

# 计及负序电流均衡的孤岛微电网电压不平衡协同控制策略

吴丽珍<sup>1,2</sup>, 刘腾飞<sup>1</sup>, 郝晓弘<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050;  
2. 北京交通大学国家能源主动配电网技术研发中心, 北京 100044)

**摘要:** 孤岛微电网中, 由于公共耦合点(PCC)处存在大量单相负荷和非线性负荷, 系统易出现三相电压不平衡及负序电流无法均衡分配问题。为此, 在分析不平衡补偿与负序电流均衡机理的基础上, 提出一种基于动态一致性算法的电压不平衡补偿及负序电流均衡控制策略。在分布式二次控制层中, 通过分布式稀疏通信网络实现相邻的分布式电源间实时数据交换, 采用动态一致性算法估算全局平均电压和平均负序电流, 自适应调节电压不平衡补偿参考向量, 以实现电压不平衡补偿和负序电流的均衡控制。该控制策略不仅实现了公共耦合点处电压不平衡补偿, 还解决了分布式电源(DG)间因线路阻抗分布不均的负序电流均衡控制问题。最后, 通过仿真与实验验证了所提方法的有效性和可行性。

**关键词:** 微电网; 电压不平衡补偿; 负序电流均衡控制; 一致性算法

**DOI:** 10.12067/ATEEE1801070

**文章编号:** 1003-3076(2018)06-0025-09

**中图分类号:** TM62; TM761

## 1 引言

微电网是由多种分布式电源(Distributed Generation, DG)、电力电子装置、储能设备和负荷等组成的小型自治发电系统, 具有并网和孤岛运行两种模式<sup>[1,2]</sup>。在低压孤岛微电网中三相负荷不对称现象普遍存在, 导致系统中存在负序电压和负序电流, 而负序电压会导致微电网损耗的增加, 并且影响系统中设备的稳定运行。同时, 由于DG到公共耦合点(Point of Common Coupling, PCC)处的线路阻抗分布不均, 导致逆变器无法实现负序电流的自主分配, 当微电网工作在额定功率附近时, 不平衡负荷的突变将极易导致逆变器出现过流故障。国际电工委员会(IEC)明确规定PCC处的电压不平衡度(Voltage Unbalance Factor, VUF)应限制在2%以内, 短时不超过4%<sup>[3,4]</sup>。因此, 研究微电网电压不平衡补偿意义重大。

在传统电力系统中, 通常采用串联或并联有源滤波器注入负序电压或电流方式来补偿三相电压不平衡, 但该方法增加了设备的投资成本, 同时很难兼

顾负序电流均衡控制问题。而微电网中的DG具有和有源滤波器一样的拓扑结构, 因此, 可以通过基于下垂控制的有功、无功功率控制环节补偿三相电压不平衡。文献[5]中提出一种用负序电压直接补偿的方法, 实现了DG间电压不平衡补偿。文献[6]提出了一种多代理系统的分布式协调电压不平衡控制策略, 以降低系统的电压不平衡度。但这些控制方法均未考虑负序电流在各个DG之间的均衡控制问题。微电网中各DG到负荷的线路阻抗不同, 采用传统下垂控制方法难以直接实现无功功率和负序电流均衡控制, 易产生电压偏差和环流。为不改变传统的下垂控制应用, 文献[7]提出了集中式分层控制的思想, 将PCC处电压质量作为控制目标引入二次控制的方法, 实现了PCC处电压不平衡的补偿作用。但由于中央控制器的存在, 会使系统的可靠性降低、不易于扩展。为此, 文献[8,9]提出分布式二次控制方法实现了微电网电压和频率的恢复控制和功率均分控制。文献[10]提出电压不平衡分布式二次补偿方法, 并指出由于没有考虑负序电流在DG间的均衡分配, 易使逆变器过流。

**收稿日期:** 2018-01-25

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51467009)、兰州市科技计划项目(2016-3-67)

**作者简介:** 吴丽珍(1973-), 女, 福建籍, 副教授, 博士, 研究方向为微电网的运行与控制以及网络化控制;  
刘腾飞(1992-), 男, 山东籍, 硕士研究生, 研究方向为微电网电压稳定性分析与网络化控制。

因此,本文在建模与机理分析的基础上,提出一种孤岛微电网的电压不平衡补偿和负序电流均衡控制策略。在分布式分层控制架构中,分布式二次控制器和一次控制器结合在一起,并嵌入在每个 DG 中,作为控制系统中的一个智能节点,并采用动态一致性算法(Dynamic Consensus Algorithm, DCA)获得全局一致性信息,实现 PCC 电压不平衡补偿,同时,也实现了 DG 间负序电流均衡控制及 DG 的即插即用功能。

## 2 不平衡系统等效模型与负序电流均衡控制分析

### 2.1 不平衡机理分析

孤岛微电网 PCC 接入不平衡负荷工况下,系统不平衡等效模型如图 1(a)所示。其中, $Y$  和  $Y_u$  分别表示线路导纳和不平衡负载等效导纳。根据文献[11],当微电网中存在不平衡负载时,在负载稳定并且电压变化范围在 5% 以内时,可将不平衡负载等效为电流源,如图 1(b)所示。图 1(b)中, $I_{PCC}^-$  为负载等效负序电流相量; $V_{PCC}^-$  为 PCC 处负序电压相量; $V_{S1}^-$ 、 $V_{S2}^-$  为 DG 侧负序电压相量; $I_{S1}^-$ 、 $I_{S2}^-$  分别为 DG<sub>1</sub> 和 DG<sub>2</sub> 负序电流相量; $Y_1^-$ 、 $Y_2^-$  分别为 DG<sub>1</sub> 和 DG<sub>2</sub> 到 PCC 的线路导纳。

