欠电压算法, 有

$$\Delta P_j^r[0] = \begin{cases} \frac{U_j - U_j^r}{\overline{SEN}_{P,ji} n_j} & U_j^r < \underline{U}_j, \text{节点}j\text{上有DG} \\ \frac{U_j - U_j^r}{\overline{SEN}_{P,ji} n_j} & U_j^r < \underline{U}_j, \text{节点}j\text{上没有DG} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

2.3 电压分布式控制算法

自适应参数化状态转移矩阵的更新过程为

$$\mathbf{T}[k+1] = \bar{\mathbf{T}}\mathbf{D}[k+1] + (\mathbf{I} - \mathbf{D}[k+1]) \quad (12)$$

其中: $\mathbf{D}[k] = \text{diag}(\delta_1[k], \delta_2[k], \dots, \delta_n[k])$ 为参数化对角阵, $\delta_j[k]$ 满足 $0 < \delta_j[k] \leq 1$; 初始值 $\mathbf{T}[0] = \mathbf{T}_0$; $\mathbf{D}[0] = \mathbf{I} - \mathbf{T}_0$, \mathbf{I} 为 n 阶对角阵。

该算法根据母线电压的估计值和 DGs 的有功容量限制, 调整 $\delta_j[k]$ 的值, 进而调整状态转移矩阵, 使解满足要求。 $\delta_j[k]$ 的值决定了节点 j 处的 DGs 有功出力是增加还是减少。对于过电压算法来说:

当 $\delta_j[k+1] < \delta_j[k]$ 时, 节点 j 将减少有功出力;

当 $\delta_j[k+1] > \delta_j[k]$ 时, 节点 j 将增加有功出力。

对于欠电压算法来说:

当 $\delta_j[k+1] < \delta_j[k]$ 时, 节点 j 将增加有功出力;

当 $\delta_j[k+1] > \delta_j[k]$ 时, 节点 j 将减少有功出力。

2.3.1 节点电压标准

设 U_j^r 为在时刻 r 潮流计算出的母线 j 的电压值, 为准确值。时刻 $r+1$ 的母线电压可近似为

$$U_j^{r+1} = U_j^r + \Delta U_j^r = U_j^r + \sum_i \frac{\partial U_j}{\partial P_i} \Delta P_i \quad (13)$$

分布式控制策略中每个节点只知道与其直接相连的节点的敏感度矩阵, 电压比定义为

$$\rho_j[k] = \frac{U_j^r + \Delta U_j^r}{U_j^{\text{nom}}} \approx \frac{U_j^r + \sum_{i \in \{N_j \cup j\}} \frac{\partial U_j}{\partial P_i} \Delta P_i[k]}{U_j^{\text{nom}}} \quad (14)$$

其中, $U_j^{\text{nom}} = 1$ p.u. 为给定的电压额定值。

对于过电压算法, 如果节点 j 电压偏高, 则 $\rho_j[k] > 1$, 节点 j 需要通过减少 $\delta_j[k]$ 的值来减少有功出力, 进而降低电压; 否则, 节点 j 将增加 $\delta_j[k]$ 的值来增加有功出力, 进而提高电压。因此, $\delta_j[k+1]$ 的更新规则如式(15)所示。

$$\delta_j[k+1] = \begin{cases} \delta_j[k] \frac{1}{\rho_j[k]} & \rho_j[k] > 1 \\ 1 - (1 - \delta_j[k]) \rho_j[k] & \rho_j[k] \leq 1 \end{cases} \quad (15)$$

对于欠电压算法, 如果节点 j 电压偏低, 则 $\rho_j[k] \leq 1$, 通过减少 $\delta_j[k]$ 的值来增加有功出力; 如果节点 j 电压偏高, 则 $\rho_j[k] > 1$, 通过增加 $\delta_j[k]$ 的值减少有功出力。因此, $\delta_j[k+1]$ 的更新规则如式(16)所示。

$$\delta_j[k+1] = \begin{cases} \delta_j[k] \rho_j[k] & \rho_j[k] \leq 1 \\ 1 - (1 - \delta_j[k]) \frac{1}{\rho_j[k]} & \rho_j[k] > 1 \end{cases} \quad (16)$$

2.3.2 考虑 DGs 的容量限制

设 P_j^{\min} 和 P_j^{\max} 分别为节点 j 上所接 DGs 容量

的下限和上限, P_j^{net} 为节点 j 上的 DGs 在时刻 r 之前发出的有功功率, $P_{j,0}$ 为未进行分布式算法之前节点 j 上的 DGs 向系统发出的有功功率。对于过电压算法, 需要满足关系 $P_j^{\text{net}} + \Delta P_j[k] \geq P_j^{\text{min}}$, 其中, P_j^{net} 可能的取值范围为 $[P_j^{\text{min}}, P_j^{\text{max}}]$ 。如果前 $k_0/2$ 次迭代求出的解满足容量限制, 则不需要对 $T[k]$ 进行修改, 否则, 需要进行如下修改。分如图 1 三种情况讨论。

