



自适应下垂系数的孤岛微电网无功均分策略

摘要

在孤岛微电网中,由于线路阻抗的不匹配,常常导致传统的下垂控制无法完成分布式电源(DG)之间无功功率的均分。为了消除DG之间的无功不均分,首先分析了传统下垂控制无法完成无功均分的原因,设计了可自适应调节的无功下垂系数,使无功下垂系数可以满足无功均分的条件,从而解决无功功率无法均分的问题。为了使无功均分控制器具有更高的灵活性和可靠性,设计了动态分布式观测器,并证明了其收敛性。动态分布式观测器可以使DG以分布式的方式更加灵活可靠地获取所需的信息。通过4个不同的算例对所提的控制策略进行验证,仿真结果验证了所提控制策略的优越性和有效性。

关键词

微电网;自适应;无功功率均分;分布式控制

中图分类号 TM743

文献标志码 A

收稿日期 2023-07-26

资助项目 陕西省自然科学基金研究计划(2023-JC-YB-308)

作者简介

程勇,男,博士,副教授,研究方向为电气非线性控制系统。chengbati@gmail.com

1 西安科技大学 电气与控制工程学院/西安市电气设备状态监测与供电安全重点实验室,西安,710054

0 引言

为了解决分布式发电的不可控性,微电网技术应运而生^[1]。微电网可以在并网和孤岛两种模式下运行^[2]。由于缺乏大电网的支持,孤岛微电网通常采用传统的下垂控制来对分布式电源(DG)输出的功率进行分配^[3-4]。然而,由于线路阻抗之间的差异,常常导致传统的下垂控制无法完成无功均分^[5-6]。DG之间的无功不均分对微电网的控制带来很大的影响。为了解决这个问题,目前主要有虚拟阻抗控制和改进下垂控制两种方法。

虚拟阻抗控制法通过添加虚拟阻抗来消除线路阻抗之间的差异,从而实现无功功率的均分^[7-9]。文献[10]提出一种虚拟阻抗控制方法,通过优化算法来筛选合适的虚拟阻抗,实现了无功均分。然而,这种方法需要指定虚拟阻抗的可行范围,并且馈线的长度会影响虚拟阻抗的值,均分效果受到影响。文献[11]通过在线估计馈线阻抗来设计与各逆变器相匹配的虚拟阻抗。但是其所估计的馈线阻抗值是否精确直接影响无功均分的效果。为了更精准地实现无功功率的均分,自适应虚拟阻抗成为主流方法。文献[12]根据DG输出的实际无功功率与其参考值之间的误差,设计了自适应虚拟阻抗控制器。文献[13]运用一致性算法设计出可以自适应调节的虚拟阻抗。虽然虚拟阻抗方法可以成功地解决线路阻抗不匹配带来的无功功率无法均分的问题,但虚拟阻抗的引入会改变DG输出的等效阻抗,从而改变公共耦合点(Point of Common Coupling, PCC)的电压,进而影响系统的电能质量。

改进下垂控制法主要通过下垂控制的参考电压或者无功下垂系数来实现无功均分。文献[14]通过对线路阻抗的辨识,将其与无功均分条件下的线路阻抗进行比较,并将两者之差作为补偿项,对下垂控制的参考电压进行补偿,实现了无功均分。但是其控制过程较为繁琐,无功均分精度过于依赖辨识结果。文献[15]通过给常规频率有功下垂中加入无功扰动项,在无功下垂中引入有功补偿项,改变下垂控制的参考电压,改善了无功功率的均分,但无法实现精确均分。文献[16]通过给下垂控制引入无功功率与输出电压的微分项,得到下垂控制的参考电压,从而实现无功功率的均分。这种方法需要知道线路阻抗的值,但在实际微电网中线路阻抗是难以测量的。文献[17]设计了自适应下垂系数,通过改变无功下垂系数从而实现DG之间的无功均分。

但是其对信息的获取过度依赖于中央处理器, 控制方法缺乏灵活性.

综上所述, 现有无功均分控制方法主要存在以下几个问题: 1) 虚拟阻抗带来压降; 2) 无功均分的精度不高; 3) 控制方法需要知道馈线信息; 4) 集中式控制的可靠性和灵活性欠佳. 基于此, 本文首先对无功功率无法均分的原因进行了分析, 提出一种可自适应调节下垂系数的无功均分策略. 所提控制策略可以自适应调节无功下垂系数, 使其满足无功均分的条件, 在实现无功的精确均分的同时不需要知道馈线信息, 也不会引起压降; 所设计的分布式动态观测器, 可以实时观测控制过程中所需要的信息, 提高了控制器的灵活性和可靠性.

1 预备知识

1.1 预备知识: 图论

用 $G = (V, E)$ 表示多智能体系统的拓扑结构图. 其中: V 为节点, 相当于微电网中的 DG; E 为边, 相当于通信线路. 在图 G 中, $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ 称为 G 的邻接矩阵, 若 DG 之间存在通信关系, 则 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$. 定义节点的度为 $d_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$, 则图 G 的度矩阵为 $D = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_n)$. 定义 $L = D - A$ 是图 G 中的拉普拉斯矩阵.

1.2 预备知识: 一致性算法

在多智能体系统中, 各智能体通过彼此之间的信息交换, 利用一致性的算法使智能体的状态参数达到某个相同的值. 若将每个智能体(节点)作为一个由 $x_i = u_i$ 描述的一阶系统状态, 其中 u_i 是智能体 i 的邻近状态函数的输入, 则一阶一致性控制问题变成去寻找 y_i , 使得所有状态的 x_i 收敛于一个共同的平衡点. 通用的实施方案是采取式(1)描述的一阶一致性协议:

$$\dot{x}_i = y_i = \sum_{j \in N_i} \alpha_{ij} (x_j - x_i). \quad (1)$$

结合图论的相关知识, 式(1)可以进一步改写为 $\dot{x}_i = -Lx$, 其中 x 为 x_i 构成的列向量.

