

含母线电压补偿和负荷功率动态分配的 直流微电网协调控制

李祥山¹, 杨晓东¹, 张有兵¹, 徐志成², 谢路耀¹, 陆海强³

(1. 浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 国网能源研究院有限公司, 北京 102209;

3. 嘉兴市恒创电力设备有限公司 技术研发中心, 浙江 嘉兴 314033)

摘要:针对孤岛直流微电网需要独自承担系统母线电压稳定和精确的功率分配,提出了含母线电压补偿和负荷功率动态分配的协调控制策略。在主控制层中采用下垂控制来实现分布式电源之间的功率共享;在下垂控制的基础上,提出了考虑电压调节控制和电流校正控制的分布式二次控制,其对传统下垂控制带来的直流母线电压跌落进行补偿,使得母线电压恢复到额定值;通过对下垂系数的不断调整,达到了负荷功率分配的高精度。最后,利用MATLAB/Simulink对所设计的控制策略在不同运行模式下进行仿真验证,仿真结果表明所提的控制策略可以实现直流微电网的稳定运行和负荷功率的动态分配,且能够满足分布式电源即插即用等要求。

关键词:直流微电网;下垂控制;分布式二次控制;电压恢复;功率分配

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201912011

0 引言

近年来,由于环境问题的日益突出和可再生能源在电力系统中的比重不断提升,分布式能源得到了迅速发展^[1-2]。作为一种解决分布式能源接入电网问题的方式,学者们提出了微电网的概念^[3-4]。微电网中存在大量光伏、储能装置及燃料电池等具有直流输出形式的分布式电源(DG),且直流系统不存在相位同步、谐波和无功功率损耗等方面的问题,提高了供电的电能质量和可靠性,因此近年来直流微电网逐渐得到了学者们的重视^[5-7]。

在直流微电网系统中,母线电压是反映系统稳定和源荷功率平衡的关键指标,负荷功率在不同变流器之间的分配是直流微电网运行的一项重要研究内容^[8-10]。由于下垂控制在无需高频通信的状态下就能实现负荷功率的共享,满足了分布式接入的需求,因此其在直流微电网控制中得到了广泛应用^[11-13]。然而,传统的下垂控制在直流母线电压调节和负荷功率分配方面存在内在矛盾,线路阻抗以及变流器输出阻抗也会影响负荷功率的分配精度。为了解决上述问题,学者们引入了适用于微电网的二次控制策略,克服了下垂控制带来的缺陷^[14-16]。文献[14]提出下垂控制和母线稳压控制器的组合。文献[15]提出一种集自适应观测技术、滑模控制方

法、非线性控制实现对母线电压和系统稳定控制的目标。但该方法下母线电压波动较大,且其对变流器的调节能力要求较高。文献[16]提出一种集中式二次补偿控制,其电压偏差被馈送到中央控制器,然后控制信号被发送给所有的DG。需要注意的是,这种集中式控制通常是在单一的控制器的上实现的,该控制器存在一定的限制,如容易遭受单点故障、无法满足即插即用等要求。文献[17]提出一种以全局通信的方式得到DG的输出电流,利用平均电流共享的控制方法恢复母线电压。这种集中通信的控制方法能够克服集中控制对中央控制器的依赖,但对通信技术的要求较高。

为了克服上述问题,学者们提出分布式二次补偿控制。从本质上看,二次控制是对传统下垂控制的改进方案,分布式二次控制即通过各单元本地的控制器进行二次调节,不需要额外的集中式控制器,并且利用低宽带通信可以与相邻的控制器进行交互,这种方法可以避免集中式存在的单点故障问题。因此,大多数二次控制都倾向于采用分布式控制策略^[18-20]。文献[21]提出一种新的直流微电网分散控制器,其需要由所有DG提供电流的平均值来计算补偿信号,然后将其添加到常规的下垂控制层中。但是,该方法没有讨论如何获得电流的平均值。文献[22]提出一种基于对等稀疏网络的分布式二次调节策略,该策略利用离散一致性算法,仅通过与邻居节点的有限通信实现分布式单元功率均分及系统平均电压的调节。文献[23]提出一种混合方案,包括用于负荷功率共享的集中式方案和用于母线电压调节的分布式方案,该方法利用每个变流器的输出电流的偏差来更新下垂系数。文献[24]提出基于全局

收稿日期:2018-12-09;修回日期:2019-10-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777193);中国博士后创新人才支持计划资助项目(BX20190126)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777193) and the National Postdoctoral Program for Innovative Talents of China(BX20190126)

下垂增益和总负载电流的分布式补偿方法。文献[25]提出一种基于分布式多代理系统的孤岛微电网二次电压控制策略,其将 DG 看作系统中的代理,将二次电压控制等效为多代理系统的追踪同步问题。但是这些方法都忽视了线缆阻抗的存在,没有考虑到在实际微电网中线缆阻抗对负荷功率分配精度的影响。