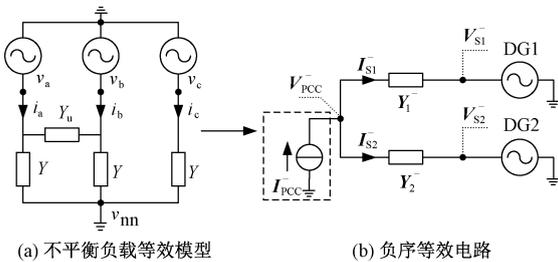


图 1 不平衡负载等效模型及负序等效电路

Fig. 1 Unbalanced load equivalent model and negative sequence equivalent circuit

图 1(a)中,当不平衡负载接到 PCC 上时,根据对称分量法<sup>[3]</sup>,可得:

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_{ss} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{Y}_{ph} \mathbf{A} \\ \mathbf{V}_{ss} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{V}_{ph} \\ \mathbf{I}_{ss} = \mathbf{Y}_{ss} \mathbf{V}_{ss} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{Y}_{ss}$ 、 $\mathbf{V}_{ss}$ 、 $\mathbf{I}_{ss}$  分别为导纳矩阵、电压矩阵和电流矩阵; $\mathbf{A}$  为一个变换矩阵且系数  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ ;  $\mathbf{Y}_{ph}$ 、 $\mathbf{V}_{ph}$  分别为三相系统中的相导纳矩阵和相电压矩阵:

$$\mathbf{Y}_{ph} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y} + \mathbf{Y}_u & -\mathbf{Y}_u & 0 \\ -\mathbf{Y}_u & \mathbf{Y} + \mathbf{Y}_u & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{Y} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{V}_{ph} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a - \mathbf{V}_{nn} \\ \mathbf{V}_b - \mathbf{V}_{nn} \\ \mathbf{V}_c - \mathbf{V}_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过求解式(1)可得到:

$$\begin{cases} \mathbf{I}^+ = \mathbf{V}^+ \mathbf{Y} + (\mathbf{V}^+ - a\mathbf{V}^-) \mathbf{Y}_u \\ \mathbf{I}^- = \mathbf{V}^- \mathbf{Y} + (\mathbf{V}^- - a^2\mathbf{V}^+) \mathbf{Y}_u \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{V}$  和  $\mathbf{I}$  分别为电压相量和电流相量;上标“+”和“-”分别为正序分量和负序分量。根据文献[12],当电力系统允许的最大电压不平衡度为 3% 时,正序电压远远大于负序电压。而当 VUF 的值在 0~5% 范围内变化并且  $Y \gg Y_u$  的情况下,可以得到  $\mathbf{V}^- \mathbf{Y} + \mathbf{V}^- \mathbf{Y}_u$  的值远小于 5% 的额定正序电流,因此, $\mathbf{V}^- \mathbf{Y} + \mathbf{V}^- \mathbf{Y}_u$  可以被忽略不计,如式(5)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{I}^+ \approx \mathbf{V}^+ \mathbf{Y} + \mathbf{V}^+ \mathbf{Y}_u \\ \mathbf{I}^- \approx -a^2 \mathbf{V}^+ \mathbf{Y}_u \end{cases} \quad (5)$$

从式(5)中可以得出,负序电流  $\mathbf{I}^-$  的大小由正序电压  $\mathbf{V}^+$  和不平衡负载决定。

### 2.2 电压不平衡补偿和负序电流均衡机理分析

根据欧姆定律可知,图 1(b)所示的负序等效电路电压、电流可以表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{PCC}^- = \mathbf{V}_{S1}^- + \mathbf{I}_{S1}^- / \mathbf{Y}_1^- \\ \mathbf{V}_{PCC}^- = \mathbf{V}_{S2}^- + \mathbf{I}_{S2}^- / \mathbf{Y}_2^- \\ \mathbf{I}_{PCC}^- = \mathbf{I}_{S1}^- + \mathbf{I}_{S2}^- \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知,PCC 接入不平衡负载会产生负序电压。PCC 不平衡补偿的一般方法是通过调节 DG 负序电压直接补偿 PCC 负序电压,补偿原理如图 2(a)所示。

由图 2(a)可知,当  $\mathbf{V}_{S1}^-$ 、 $\mathbf{V}_{S2}^-$  补偿量相同时,受线路导纳  $\mathbf{Y}_1^-$ 、 $\mathbf{Y}_2^-$  的影响,负序电流  $\mathbf{I}_{S1}^-$ 、 $\mathbf{I}_{S2}^-$  不能得到均分,线路导纳大的 DG,将分摊较多的负序补偿电流,易使得该 DG 的逆变器过流,甚至烧毁。因此,需要对负序电流进行均衡控制。本文提出负序电流均衡控制方法,如图 2(b)所示。通过比例调节 DG 的负序电压,即  $\mathbf{V}_{S1}'^-$ 、 $\mathbf{V}_{S2}'^-$  到  $\mathbf{V}_{S1}''^-$ 、 $\mathbf{V}_{S2}''^-$ ,使负序电流能按比例均分,即  $\mathbf{I}_{S1}''^- = \mathbf{I}_{S2}''^-$ 。实现负序电流均衡的关键是求取全局负序电流平均值,因此,本文提出了一种基于动态一致性算法的电压不平衡补偿与负序电流均衡协同控制方法。

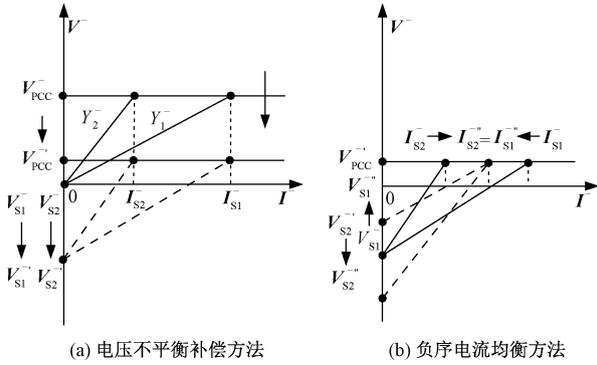


图2 电压不平衡补偿及负序电流均衡方法

Fig.2 Voltage unbalance compensation and negative sequence current sharing approach