2 孤岛微电网传统下垂控制原理

2.1 传统下垂控制

逆变器的等效结构如图 1 所示. 图 1 中, $U \angle \varphi$ 为逆变器输出的电压, P 和 Q 分别为逆变器输出的有功功率和无功功率, X 为电感, R 为电阻, $Z \angle \theta$ 为线路阻抗. 从图 1 可得逆变器输出的功率如下:

$$\begin{cases} P_i = \frac{U_{\text{PCC}}}{Z_i} [(U_i \cos \varphi_i - U_{\text{PCC}}) \cos \theta_i + U_i \sin \varphi_i \sin \theta_i], \\ Q_i = \frac{U_{\text{PCC}}}{Z_i} [(U_i \cos \varphi_i - U_{\text{PCC}}) \sin \theta_i + U_i \sin \varphi_i \cos \theta_i]. \end{cases} \quad (2)$$

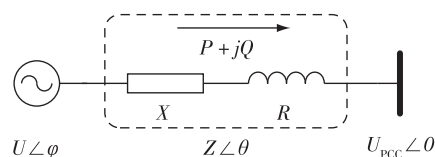


图 1 逆变器等效功率传输模型
Fig. 1 Equivalent model of inverter interface power transmission

又因为在高压微电网中线路阻抗以感性为主, 即 $\theta \approx 90^\circ$, 且逆变器输出电压的相角 φ 很小, 所以存在如下关系:

$$\begin{cases} \sin \varphi = \varphi, \\ \cos \varphi = 1, \\ \sin \theta = 1, \\ \cos \theta = 0. \end{cases} \quad (3)$$

则逆变器输出的功率可以近似地表示为

$$\begin{cases} P_i \approx \frac{U_{\text{PCC}}}{X_i} U_i \varphi_i, \\ Q_i \approx \frac{U_{\text{PCC}}}{X_i} (U_i - U_{\text{PCC}}). \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知, 逆变器输出的有功功率与输出电压的相角 φ 有关, 输出的无功功率与输出电压的幅值有关. 因此, 可推导出传统的下垂控制表达式如下:

$$\begin{cases} U_i = U_n - n_i Q_i, \\ \omega_i = \omega_n - m_i P_i. \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, m 和 n 分别为有功下垂系数和无功下垂系数.

2.2 传统下垂控制的功率特性

在孤岛微电网中, 因为频率是全局变量^[18], 即各个 DG 的频率是相等的. 结合下垂表达式(5)可知有功功率是可以均分的, 即 $m_1 P_1 = m_2 P_2 = \dots = m_i P_i$. 然而, 由于线路阻抗的不匹配导致了 DG 输出电压的不相等, 使得 DG 之间无法满足 $n_1 Q_1 = n_2 Q_2 = \dots = n_i Q_i$ 的均分关系, DG 之间的电压差为

$$\Delta U = n_i Q_i - n_j Q_j. \quad (6)$$

由式(4)–(6), ΔU 可以重新写为

$$\Delta U = \frac{U_n - U_{PCC}}{1 + \frac{X_2}{U_{PCC}n_2}} - \frac{U_n - U_{PCC}}{1 + \frac{X_1}{U_{PCC}n_1}} \quad (7)$$

由式(7)可知,要想消除因电压差带来的无功不均分,必须满足如下关系:

$$\frac{X_2}{n_2} = \frac{X_1}{n_1} \quad (8)$$

3 改进的下垂控制

3.1 自适应无功下垂系数的设计

当线路阻抗 X 和无功下垂系数 n 不能满足式(8)的关系时,无功功率就无法均分.通常假定微电网的线路阻抗是不变的,因此可以改变无功下垂系数 n ,使其可以满足式(8),从而实现无功均分.

自适应无功下垂系数的下垂控制如下:

$$\begin{cases} U_i = U_n - n_i^* Q_i, \\ n_i^* = \int n_i [1 + (U_i - U_{ave})] dt. \end{cases} \quad (9)$$

式中: n_i^* 为调节后的自适应无功下垂系数; U_{ave} 为 DG 间输出的平均电压.

由式(7)、(8)可知,由于线路阻抗的不匹配导致了 DG 输出电压之间存在差值,即在线路阻抗匹配的情况下,各个 DG 输出的电压是相等的且等于它们的平均电压.因此,式(9)引入 DG 输出电压 U_i 与 DG 输出的平均电压 U_{ave} .而常数 1 的引入是为了保证自适应无功下垂系数是在最初设置的无功下垂系数的值上进行自适应调整的.整个控制过程如图 2 所示.

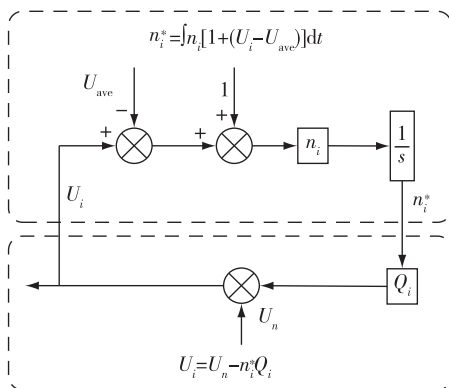


图 2 自适应下垂控制框图

Fig. 2 Block diagram of adaptive droop control

在无功功率均分以前, $U_i - U_{ave}$ 不为 0, 这个差值会调节 n_i^* , 使 n_i^* 随着 $U_i - U_{ave}$ 的变化而变化, n_i^*

的值会调节 DG_i 的输出电压值 U_i , 从而使 DG 输出的电压趋近于平均电压 U_{ave} , 如此循环, 直至 $U_i - U_{ave}$ 趋近于 0. 此时, 各个 DG 输出的电压趋于相等且等于平均电压 U_{ave} , 各个 DG 输出电压之间的差值趋近于 0, 即式(7)中 $\Delta U \rightarrow 0$, 也就是说, 此时的 n_i^* 满足 $n_1 Q_1 = n_2 Q_2 = \dots = n_i Q_i$ 的条件, 同时, n_i^* 与 X_i 也满足式(8)的关系, 无功功率实现了均分.