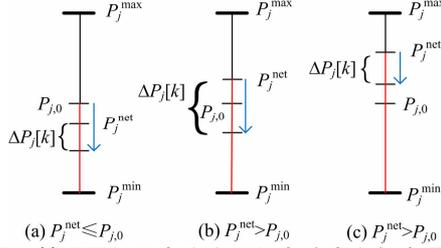


图 1 不同情况下的分布式电源的有功出力与容量的关系
Fig. 1 Relations of the active power output and capacities under different scenarios

$$\overline{\Delta P}_j[k] = \begin{cases} \Delta P_j[k] + (P_j^{\text{net}} - P_{j,0}) & P_j^{\text{net}} \leq P_{j,0} \\ \Delta P_j[k] & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

$$\overline{\Delta P}_j^{\text{max}}[k] = \begin{cases} P_j^{\text{min}} - P_j^{\text{net}} & P_j^{\text{net}} > P_{j,0} \\ P_j^{\text{min}} - P_{j,0} & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

$$\text{容量比定义为 } \rho_j[k] = \frac{\overline{\Delta P}_j[k]}{\overline{\Delta P}_j^{\text{max}}[k]} \quad (19)$$

由于分布式算法需要非负的状态转移矩阵, 考虑不同组合情况, 是为了保证 $\rho_j[k] > 0$, 从而保证算法的收敛性。根据容量比所需进行的更新规则为

$$\delta_j[k+1] = \begin{cases} \delta_j[k] \rho_j[k] & \rho_j[k] \leq 1 \\ 1 - (1 - \delta_j[k]) \frac{1}{\rho_j[k]} & \rho_j[k] > 1 \end{cases} \quad (20)$$

将有功功率的欠电压和过电压算法结合起来, 表示为

$$\Delta P[k] = \Delta P^{(1)}[k] + \Delta P^{(2)}[k] \quad (21)$$

其中: $\Delta P^{(1)}[k]$ 表示欠电压算法中的有功增量; $\Delta P^{(2)}[k]$ 表示过电压算法中的有功增量。

将时段 $(r, r+1)$ 内分布式算法计算出的分布式电源有功增量与 r 时刻的分布式电源的有功出力相加, 得到时段 $(r, r+1)$ 内每个时刻的分布式电源的有功出力为

$$P[k] = \Delta P[k] + P_{\text{net}}^r \quad (22)$$

根据式(22)可以得到 $r+1$ 时刻的分布式电源向系统的有功注入为

$$P_{\text{net}}^{r+1} = P[(r+1) \cdot k_0] \quad (23)$$

只考虑有功功率作用的分布式算法流程图如图 2 所示。

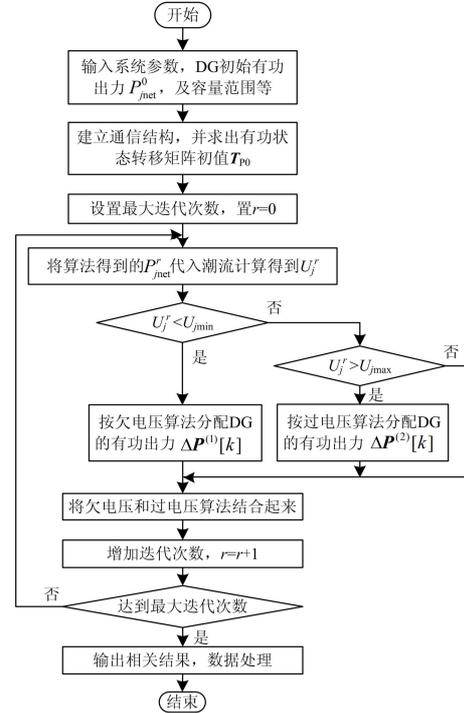


图 2 分布式算法流程图
Fig. 2 Flow chart of distributed algorithm

3 算例仿真

为了验证所提分布式算法的有效性, 进行了如下仿真实验。给定一个低压微电网结构如图 3 所示, 母线 1, 2, 3, 5, 7 上接有 DGs。为了实现电压控制, 需要对 DGs 的有功功率进行调节。DGs 的类型可以为微型燃汽轮机、水轮机等有功可控型分布式电源, 或者光伏、风力发电等间歇性电源, 但是间歇性电源的有功出力具有波动性, 需要与储能装置组合, 同样可以实现对有功功率的调节。