### 3 分布式分层控制系统负序电流均衡控制与电压不平衡补偿

微电网中某 DG 节点的电压不平衡补偿及负序电流均衡控制原理图如图 3 所示。

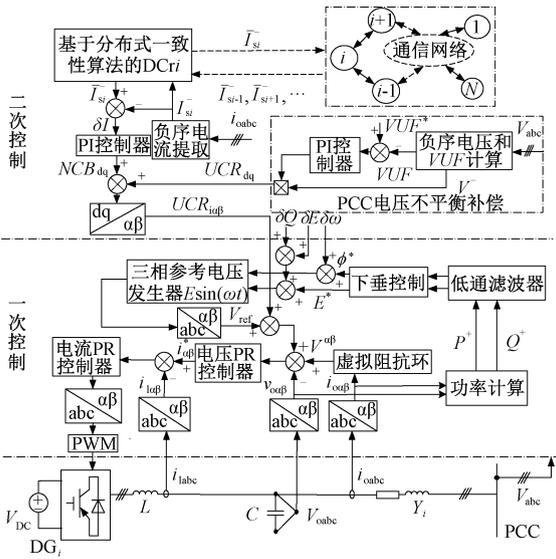


图3 网络化分层控制的单个 DG 电压不平衡补偿结构  
Fig.3 Networked hierarchical control of single DG voltage unbalance compensation structure

图 3 中,分布式发电单元主要由分布式直流电源、三相全桥逆变电路和 LC 滤波器组成,  $Y_i$  为 DG 到 PCC 点的线路导纳。其中,一次控制系统由电压和电流控制环节、有功和无功下垂控制环节、虚拟阻抗控制环节组成,并且在  $\alpha\beta$  坐标系下进行设计,各环节的具体设计参见文献[13]。首先,基于瞬时功率理论,计算出逆变器输出的有功无功瞬时值,再经过低通滤波器提取基波正序有功功率  $P^+$  和无功功率  $Q^+$ ,将提取的  $P^+$ 、 $Q^+$  作用于下垂控制中产生电

压和频率的参考值  $E^*$ 、 $\phi^*$ , 以此调节 PCC 处的电压和频率。同时,为了减小线路阻抗对下垂控制的影响,改善下垂控制的功率分配效果,增加了虚拟阻抗控制环;电压电流环则采用准比例谐振控制实现电流、电压的无静差控制<sup>[14-16]</sup>。而分布式二次控制主要采用动态一致性算法,获得全局平均电压和平均负序电流值,并与实际值相减求取偏差值,将其传送到一次控制层,实现对 PCC 点的电压不平衡补偿及负序电流均衡控制。

#### 3.1 动态一致性算法

一致性算法在协调控制、群体控制、复杂动态网络等领域得到了广泛应用<sup>[17]</sup>。一致性算法是一种异步算法且形式多样,为满足工程设计需要,本文选择动态一致性算法。为了便于分析下节所提的控制策略,本节对该算法作简要的介绍。

令  $x_i$  代表节点  $i$  的状态变量,节点只与其相邻节点通信。当且仅当所有节点的状态变量相同时,系统达到一致收敛。一阶连续时间一致性算法可表示为:

$$\dot{x}_i(t) = - \sum_{j \in N_i} a_{ij} [x_i(t) - x_j(t)] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中,  $x_i(t)$  为节点  $i$  的状态变量;  $n$  为智能节点的数目;  $N_i$  为与节点  $i$  相邻的节点组合;  $a_{ij}$  为节点连接图的邻接矩阵中对应元素,若节点  $i$  与节点  $j$  之间有链路,则  $a_{ij} = 1$ ,反之则为 0。

式(7)可用矩阵表示为:

$$\dot{\mathbf{X}} = -\mathbf{L}\mathbf{X} \quad (8)$$

式中,  $\mathbf{X}$  为  $x_i(t)$  组成的系统状态向量;  $\mathbf{L}$  为  $n \times n$  阶的拉普拉斯矩阵,由网络的拓扑结构决定。

由于实际系统为离散系统,因此,引入一阶离散动态一致性算法可以更好地分析一致性网络的动态特性,如(9)所示:

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \varepsilon \sum_{j \in N_i} w_{ij}(k) [x_j(k) - x_i(k)] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中,  $\varepsilon$  为调整系数;  $w_{ij}$  为节点连接图的邻接矩阵中对应元素。

为保证该算法在动态变化过程中的精确一致性,可进一步表示为:

$$x_i(k+1) = x_i(0) + \varepsilon \sum_{j \in N_i} \delta_{ij}(k+1) \quad (10)$$

式中,  $\delta_{ij}(k)$  为两个节点之间的累积偏差,且  $\delta_{ij}(0)$

=0。可以看出一致性收敛值取决于初始值  $x_i(0)$ 。

从系统的角度可将式(10)和式(11)写成如下所示的矩阵形式:

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{W}\mathbf{X}(k) \quad (12)$$

式中,  $\mathbf{X}(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k)]^T$ ;  $\mathbf{W} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ , 为权值矩阵。应用式(9)~式(12), 经过若干次迭代后, 每个节点的状态变量  $x_i$  将收敛于全局平均值  $\bar{x}_i$ , 如式(13)所示:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(0) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

式中,  $x_i(0)$  为第  $i$  个节点的初始值。但权值矩阵  $\mathbf{W}$  影响算法的收敛速度。而  $\mathbf{W}$  矩阵的构造可以采用以下两种方法: 快速线性迭代法<sup>[18]</sup> 和 Metropolis 法<sup>[19]</sup>。