但是无功下垂系数的变化会影响系统的稳定性, 因此必须对其进行限制, 使其在满足自适应变化的同时保持电压在稳定范围内^[19].

3.2 平均电压的获取

上文通过设计自适应无功下垂系数实现了无功功率的均分, 整个控制过程中平均电压 U_{ave} 发挥着至关重要的作用. 如何准确可靠地获取 U_{ave} , 存在以下两个问题:

1) 虽然在集中式的控制方式下, DG 可以通过中央处理器直接获取, 但是集中式控制的灵活性、可靠性较差, 而分布式控制可以很好地解决过度集中带来的问题.

2) 在分布式一致性算法中, 一阶离散一致性算法可以使变量收敛至状态变量的平均值^[20]. 然而, 当系统处于时变状态时, 迭代后的平均值也会随之发生变化^[21-22].

因此, 所设计的无功均分控制策略要通过动态分布式的方式获取平均电压 U_{ave} , 避免上述问题.

在多智能体系统中, 各智能体可以通过分布式协同控制的方法来解决同步问题和跟踪问题, 这种分布式方法具有更高的灵活性和可靠性. 在孤岛微电网中, 整个微电网系统可以被视为多智能体系统, 而受控的 DG 可以被看作智能体. 因此, 下文将引入分布式算法来增加所设计控制器的灵活性和可靠性. 引入如下分布式观测器获取实时 U_{ave} 的值:

$$\begin{cases} \dot{v}_i = \alpha \left[\sum_{j \in N_i} a_{ij} (\hat{x}_j - \hat{x}_i) + \sum_{j \in N_i} a_{ij} (u_j - u_i) \right], \\ \dot{\hat{x}}_i = u_i + v_i. \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\alpha > 0$, 表示增益系数.

定理 1 对于输入的动态信号, 观测器(10)可以观测到所有动态输入信号的实时平均值, 且收敛误差是有界的, 具体如下:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_i(t) = \left| \hat{x}_i(t) - \frac{1}{n} \sum_j u_j(t) \right| \leq \frac{\Delta}{\lambda_2} \quad (11)$$

式中:

$$\Delta = \frac{1}{\alpha} \sqrt{\alpha \lambda_2 (n+1) d_1^2 + (n+1) d_2^2} \quad (12)$$

因为在实际的电力系统中, 电力系统的状态信号 u_i 和状态信号的导数都是有界的, 因此, 对动态信号做出如下假设.

假设 1 对于动态输入信号 u_i 满足如下条件:

$$\begin{cases} u_i \leq d_1 < \infty, \\ \dot{u}_i \leq d_2 < \infty. \end{cases} \quad (13)$$

定义如下矩阵:

$$\frac{\mathbf{1}_n \mathbf{1}_n^T}{n} = \mathbf{M}, \quad (14)$$

则收敛误差

$$\mathbf{e} = \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{M}\mathbf{u}. \quad (15)$$

其中: $\mathbf{e}, \hat{\mathbf{x}}, \mathbf{u}$ 分别为 e_i, \hat{x}_i, u_i 构成的列向量.

对(15)求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}} &= \dot{\hat{\mathbf{x}}} - \mathbf{M}\dot{\mathbf{u}} = \\ &\dot{\mathbf{u}} - \alpha \mathbf{L}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{M}\dot{\mathbf{u}} - \alpha \mathbf{L}\mathbf{u} = \\ &-\alpha \mathbf{L}(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{M}\mathbf{u}) + \alpha \mathbf{L}\mathbf{M}\mathbf{u} - \alpha \mathbf{L}\mathbf{u} + \dot{\mathbf{u}} - \mathbf{M}\dot{\mathbf{u}} = \\ &-\alpha \mathbf{L}\mathbf{e} + \alpha \mathbf{L}\mathbf{M}\mathbf{u} - \alpha \mathbf{L}\mathbf{u} + \dot{\mathbf{u}} - \mathbf{M}\dot{\mathbf{u}}. \end{aligned} \quad (16)$$

在式(16)中令:

$$\alpha \mathbf{L}\mathbf{M}\mathbf{u} - \alpha \mathbf{L}\mathbf{u} + \dot{\mathbf{u}} - \mathbf{M}\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{B}, \quad (17)$$

则式(16)可写为

$$\dot{\mathbf{e}} = -\alpha \mathbf{L}\mathbf{e} + \mathbf{B}. \quad (18)$$

解微分方程(18)可得:

$$\mathbf{e}(t) = \exp(-\alpha \mathbf{L}t)\mathbf{e}(0) + \int_0^t \exp(-\alpha \mathbf{L}(t-\tau))\mathbf{B}(\tau) d\tau. \quad (19)$$

根据文献[23], 可得范数的上界为

$$\begin{aligned} \|\mathbf{e}(t)\| &\leq \exp(-\alpha \lambda_2 t) \|\mathbf{e}(0)\| + \\ &\int_0^t \exp(-\alpha \lambda_2 (t-\tau)) \|\mathbf{B}(\tau)\| d\tau \leq \\ &\exp(-\alpha \lambda_2 t) \|\mathbf{e}(0)\| + \frac{1}{\alpha \lambda_2} \sup_{0 \leq \tau \leq t} \|\mathbf{B}(\tau)\| \leq \\ &\frac{1}{\alpha \lambda_2} \sup_{0 \leq \tau \leq t} \|\mathbf{B}(\tau)\|. \end{aligned} \quad (20)$$

式(20)中, λ_2 为 \mathbf{L} 的最小非零特征值.