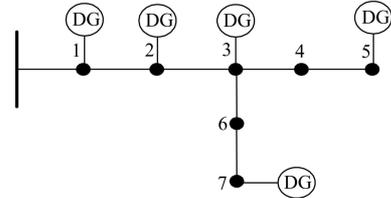


图 3 微电网系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of the microgrid system

图 4 为进行算法所需建立的系统通信结构图。电压等级为 380 V, 基准容量和基准电压分别为 $S_B=10$ kVA, $U_B=380$ V。每条线路参数都相等, 阻抗标么值为 $R=0.00368$, $X=0.00097$, 1~7 号母线的负荷功率值见表 1(单位: 标么值)。其有功容量上下限见表 1, 未进行分布式算法前 DGs 向系统发出的有功功率初始值见表 2。

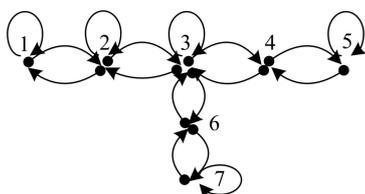


图4 微电网通信结构图

Fig. 4 Structure diagram of the microgrid communication

表1 分布式算法的电压和功率结果

Table 1 Voltage and power output of the distributed algorithm

节点	$U_0/p.u.$	$U^{SS}/p.u.$	$P^{min}/p.u.$	$P^{max}/p.u.$	$P^{SS}/p.u.$
1	1.024 9	1.020 0	0.1	1.6	0.100 0
2	1.002 9	0.996 4	0.1	1.8	0.315 5
3	0.984 7	0.979 6	0.1	1.9	0.722 2
4	0.975 4	0.972 2	0	0	0
5	0.971 4	0.970 0	0.4	2.2	1.398 9
6	0.978 6	0.973 9	0	0	0
7	0.974 1	0.970 0	0.6	2	1.241 2

表2 系统负荷功率值及 DGs 的初始有功出力

Table 2 System load power values and the initial active power output of DGs

节点	$P_l/p.u.$	$Q_l/p.u.$	$P_0/p.u.$
1	1.7	0.6	1
2	1.95	0.7	1.1
3	1.6	0.5	1
4	1.25	0.5	0
5	1.8	0.65	0.9
6	0.4	0.15	0
7	2.1	0.7	1.1

设馈线电压为 1.05，未进行分布式算法时的潮流计算结果如表 1 第一列所示。设定电压上限 $\bar{U}=1.02$ ， $\underline{U}=0.97$ ，由表 1 第一列数据可以看出节点 1 的电压值为 1.024 9，超出了电压上限值。因此需要对系统进行分布式电压算法。设 $r_0=100$ ， $k_0=100$ ，仿真结果和相关数据如图 5、图 6 和表 1 所示。表 1 分别列出了未进行分布式算法时各母线电压值 U_0 ，采用分布式算法调整后的母线电压稳态值 U^{SS} ，DGs 的有功容量下限 P^{min} 和上限 P^{max} ，以及 DGs 最终发出有功功率的稳态值 P^{SS} 。

由表 1 第二列数据可以看出，由于增加了欠电压算法，使各节点电压值均在 0.97~1.02 之间，符合所规定的电压范围要求。而且分布式电源最终的有功出力均满足其有功容量限制。节点 5 和 7 上的分布式电源通过增加有功出力使节点 4~7 的电压得到了提高，均大于等于 0.97。对系统实施算法之后，节点最高和最低电压差从 0.053 5 降低到 0.05，验证了该算法能够有效实现电压调节和减小电压偏差，提高电能质量。

由图 5 可以看出，系统通过降低 DGs 发出的有功功率立即对过电压作出响应，但可能会造成某些

节点电压偏低，如节点 4, 5, 7。算法中的欠电压算法会通过增加 DGs 的有功功率对母线电压进行补偿，使所有母线电压满足要求，母线 1 最终的电压为 1.02，母线 5 和 7 的电压最低，为 0.97。DGs 最终发出的有功功率均在其有功容量上下限之间，满足要求。