采用文献[18]所提的快速线性迭代法, 构造权值矩阵  $\mathbf{W}$  为:

$$\mathbf{W} = \mathbf{I} - \varepsilon \mathbf{L} \quad (14)$$

$$\varepsilon = \frac{2}{\lambda_1(\mathbf{L}) + \lambda_{n-1}(\mathbf{L})} \quad (15)$$

式中,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵;  $\mathbf{L}$  为拉普拉斯矩阵;  $\lambda_m(\mathbf{L})$  为拉普拉斯矩阵的第  $m$  个最大特征值。

快速线性迭代法中通过计算可以找到最优权值矩阵  $\mathbf{W}$ 。但是权值矩阵  $\mathbf{W}$  中  $\varepsilon$  的计算, 必须知道拉普拉斯矩阵, 也就意味着网络拓扑结构已经确定且验证可行, 因此, 设计  $\mathbf{W}$  矩阵时首先要确定中心点。

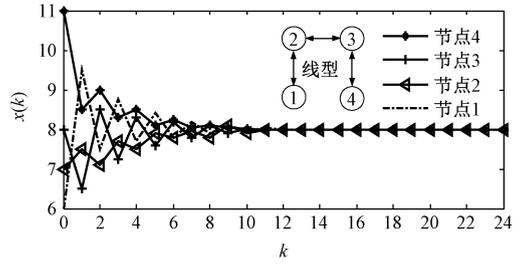
根据文献[19]所提 Metropolis 法, 构造权值矩阵  $\mathbf{W}$  为:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1/[\max(n_i, n_j) + 1] & j \in N_i \\ 1 - \sum_{j \in N_i} 1/[\max(n_i, n_j) + 1] & i = j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

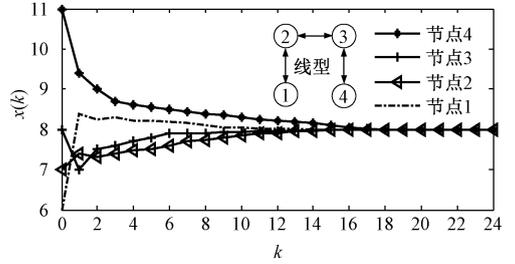
式中,  $w_{ij}$  为权值矩阵中的元素;  $\max(n_i, n_j)$  为本节点及相邻节点拥有邻居数目的较大值;  $N_i$  为与节点  $i$  相邻的邻居节点。利用 Metropolis 法计算权值因子  $w_{ij}$  仅需要知道节点  $i$  与节点  $j$  之间的关联程度, 通过节点间的信息共享, 即可计算出  $w_{ij}$ , 因此, 更适用于网络拓扑结构改变的情况。

为了对比两种方法构造的权值矩阵  $\mathbf{W}$  在不同网络拓扑下的收敛速度, 本文通过 Matlab/Simulink 软件进行仿真分析, 其结果如图4所示。设每个节点的初始值  $x(0) = [6, 7, 8, 11]$ , 两种拓扑结构分别为线型和环型。

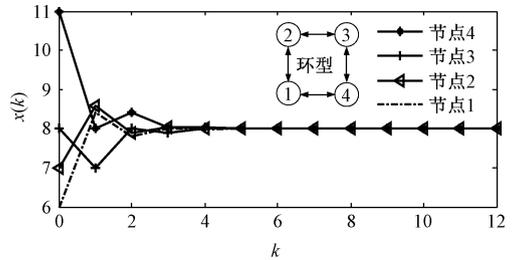
从图4可以看出, 在线型拓扑结构下, 快速线性迭代法收敛速度较快, 而在环型拓扑结构下, 两种方



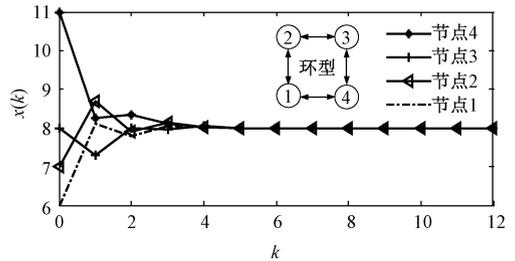
(a) 快速线性迭代法(线型)



(b) Metropolis法(线型)



(c) 快速线性迭代法(环型)



(d) Metropolis法(环型)

图4 不同权值矩阵和网络拓扑结构下的收敛特性  
Fig.4 Convergence characteristic of different weight matrices and network topologies

法的收敛情况基本相同。但当网络拓扑发生变化时, 快速线性迭代法要知道整个网络拓扑结构, 才能重新构造权值矩阵  $\mathbf{W}$ , 因此, 该方法无法应用到网络拓扑变化的情况。而 Metropolis 法适用于网络拓扑结构变化情况, 即使在网络故障情况下, 该方法仍具有较强的鲁棒性, 有利于实现“即插即用”功能。因此, 为保证系统的收敛且对通信延时具有较强的鲁棒性, 本文选用 Metropolis 法构造权值矩阵  $\mathbf{W}$ 。

### 3.2 负序电流均衡控制

为了提高负序电流的分配精度, 在二次控制层中增加了负序电流均衡控制环节, 具体工作过程为:

每个  $DG_i$  的二次控制层中的分布式控制器 (Distributed Controller, DCr) 采用动态一致性算法构造状态观测器获得平均负序电流值  $\bar{I}_{si}^-$ , 与一次控制层所得实际负序电流  $I_{si}^-$  相比较求差, 将差值  $\delta I$  送入比例积分控制器 (PI), 经限幅后, 得到补偿量  $NCB_{dq}$ , 计算公式如下:

$$NCB_{dq} = \left( \frac{k_{isc}^{dq}}{s} + k_{psc}^{dq} \right) (\bar{I}_{si}^- - I_{si}^-) \quad (17)$$

式中,  $k_{isc}^{dq}$  为 PI 控制器积分系数;  $k_{psc}^{dq}$  为 PI 控制器比例系数;  $I_{si}^-$  为  $DG_i$  侧实际电流的负序电流提取值;  $\bar{I}_{si}^-$  为通过动态一致性算法迭代估算获得的负序电流平均值;  $s$  表示拉普拉斯变量。