根据假设 1 可得:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{L}\mathbf{M}\mathbf{u}\|^2 &\leq \lambda_2 n d_1^2, \quad \|\mathbf{L}\mathbf{u}\|^2 \leq \lambda_2 d_1^2, \\ \|\dot{\mathbf{u}}\|^2 &\leq d_2^2, \quad \|\mathbf{M}\dot{\mathbf{u}}\|^2 \leq n d_2^2. \end{aligned} \quad (21)$$

把式(21)代入式(20)可得:

$$\|\mathbf{e}(t)\| \leq \frac{1}{\alpha \lambda_2} \sqrt{\alpha^2 \lambda_2 (n+1) d_1^2 + (n+1) d_2^2}. \quad (22)$$

从(20)和(22)可以看出, 误差 \mathbf{e} 可以收敛至有界误差, 且误差大小和收敛速度与 α 有关, α 越大收敛速度越快, 收敛误差越小. 证明完毕.

因此, 各个 DG 可以通过所提出的动态分布式观测器(10), 仅仅使用自己和相邻 DG 输出的电压来分布式地实时获取 U_{ave} 的值, 从而保证无功均分策略具有更高的灵活性和可靠性.

4 仿真实验

4.1 分布式观测器验证

为了分布式地获取 DG 的实时平均电压, 首先验证本文所提的分布式观测器是否可以动态获取输入信号的平均值, 在 Matlab/Simulink 搭建仿真模型进行算例分析, 整个仿真过程为 10 s. 为了能更加直观地表示出观测结果, 仿真中只在输入信号中设置一个动态信号. 设输入信号 $x = [40\sin t, 20, 30, 10]$, 其中, $40\sin t$ 用来模拟动态信号. 仿真结果如图 3 所示.

由图 3 可以看出: 当输入信号中含有动态信号时, 本文设计的分布式观测器所观测的平均值也会随着动态信号的变化而变化, 并在动态信号 $40\sin t$ 的值为 ± 40 时取得最大平均值和最小平均值; 当 α 越大时, 观测器所获得的平均值之间的误差越小, 验证了上文所得出的结论. 图 3 结果表明了所提分布式观测器的有效性, 即可以通过所设计的观测器来获取 DG 的实时平均电压.

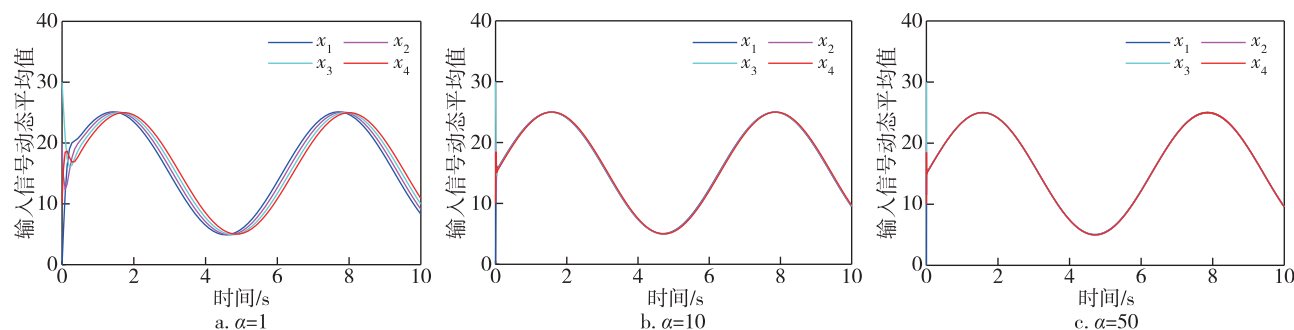


图 3 不同 α 下分布式控制器获取的动态平均值

Fig. 3 Dynamic average values obtained by distributed controllers under different α

4.2 无功均分验证

为了验证本文所提出的控制策略的有效性,在 Matlab/Simulink 搭建仿真模型进行算例分析.整个仿真过程设置为 3 s,并在 4 个不同场景下对控制策略进行验证来保证其有效性.系统的仿真参数如表 1、2 所示.

表 1 DG 参数
Table 1 DG parameters

DG	m	n	R/Ω	X/mH
1	3×10^{-5}	3×10^{-4}	0.08	1.0
2	3×10^{-5}	3×10^{-4}	0.08	2.0
3	2×10^{-5}	2×10^{-4}	0.08	1.5
4	1×10^{-5}	1×10^{-4}	0.08	1.0

4.2.1 无功功率效果验证

上文对分布式获取动态平均电压的效果进行了

验证,下文验证所提的控制策略的无功均分精度以及对 PCC 电压的影响.

表 2 负载参数
Table 2 Load parameters

负载	有功功率/kW	无功功率/kvar
1	20	10
2	12	8
3	6	4

1)算例 1:无功均分精度

为了说明所提的控制策略可以实现通过调节下垂系数实现无功功率的精确均分,在 $t=0.5\text{ s}$ 之前,微电网使用传统的下垂控制对 DG 输出的功率进行分配,在 $t=0.5\text{ s}$ 之后,使用本文所提的控制策略.仿真结果如图 4 所示.