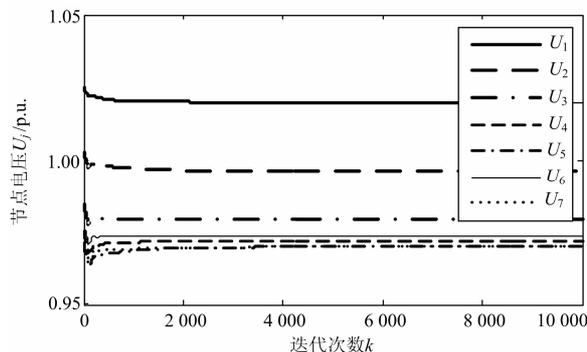


图5 分布式算法的电压结果

Fig. 5 Voltage output of the distributed algorithm

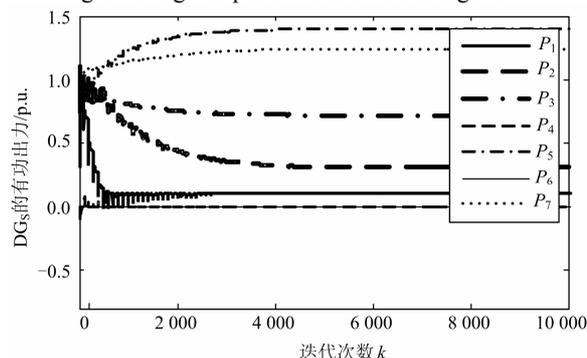


图6 分布式算法的有功功率结果

Fig. 6 Power output of the distributed algorithm

4 总结

在低压微电网中，当电源功率比较充裕时，电压的调节应该主要由分布式电源的有功功率来完成。本文提出了一种有功功率的电压分布式控制算法，根据母线电压和分布式电源的容量限制，协调各分布式电源所发出的功率，由相邻母线上的分布式电源共同提供所需功率，从而实现电压控制。该方法为分布式控制策略，只需在相邻节点之间交换信息，不需要中央控制器和各种设备之间的通信，因此更加经济，并且有利于分布式电源的大量接入。该方法的不足之处在于需要可靠的通信结构，一旦通信发生故障，可能会造成算法失效。因此，应进一步对该算法进行改进，对于节点通信结构发生故障的情况，算法依然有效。

参考文献

- [1] 苏玲, 张建华, 王利, 等. 微电网相关问题及技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 235-239.

- SU Ling, ZHANG Jian-hua, WANG Li, et al. Study on some key problems and technique related to microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 235-239.
- [2] DOMINGUEZ-GARCIA A D, HADJICOSTIS C N. Coordination and control of distributed energy resources for provision of ancillary services[C] // IEEE International Conference on Smart Grid Communications, Gaithersburg, 2010: 537-542.
- [3] 何越, 李正天, 林湘宁. 微网分布式电源非线性功率控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 48-55.
HE Yue, LI Zheng-tian, LIN Xiang-ning. Study of nonlinear control output of DG in the micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 48-55.
- [4] BRAUN M. Reactive power supply by distributed generators[C] // 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008: 1-8.
- [5] 顾和荣, 赵清林, 郭小强, 等. 基于二自由度电流调节的分布式发电系统并网控制技术[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 154-160.
GU He-rong, ZHAO Lin-qing, GUO Xiao-qiang, et al. Grid-connected control for distributed generation based on two-degree-of-freedom current regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 154-160.
- [6] ROGERS K M, KLUMP R, KHURANA H, et al. An authenticated control framework for distributed voltage support on the smart grid[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2010, 1(1): 40-47.
- [7] 王健, 王玮, 屈志坚, 等. 基于多代理技术的含分布式电源的智能配电网[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 86-89.
WANG Jian, WANG Wei, QU Zhi-jian, et al. Intelligent distribution network with distribution generations based on multi-agent technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 86-89.
- [8] DOMINGUEZ-GARCIA A D, HADJICOSTIS C N. Distributed algorithms for control of demand response and distributed energy resources[C] // IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), 2011: 27-32.
- [9] ROBBINS B A, DOMINGUEZ-GARCIA A D, HADJICOSTIS C N. Control of distributed energy resources for reactive power support[C] // North American Power Symposium (NAPS), 2011: 1-5.
- [10] ROBBINS B A, DOMÍNGUEZ-GARCÍA A D. Distributed algorithms for voltage control in electrical networks[D]. University of Illinois, 2011.
- [11] ROBBINS B A, HADJICOSTIS C N, DOMÍNGUEZ-GARCÍA A D. A two-stage distributed architecture for voltage control in power distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(2): 1470-1482.
- [12] 艾欣, 金鹏, 孙英云. 一种改进的微电网无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 147-155.
AI Xin, JIN Peng, SUN Ying-yun. An enhanced reactive sharing control strategy of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 147-155.
- [13] 陈达威, 朱桂萍. 低压微电网中的功率传输特性[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 117-122.
CHEN Da-wei, ZHU Gui-ping. Power transmission characteristics of low voltage microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 117-122.
- [14] 柳明, 柳文. 基于电压的自治微电网分布式协调控制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 20-24.
LIU Ming, LIU Wen. Voltage based distributed control of autonomous microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1): 20-24.

收稿日期: 2014-01-12; 修回日期: 2014-05-17

作者简介:

殷桂梁(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事配电网自动化、微电网运行与控制研究;

侯嘉怡(1987-), 女, 硕士研究生, 从事微电网运行与控制研究。E-mail: houjiayi1210@163.com