### 3.3 电压不平衡补偿控制

在二次控制层中, 分布式控制器用于计算电压不平衡补偿向量 (Unbalance Compensation Reference, UCR) 的工作过程, 如图 5 所示。

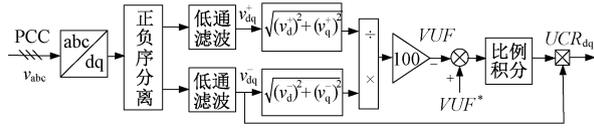


图 5 电压不平衡补偿向量计算原理图

Fig. 5 Vector calculation diagram of voltage unbalance

其工作过程为: 通过采集主电路中 PCC 的电压  $v_{abc}$ , 在 dq 坐标系下对其进行正负序提取得到正序和负序输出电压  $v_{dq}^+$ 、 $v_{dq}^-$ , 并经过低通滤波 (Low-Pass Filter, LPF), 提取得到 PCC 的正负序电压, 低通滤波器 (LPF) 传递函数如下:

$$G_{LPF}(s) = \frac{\omega_{cut}^2}{s^2 + 2\xi\omega_{cut}s + \omega_{cut}^2} \quad (18)$$

式中, 低通滤波器的截止频率和阻尼比分别为  $\omega_{cut} = 4\pi$  (rad/s)、 $\xi = 0.7$ 。

根据文献[3], 电压不平衡度计算公式如下:

$$VUF = \sqrt{\frac{(v_d^-)^2 + (v_q^-)^2}{(v_d^+)^2 + (v_q^+)^2}} \times 100\% \quad (19)$$

式中,  $v_d^+$ 、 $v_q^+$ 、 $v_d^-$ 、 $v_q^-$  分别为 PCC 处电压的 d 轴和 q 轴正、负序分量。

设电压不平衡度参考值为  $VUF^* = 0.5\%$ , 将设定的参考值  $VUF^*$  与实际计算的电压不平衡度  $VUF$  求差, 将差值送入 PI 控制器中, 得到 dq 坐标系下电压不平衡补偿向量  $UCR_{dq}$  如下:

$$UCR_{dq} = (VUF^* - VUF) \left( \frac{k_{isv}^{dq}}{s} + k_{psv}^{dq} \right) v_{dq}^- \quad (20)$$

式中,  $k_{isv}^{dq}$  为 PI 控制器积分系数;  $k_{psv}^{dq}$  为 PI 控制器比例系数。

最后, 将  $UCR_{dq}$  与负序电流均衡控制环节所得的电压补偿参考  $NCB_{dq}$  叠加, 经  $\alpha\beta$  坐标变换后得到电压不平衡补偿参考向量  $UCR_{\alpha\beta}$ , 送一次控制层, 作为产生电压控制环参考值的补偿。

## 4 仿真与实验分析

为了验证所提控制方法的有效性, 基于 Matlab/Simulink 软件平台搭建交流电网仿真模型, 其结构如图 6 所示。该仿真模型由 3 台容量均为  $3kV \cdot A$  的分布式发电单元 DG 和线性负载组成; 各 DG 单元通过静态开关接至公共母线, 公共母线通过静态开关接至配电网中。其中,  $DG_1$  和  $DG_2$  到 PCC 的线路导纳均为  $Y_1 = Y_2 = 0.38 - j1.32$  (S),  $DG_3$  到 PCC 的线路导纳为  $Y_3 = 0.07 - j0.47$  (S), 逆变器的开关频率为 10kHz, 主电路和二次控制系统的仿真参数见表 1。由于在仿真与实验过程中, 通信过程主要包括节点间的组织过程、控制指令的传输过程以及一致性算法的迭代过程, 对通信带宽要求不高。因此, 通信网络选用带宽为 100Mbit/s 的光纤以太网。

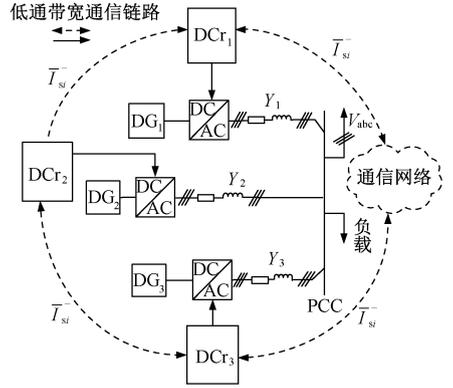


图 6 测试系统仿真结构

Fig. 6 Test system of simulation studies

表 1 主电路和二次控制参数

参数	数值
额定相电压峰值 $V_0/V$	311
额定频率 $f_0/Hz$	50
滤波电感 $L/mH$	1.8
滤波电容 $C/\mu F$	25
虚拟电感 $L_v/mH$	4
虚拟电阻 $R_v/\Omega$	1
电压不平衡 PI 比例系数 $k_{psv}^{dq}$	0.5
电压不平衡 PI 积分系数 $k_{isv}^{dq}/s^{-1}$	7
电流均衡 PI 比例系数 $k_{psc}^{dq}$	2
电流均衡 PI 积分系数 $k_{isc}^{dq}/s^{-1}$	2

本文以图6所示的低带宽通信网络拓扑结构为例,根据Metropolis法构造权值矩阵 $W$ 。由于通信链路是双向的,则邻接矩阵 $A$ 如下所示:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

因此,根据式(16)计算得到权值矩阵 $W$ 如下所示:

$$W = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & 0 \\ \frac{1}{3} & 0 & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad (22)$$