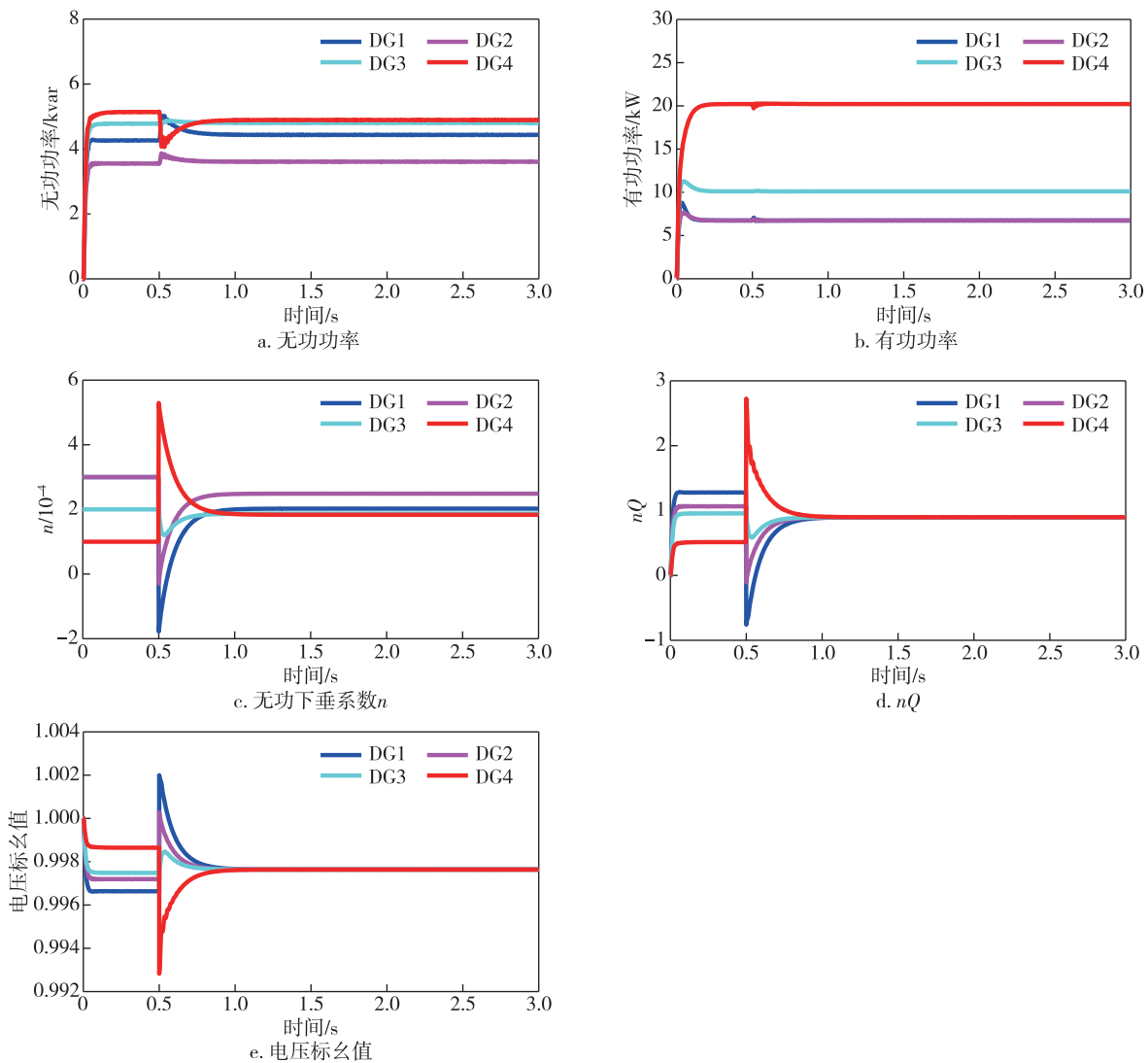


图 4 无功均分精度仿真结果

Fig. 4 Simulation results of reactive power sharing accuracy

由图 4b 可知,在 $t=0.5\text{ s}$ 时使用所提的控制策略, DG 输出的有功功率会发生轻微的波动, 大约经过 0.1 s 的时间后, 就会恢复至 $t=0.5\text{ s}$ 以前的有功功率稳态均分情况下的值, 表明所提出的控制策略不会影响有功功率的均分. 由图 4a、c、d 可知, 在 $t=0.5\text{ s}$ 时, 各个 DG 输出的无功功率 Q 、无功下垂系数 n 和 nQ 都开始发生变化, 大约在 $t=1.3\text{ s}$ 时, Q 和 n 的值趋于稳定, 各个 DG 的 nQ 趋于一致, 根据 2.2 无功均分的条件可知, 实现了无功功率实现了精确均分. 由图 4e 可知, 在整个控制过程中各个 DG 输出电压的波动范围远小于 5% , 表明所提的控制策略可以很好抑制电压波动, 保证了整个系统的稳定性. 根据式(9)可知, 在完成整个控制过程中所需的信息仅仅只有电压和无功功率, 并不需要知道线路阻抗的信息.

2) 算例 2: PCC 压降

为了说明本文所提的控制策略可以避免 PCC 的压降, 与文献[13]所提的控制策略进行对比. 简单起见, 只给出文献[13]策略下无功功率均分效果 nQ 的图. 仿真结果如图 5 所示.

由图 5a 可以看出, 文献[13]所提的控制方法虽

然可完成无功功率的均分, 但是 $t=0.5\text{ s}$ 控制器投入时, DG 的 nQ 产生的振荡比较大, 并且其完成无功均分所需要的时间也更长. 由图 5b、c 可以看出, 本文所提的控制策略完成无功均分后, PCC 的电压是保持不变的, 从而保证了电能质量, 而文献[13]所提的控制策略虽然也完成了无功均分, 但是 PCC 产生了压降. 上述结果证明了本所提控制策略的优越性.

4.2.2 动态变化下的控制效果

一个好的控制器必须在系统条件发生突变时也能完成控制任务, 因此, 下文将在常见的负荷变化和线路阻抗变化的情况下对所提控制器的控制效果进行验证.

1) 算例 3: 负荷变化

在本节中, 通过研究负载发生变化时各个 DG 输出的无功功率的情况, 验证本文提出的控制策略的有效性. 在 $t=1.0\text{ s}$ 时接入负载 2 和负载 3, 在 $t=2.0\text{ s}$ 时断开负载 3. 仿真结果如图 6 所示.

由图 6a、b、c 可以看出, 在 $t=1.0\text{ s}$ 和 $t=2.0\text{ s}$ 系统负荷发生变化时, DG 输出的无功功率和无功下垂系数也随之发生变化, DG 的 nQ 在每次负荷变化后的很短时间内重新达到一致, 表明无功功率仍然

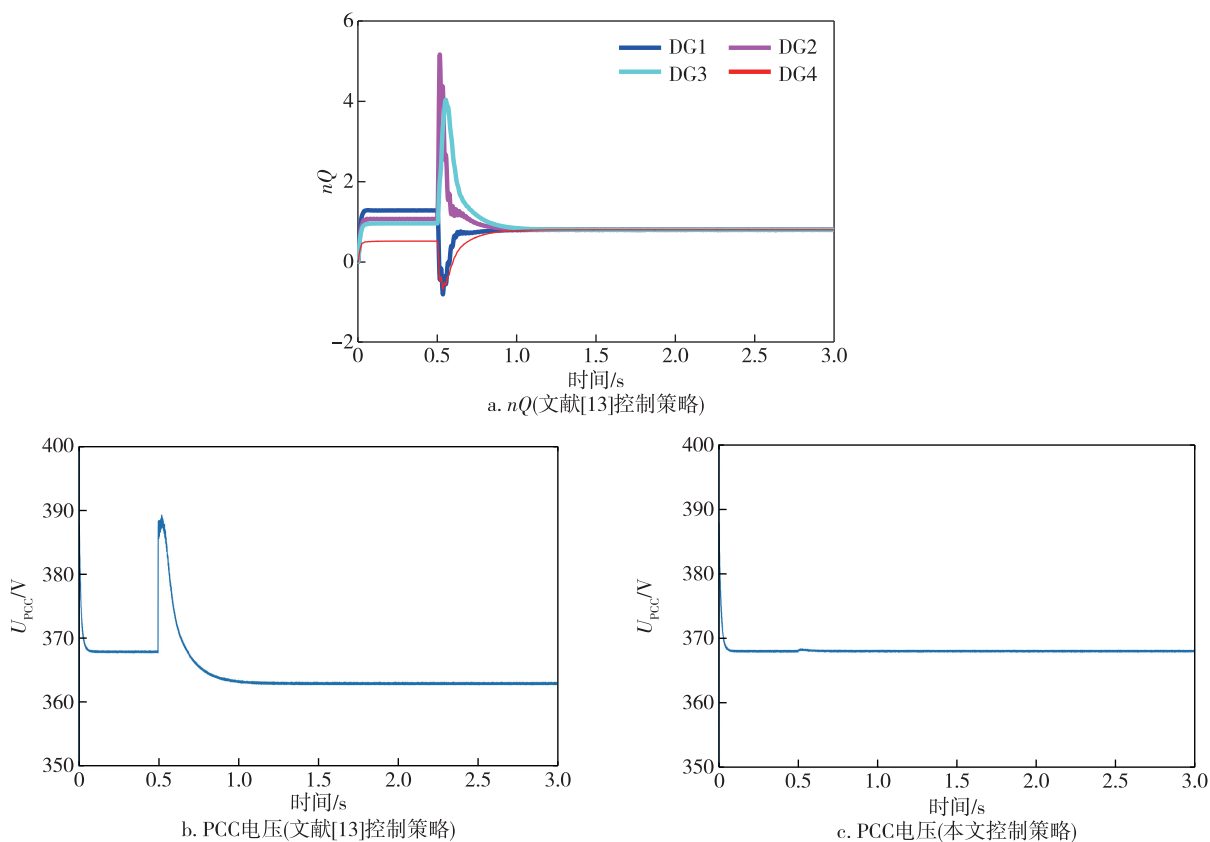


图 5 不同控制策略 PCC 压降仿真结果

Fig. 5 Simulation results of PCC voltage drop with different control strategies

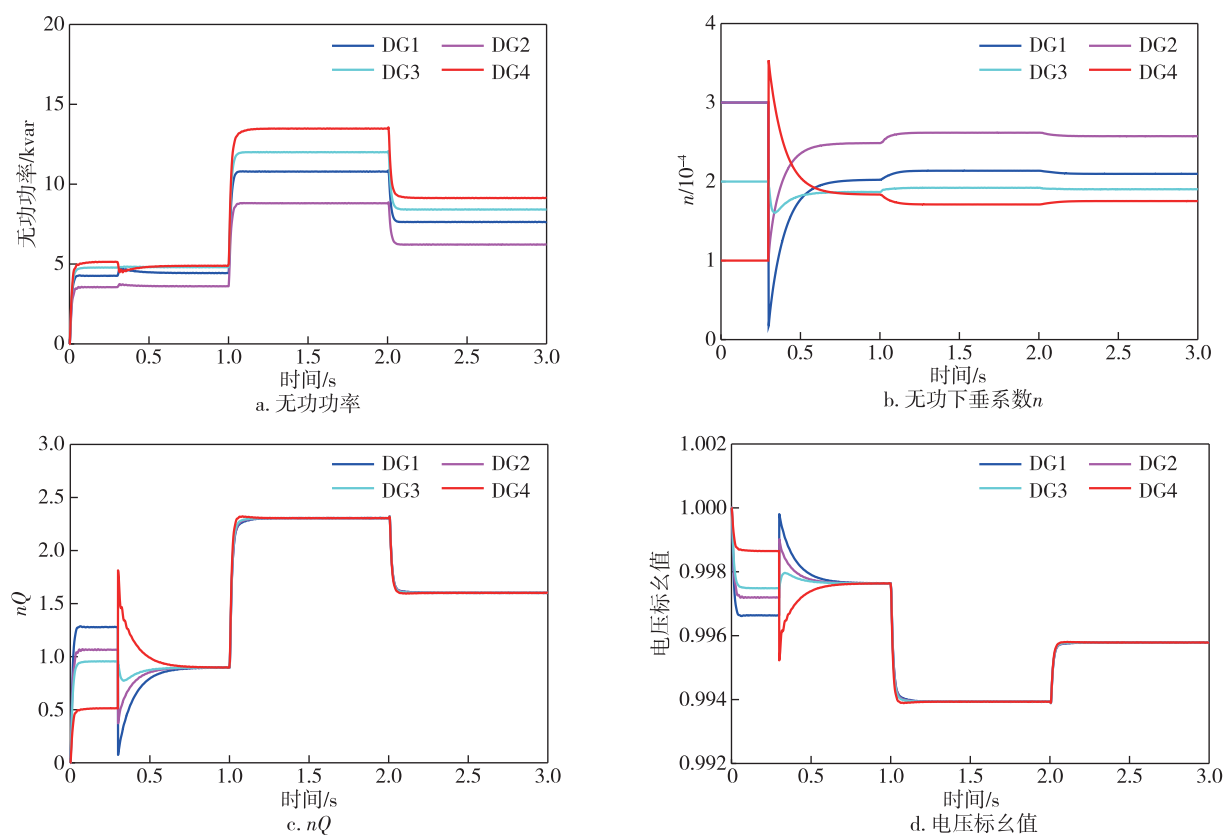


图6 负荷变化仿真结果

Fig. 6 Simulation results of load variation

可以均分.在整个控制过程中,DG输出的电压始终远小于5%,验证了在负荷变化的情况下本文所提控制策略的有效性.