#### 4.1 不平衡补偿及负序电流均衡策略仿真验证

设电压不平衡度参考值 $VUF^* = 0.5\%$ ,电压不平衡补偿和负序电流均衡测试运行结果如图7所示。

$T_0 \sim T_1$ 时刻为起始阶段,在系统中接入一个1.5kW的纯阻性平衡负载,此时PCC处 $VUF$ 很低,如图7(a)所示,并且只有很小负序电压和电流存在,如图7(b)和图7(c)所示。

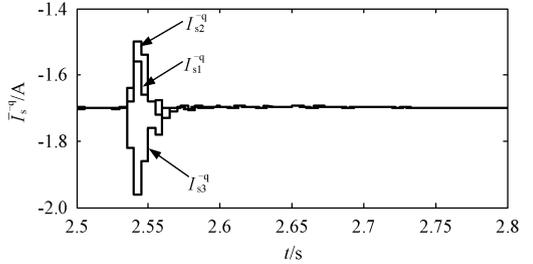
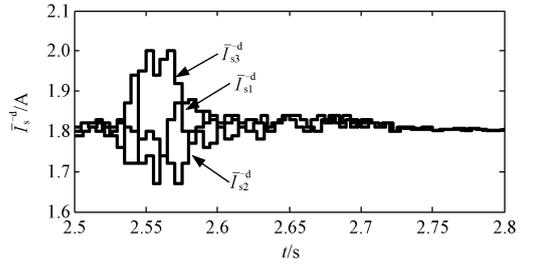
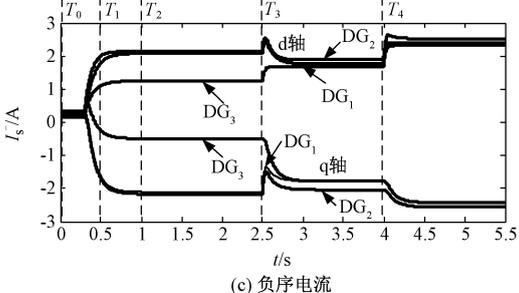
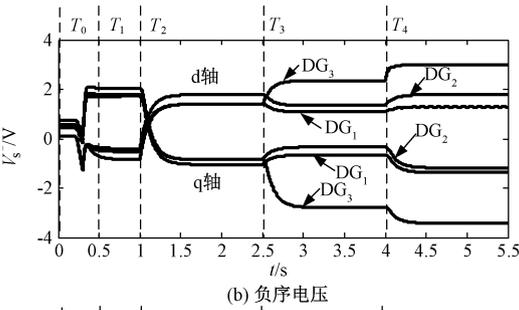
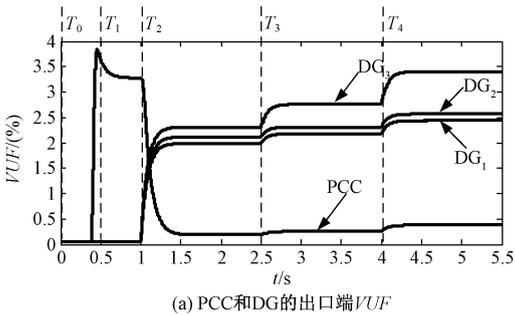


图7 系统仿真波形

Fig.7 Simulation waveform of system

$T_1 \sim T_2$ 时刻为接入不平衡负载阶段,由于接入不平衡阻性负载,造成PCC处的 $VUF$ 升高为3.3%,远高于参考值 $VUF^*$ ,如图7(a)所示。同时,负序电压和负序电流也随之增大,如图7(b)和图7(c)所示。由于系统中没有启动电压不平衡补偿和负序电流均衡控制环节,仅采用下垂控制,故三个DG的负序电流易受线路阻抗影响各不相同。

$T_2 \sim T_3$ 时刻为电压不平衡补偿阶段,在 $T_2$ 时刻启动二次控制层的电压不平衡补偿环节,但没有考虑负序电流均衡控制。通过调节DG侧的负序电压,使得PCC上的 $VUF$ 减小到约为0.25%,低于设定的参考值0.5%,如图7(a)和图7(b)所示。由于没有考虑负序电流均衡控制,虽然PCC的电压不平衡得到补偿, $VUF$ 达到了要求,但是各DG的负序电流易受线路阻抗影响,不能按照给定容量1:1:1分配。

$T_3 \sim T_4$ 时刻为电压不平衡补偿和负序电流均衡控制阶段,在 $T_3$ 时刻启动负序电流均分控制,首先,采用动态一致性算法计算出全局的一致平均值( $\bar{I}_{s1}^-, \bar{I}_{s2}^-, \bar{I}_{s3}^-$ ),具体的dq轴负序电流平均值迭代计算过程如图7(d)和图7(e)所示。在小于0.2s的时间内,三个DG的负序电流将收敛于一致的平均值( $\bar{I}_{s1}^-, \bar{I}_{s2}^-, \bar{I}_{s3}^-$ ),并将该值作为参考值,通过调整各DG侧的负序电压,使各DG按照容量比例分配负载的负序电流,如图7(b)和图7(c)所示。

为测试不平衡负荷变化情况下系统的性能,在

$T_4$  时刻,增加接入的不平衡负荷。增加负荷后,系统负序电压和负序电流相应增大, $VUF$  也明显增大了,约为 0.45%,如图 7(a)、图 7(b) 和图 7(c) 所示。但因为采用所提的控制策略,系统仍然能保持 PCC 处的  $VUF$  在设定的参考值范围内,并且保证总的负序电流在 DG 间按照容量比例分配。

因此,所提控制策略不仅能够实现电压不平衡补偿与负序电流协同控制,保证 PCC 的负序电流按照各 DG 的容量比例分配,且系统具有较好的动态性能。

为了验证算法的收敛特性和即插即用功能,通过 DG 在线切除/加入系统,以验证负序电流的均分效果,其运行结果如图 8 所示。在  $T'_0$  时刻,加入不平衡负载,DG 间的负序电流没有均分。在  $T'_1$  时刻,启动负序电流均分控制。从图 8 中可以看出负序电流被精确均分。在  $T'_2$  时刻,切除  $DG_1$ ,剩余两个 DG 的负序电流将继续被均分。在  $T'_3$  时刻, $DG_1$  重新加入系统,负序电流在 DG 间再次被重新均分。因此,所提的控制策略能实现负序电流均分控制和 DG 的即插即用。