2)算例4:线路阻抗变化

由于无功功率的不均分是由于线路阻抗的不匹配引起的,因此在运行过程中改变系统的线路阻抗,在 $t=1.0\text{ s}$ 时,分别给DG3和DG4的线路并联上额外阻抗,在 $t=2.0\text{ s}$ 时,断开DG4并联的阻抗,来验证本文的控制策略的有效性.仿真结果如图7所示.

由图7a、b、c可以看出,当线路阻抗发生变化时,DG输出的无功功率发生了较大的波动,无功下垂系数的变化范围也比较大,各个DG的 nQ 达到一致所需要的时间也更长,但还是可以完成无功功率的均分.由图7d可知,虽然线路阻抗变化时系统会产生较大的波动,但是DG输出的电压还是可以保持在稳定的范围内,表明所提的控制策略可以在线路阻抗变化的情况下很好地完成无功功率的均分.

5 结论

本文针对孤岛微电网中无功功率不均分和控制

器的灵活性与可靠性的问题,设计了一种可自适应调节下垂系数的分布式无功功率均分策略,得出以下结论:

1)所提的自适应调节下垂系数的控制策略可以通过改变DG的无功功率下垂系数完成无功功率的精确均分,并且可以保证DG的输出电压在稳定范围内.与现有控制策略相比,不知道馈线信息也不会引PCC的降压.

2)基于一致性算法的分布式观测器可以动态追踪获取DG输出电压的动态平均值,提高了所提的自适应调节下垂系数控制策略的灵活性和可靠性.

参考文献

References

- [1] 侯帅丞,陈家伟,张秀琴.微电网逆变器的自适应滑模控制策略研究[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2018,10(2):153-159
HOU Shuaicheng, CHEN Jiawei, ZHANG Xiuqin. Adaptive sliding mode control strategy for inverter in microgrid[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2018, 10(2):153-159