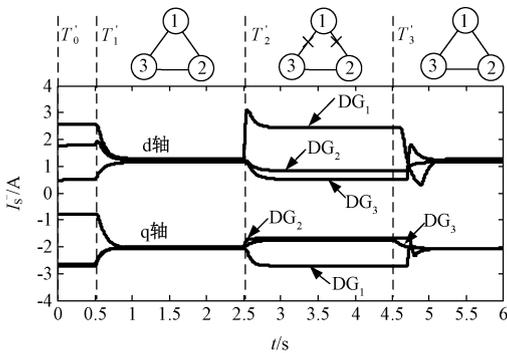


图 8 DG 单元的切除/加入验证

Fig. 8 Validation of excluding/including unit

#### 4.2 不平衡补偿与负序电流均衡控制的实验验证

为了进一步对所提控制策略的有效性进行实验验证,搭建了一套基于 dSPACE1103 的 3 台逆变器并联的微电网实验平台。其中,每台逆变器的容量为 3kW,其拓扑结构如图 6 所示,具体参数及通信带宽与仿真所设置的参数一致。

为了实验验证阻性负载不平衡工况下的补偿效果,在 a 相和 b 相接入 100Ω 阻性负载,其实验结果如图 9 所示。图 9(a) 为 PCC 补偿前后的电压变化波形,可以看出,补偿前电压呈现较明显的不平衡,而经补偿后,电压趋于平衡。图 9(b)、图 9(c) 为

$DG_1$  机端在加入不平衡补偿前后电压变化情况,在补偿前三相电压是平衡的,但经过补偿后, $DG_1$  的三相电压出现明显的不平衡。这是因为通过调控  $DG_1$  的机端电压来对 PCC 电压进行补偿,故  $DG_1$  的机端电压经补偿后出现不平衡, $DG_2$  和  $DG_3$  情况类似  $DG_1$ 。

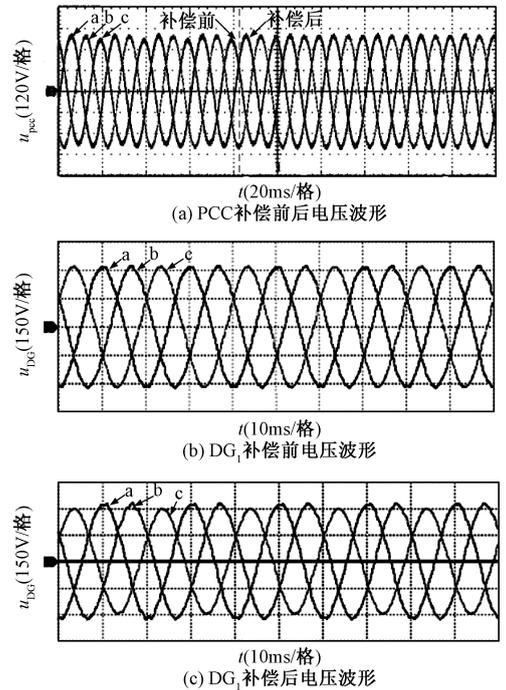


图 9 电压不平衡补偿前后 PCC 和 DG 输出电压波形

Fig. 9 Waveforms of PCC and DG output voltage before and after voltage unbalance compensation

同时,为了验证负序电流均衡控制的效果,在实验测试中设置 3 个 DG 的容量为 2:2:1,实验过程与仿真一致,其补偿前后的 a 相基波负序电流波形如图 10 所示。

图 10(a) 为负序均衡控制前的基波负序电流,显然,3 个 DG 的负序电流不能按照设置的容量比例分配。但在投入负序均衡控制后,基波负序电流按照设置的容量比例(2:2:1)分配,实验结果如图 10(b) 所示。在增加不平衡负载后,a 相基波负序电流增大,但仍可实现 DG 间基波负序电流按比例分配,实验结果如图 10(c) 所示。该实验验证了所提的负序均衡控制方法可以提高负序电流分配精度,有效减少 DG 间的环流。验证了本文所提的基于动态一致性算法的分布式协同控制策略能够实现电压不平衡补偿和负序电流均衡控制,提高 PCC 的电压质量。

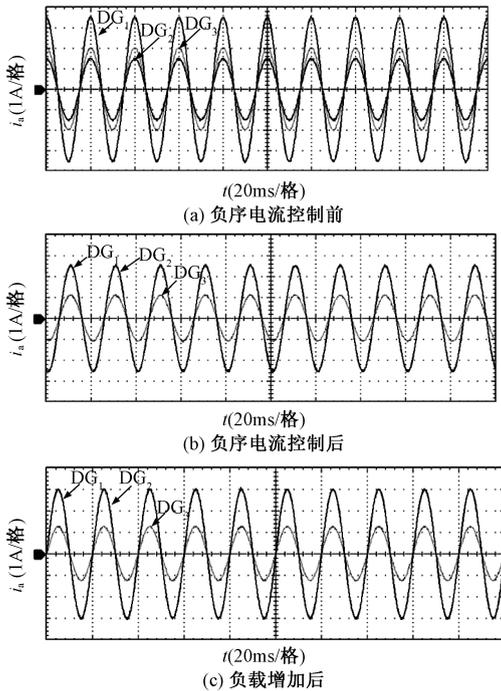


图10 电流均衡控制前后 DG 端 a 相基波负序电流

Fig. 10 a phase negative sequence current of DG before and after current balanced control

## 5 结论

本文针对微电网公共耦合点的电压不平衡及负序电流难以均衡分配的问题,提出基于动态一致性算法的电压不平衡补偿和负序电流均衡控制策略。虽然,采用分布式二次控制策略可以实现电压不平衡补偿,但是 PCC 点的负序电流受线路阻抗各异的影响,无法通过下垂控制在各 DG 间均衡分配,易导致线路阻抗小的 DG 过流。因此,本文通过在二次控制层中加入负序电流均衡控制环节,并采用动态一致性算法估算得到全局平均负序电流,实现 DG 间负序电流均衡分配控制。仿真与实验结果表明,所提的控制策略能够实现电压的不平衡补偿和 DG 间的负序电流均衡控制。同时也验证了采用动态一致性算法时系统具有较好的动态性能,能够实现“即插即用”。

## 参考文献 (References):

[ 1 ] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等 (Yang Xinfu, Su Jian, Lv Zhipeng, et al.). 微电网技术综述 (Overview on micro-grid technology) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (1): 57-70.

[ 2 ] 朱永强, 贾利虎, 王银顺 (Zhu Yongqiang, Jia Lihu,

Wang Yinshun). 微电网结构设计的基本原则 (Basic design principles for micro-grid architecture) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (9): 44-63.

- [ 3 ] 周洁, 罗安, 陈燕东, 等 (Zhou Jie, Luo An, Chen Yandong, et al.). 低压微电网多逆变器并联下的电压不平衡补偿方法 (Voltage unbalance compensation for low-voltage microgrid with multi parallelly connected inverters) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2014, 38 (2): 412-418.
- [ 4 ] Majumder Ritwik. Some aspects of stability in microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28 (3): 3243-3252.
- [ 5 ] Savaghebi M, Guerrero J M, Jalilian A, et al. Experimental evaluation of voltage unbalance compensation in an islanded microgrid [J]. IEEE Transaction on industrial Electronics, 2011, 30 (21): 1453-1458.
- [ 6 ] 陈萌, 肖湘宁 (Chen Meng, Xiao Xiangning). 孤岛微电网分布式电压不平衡补偿控制策略 (Distributed control strategy for voltage unbalance compensation in islanded microgrid) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2017, 41 (8): 45-51.
- [ 8 ] Shafieem Q, Stefanovic C, Dragicevic T, et al. Robust networked control scheme for distributed secondary control of islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61 (10): 5363-5374.
- [ 9 ] Wu D, Dragicevic T, Vasquez J C, et al. Secondary coordinated control of islanded microgrids based on consensus algorithms [A]. 2014 IEEE Energy Conversion Congress & Exposition [C]. Pittsburgh, USA, 2014. 4290-4297.
- [ 10 ] Wu Lizhen, Yang Xusheng, Hao Xiaohong, et al. Networked hierarchical control scheme for voltage unbalance compensation in an islanded microgrid with multiple inverters [J]. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 2015, 11 (6): 2089-2102.
- [ 11 ] ANSI C84. 1-1995, Electric power systems and equipment - voltage ratings (60 Hertz) [S].
- [ 12 ] IEEE Standard 1547-2003, IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems [S].
- [ 13 ] Wu Lizhen, Lei Aihu, Hao Xiaohong. Distributed secondary control strategies for reactive power sharing and voltage restoration in islanded microgrids [J]. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 2017, 13 (2): 641-657.
- [ 14 ] Savaghebi M, Jalilian A, Vasquez J C, et al. Autono-

mous voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (4): 1390-1402.

[15] Ovalle A, Ramos G, Bacha S, et al. Decentralized control of voltage source converters in microgrids based on the application of instantaneous power theory [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62 (2): 1152-1162.

[16] 谢永流, 程志江, 李永东, 等 (Xie Yongliu, Cheng Zhijiang, Li Yongdong, et al.). 引入虚拟阻抗的并联逆变器新型下垂控制策略 (New droop control strategy for parallel inverter with virtual impedance) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (3): 22-25.

[17] 龙慧, 樊晓平, 刘少强, 等 (Long Hui, Fan Xiaoping,

Liu Shaoqiang, et al.). 多智能体系统分布式一致性算法研究现状 (Review of distributed consensus problem in multi-agent system) [J]. 计算机工程与应用 (Computer Engineering and Applications), 2013, 49 (1): 36-42, 81.

[18] Meng Lexuan, Dragicevic T, Roldan-Perez J, et al. Modeling and sensitivity study of consensus algorithm-based distributed hierarchical control for DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7 (3): 1504-1515.

[19] Liu Wei, Gu Wei, Sheng Wanxing, et al. Decentralized multi-agent system-based cooperative frequency control for autonomous microgrids with communication constraints [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5 (2): 446-456.

## Coordinated control strategy for voltage unbalance considering negative sequence current sharing in islanded microgrids

WU Li-zhen<sup>1,2</sup>, LIU Teng-fei<sup>1</sup>, HAO Xiao-hong<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. National Active Distribution Network Technology Research Center, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Due to the existence of a large number of single-phase load and non-linear load at the point of common coupling (PCC), islanded microgrids is prone to three-phase voltage unbalance and negative sequence current cannot be well shared among distributed generations (DGs). To solve this problem, under the analysis of unbalanced compensation and negative sequence current sharing mechanism, a voltage unbalance compensation and negative sequence current sharing control strategy based on dynamic consensus algorithm is proposed. In the distributed secondary control level, real-time data exchange between the neighboring DGs is realized by distributed sparse communication network. The dynamic consensus algorithm is used to evaluate the global average voltage and negative sequence current, which adaptively regulates the voltage reference value and voltage unbalance compensation reference vector of the droop control to achieve voltage unbalance compensation and negative sequence current sharing control. The control method not only compensates the voltage unbalance at point of common coupling, but also realizes the negative sequence current sharing control due to distribution line differences between DGs. Finally, the simulation and experiments show that the proposed method is effective and feasible.

**Key words:** microgrid; voltage unbalance compensation; negative sequence current sharing control; consensus algorithm