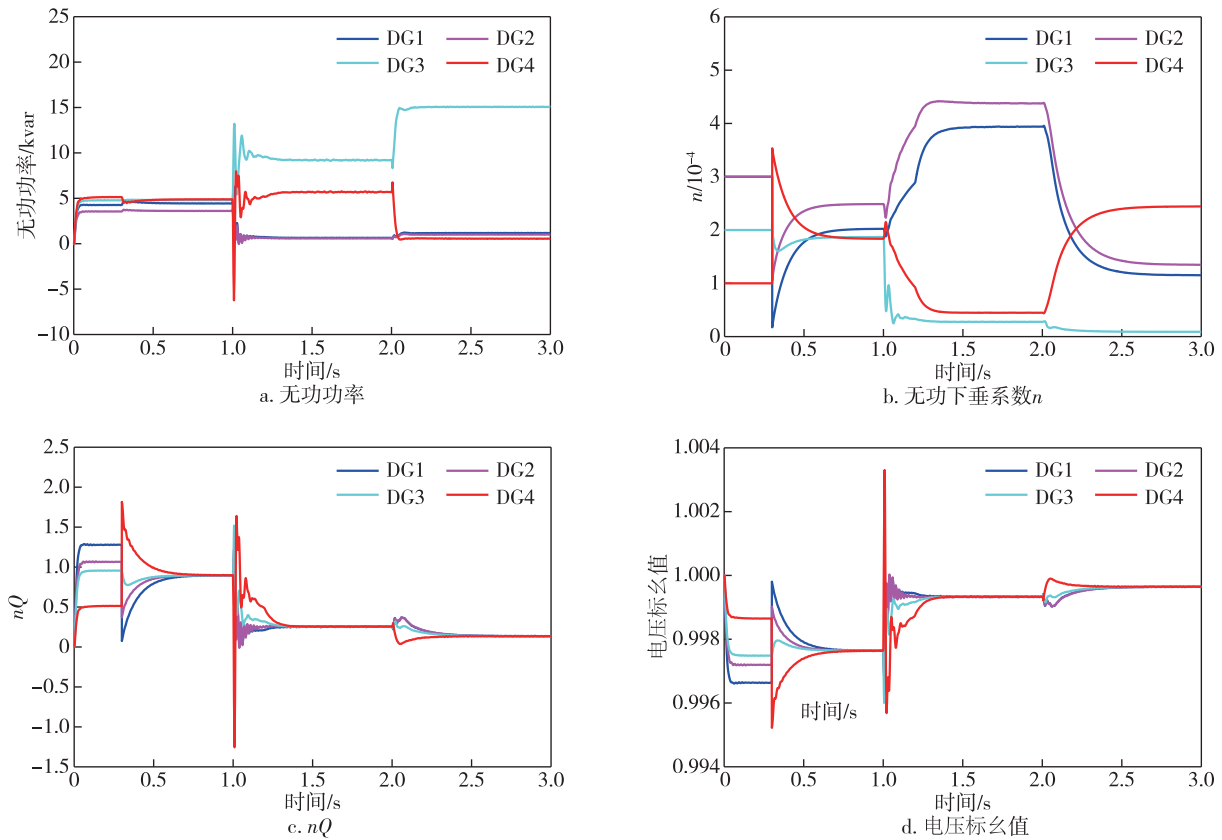


图7 线路阻抗变化仿真结果

Fig. 7 Simulation results of line impedance variation

- [2] 王凌云,周璇卿,李升,等.基于改进功率环的微电网对等控制策略研究[J].中国电力,2017,50(9):171-177
WANG Lingyun, ZHOU Xuanqing, LI Sheng, et al. Research on peer to peer control strategy for microgrid based on the improved power loop[J].Electric Power, 2017,50(9):171-177
- [3] 米阳,宋根新,宋元元,等.孤岛交直流混合微电网群多级功率管理策略[J].电力系统自动化,2020,44(7):38-45
MI Yang, SONG Genxin, SONG Yuanyuan, et al. Strategy of multi-level power management for islanded AC/DC hybrid microgrid cluster[J].Automation of Electric Power Systems, 2020,44(7):38-45
- [4] 张宇,王洪希,王璞.交直流混合微电网互联变流器微分平坦控制[J].中国电力,2022,55(7):102-109,120
ZHANG Yu, WANG Hongxi, WANG Pu. Flatness-based control of AC/DC hybrid microgrid interconnected converter[J].Electric Power, 2022,55(7):102-109,120
- [5] 董杰,李领南,张纯江,等.微电网中的有功功率和无功功率均分控制[J].电力系统自动化,2016,40(10):90-96
DONG Jie, LI Lingnan, ZHANG Chunjiang, et al. Sharing control of active power and reactive power in microgrid[J].Automation of Electric Power Systems, 2016,40(10):90-96
- [6] Qi Y, Fang J Y, Tang Y. Utilizing the dead-time effect to achieve decentralized reactive power sharing in islanded AC microgrids [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(3): 2350-2361
- [7] He J W, Li Y W. Analysis, design, and implementation of virtual impedance for power electronics interfaced distributed generation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(6): 2525-2538
- [8] Wang K, Yuan X B, Geng Y W, et al. A practical structure and control for reactive power sharing in microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1880-1888
- [9] Sellamna H, Pavan A M, Mellit A, et al. An iterative adaptive virtual impedance loop for reactive power sharing in islanded meshed microgrids [J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2020, 24: 100395
- [10] Wu X Y, Shen C, Irvani R. Feasible range and optimal value of the virtual impedance for droop-based control of microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(3): 1242-1251
- [11] Mohammed N, Lashab A, Ciobotaru M, et al. Accurate reactive power sharing strategy for droop-based islanded AC microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(3): 2696-2707
- [12] An R H, Liu Z, Liu J J. Successive-approximation-based virtual impedance tuning method for accurate reactive power sharing in islanded microgrids [J]. IEEE Transac-

- tions on Power Electronics, 2021, 36(1): 87-102
- [13] Lu J H, Zhao M, Golestan S, et al. Distributed event-triggered control for reactive, unbalanced, and harmonic power sharing in islanded AC microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(2): 1548-1560
- [14] 陈晓祺, 贾宏杰, 陈硕翼, 等. 基于线路阻抗辨识的微电网无功均分改进下垂控制策略[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1271-1279
CHEN Xiaoqi, JIA Hongjie, CHEN Shuoyi, et al. Improved droop control strategy based on line impedance identification for reactive power sharing in microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1271-1279
- [15] Gupta Y, Parganiha N, Rathore A K, et al. An improved reactive power sharing method for an islanded microgrid [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 2954-2963
- [16] Minetti M, Rosini A, Denegri G B, et al. An advanced droop control strategy for reactive power assessment in islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(4): 3014-3025
- [17] 罗朝旭, 刘洋, 罗钦, 等. 基于动态下垂系数的低压微电网无功控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 78-86
LUO Zhaoxu, LIU Yang, LUO Qin, et al. Reactive power control strategy of low-voltage microgrid applying dynamic droop coefficient [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 78-86
- [18] 米阳, 蔡杭道, 宋元元, 等. 基于同步补偿的孤岛微电网无功均分研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(9): 1934-1943
- MI Yang, CAI Hangyi, SONG Yuanyuan, et al. Study on reactive power sharing of island microgrid based on synchronous compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(9): 1934-1943
- [19] Gupta Y, Chatterjee K, Doolla S. A simple control scheme for improving reactive power sharing in islanded microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3158-3169
- [20] 颜丽, 米阳, 孙威, 等. 基于改进下垂控制的孤岛交流微电网无功分配研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 7-15
YAN Li, MI Yang, SUN Wei, et al. Reactive power distribution control strategy in islanded AC microgrid based on improved droop control [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(8): 7-15
- [21] Xu Y L, Liu W X. Novel multiagent based load restoration algorithm for microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 152-161
- [22] 张小莲, 石春晖, 郝思鹏, 等. 基于动态一致性算法的微电网无功功率分布式二级控制策略[J]. 可再生能源, 2022, 40(3): 368-376
ZHANG Xiaolian, SHI Chunhui, HAO Sipeng, et al. Distributed secondary reactive power control strategy of microgrid based on dynamic consensus algorithm [J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(3): 368-376
- [23] Chen Y L, Qi D L, Li C Y. Distributed dynamic averaging tracking without rate measurements [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(7): 4359-4364

Adaptive droop coefficient-based reactive power sharing strategy for islanded microgrid

CHENG Yong¹ CHENG Qi¹ YAO Leiru¹ ZHAO Jianwen¹

¹ School of Electrical and Control Engineering/Xi'an Key Laboratory of Electrical Equipment Condition Monitoring and Power Supply Security, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

Abstract In the islanded microgrid, the mismatch in line impedance hinders the traditional droop control from achieving an equal distribution of reactive power among Distributed Generation (DG) sources. To address this problem and enhance the flexibility and reliability of the controller, this paper analyzes the reasons behind the failure of traditional droop control and proposes an adaptive droop coefficient that can be dynamically adjusted to meet the conditions for reactive power sharing. Additionally, a dynamic distributed observer is designed and its convergence is proven, which allows DG sources to obtain necessary information flexibly and reliably in a distributed manner. Finally, the proposed control strategy is verified through simulations in four different scenarios, and the results demonstrate its superiority and effectiveness.

Key words microgrid; adaptive; reactive power sharing; distributed control