在上述背景下,本文针对孤岛直流微电网,提出含母线电压补偿和负荷功率动态分配功能的独立直流微电网控制策略。该策略不仅能够将直流母线电压恢复到参考值,且能够保持下垂控制带来的分配精度。所提的分布式二次控制可以实现与集中式控制相同的目标。利用二次控制对传统下垂控制带来的直流母线电压跌落进行补偿,使得母线电压恢复到额定值;通过对下垂系数的不断调整,达到了负荷功率分配的高精度,在理论上分析了设计控制器的有效性,且通过仿真验证了所提方法的可行性。最后,通过仿真分析验证了所提方法具有即插即用性以及可以抵抗通信故障带来的影响。

1 直流微电网结构与控制

1.1 直流微电网结构

图 1 为适用于家庭或楼宇的低压直流微电网系统典型结构图。根据微电源性质的不同,将微电源分为 DG 及储能装置(ES)。当微电网处于孤岛运行模式时, DG 通过变流器接入直流母线且各 DG 变流器利用低宽带通信网络,仅根据 DG 自身和邻居节点的测量信息,控制各自的输出电压和电流,实现微电网内母线电压的稳定以及负荷功率的合理分配。

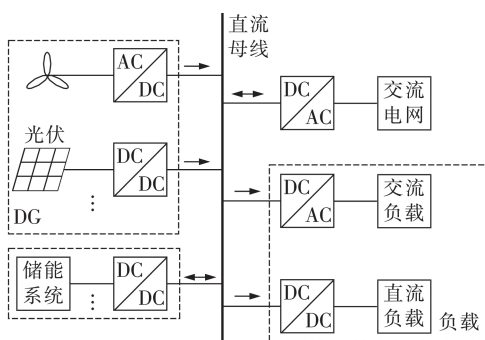


图 1 直流微电网结构

Fig.1 Structure diagram of DC microgrid

1.2 传统下垂控制

直流微电网中往往存在多个发电单元和储能单元,以实现冗余功能。微电网处于孤岛模式时,需要自动维持供需平衡。下垂控制通常在直流微电网中作为一次控制,在维持系统稳定运行方面发挥重要作用。一般地,双变流器并联等效电路图如图 2 所示。以 2 台并联电压源型变流器为例对传统下垂控

制进行分析:

$$u_{dci} = u_{dc}^* - (R_{di} + R_{linei}) i_{dci} \quad (1)$$

其中, u_{dci} 为变流器 i 的输出电压; u_{dc}^* 为变流器输出电压参考值,即 DG 的输出电流为 0 时的变流器输出电压; i_{dci} 为变流器 i 的输出电流; R_{di} 为变流器 i 的虚拟阻抗,即下垂系数; R_{linei} 为变流器 i 的线缆阻抗。

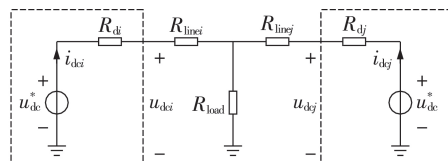


图 2 双变流器并联等效电路图

Fig.2 Parallel equivalent circuit diagram of two converters

若要使变流器输出功率按各自的额定容量呈比例分配,各节点的输出电流关系应满足:

$$\frac{i_{dci}}{i_{dcj}} = \frac{R_{dj} + R_{linej}}{R_{di} + R_{linei}} \approx \frac{R_{dj}}{R_{di}} = \eta_{i,j} \quad (2)$$

其中, $\eta_{i,j}$ 为变流器 i 与变流器 j 额定容量比。从式(2)中可以看出,各变流器输出电流与其下垂系数和对应线缆阻抗呈比例关系。一般情况下,加入下垂控制的变流器,相当于虚拟了一个串联阻抗,即增加了固有的输出阻抗,使其等效的输出阻抗远大于线缆阻抗,从而可以忽略线缆阻抗对分流精度的影响。

由式(1)可知,引入下垂控制后变流器输出电压会有一个压降,为了保证电压跌落在允许范围内,下垂系数应取决于直流微电网系统内允许的最大电压扰动 Δu_{max} ,满足式(3)。

$$\Delta u_{dci} = R_i i_{dci} \leq \Delta u_{max} \quad (3)$$

$$R_i = R_{di} + R_{linei} \quad (4)$$

2 分布式二次控制策略

下垂控制可有效解决微电网功率分配问题,且具有实现容易、无需通信互连线等优点。但采用下垂控制会引起变流器输出端电压低于其给定参考值,当并联变流器输出端至直流母线的线缆阻抗差异较大时,各换流器难以按照初始固定的下垂系数比分配负荷功率,应通过调节下垂系数使各变流器按各自的额定容量呈比例分配负载功率。下文阐述的分布式二次控制可以有效地对电压偏离进行补偿,并且提高并联变流器的功率分配精度。

2.1 修正母线电压控制

由第 1 节分析可知,本小节的目的是将变流器输出电压 u_{dc} 恢复到电压参考值 u_{dc}^* 。由于本文所研究的控制系统中,各 DG 均处于同一场景下,所受气候和环境影响一致,各 DG 的变流器输出电压近乎一致。基于平均一致性协议^[20],可以将平均电压代

替实际输出电压。

定义电压偏差为:

$$e^u = u_{dc}^* - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{dci} \quad (5)$$

通过修正偏差,在一个有限时间 T 内,补偿输出电压的跌落,即:

$$\lim_{t \rightarrow T} e^u(t) = 0 \quad (6)$$

$$e_{vi} = \alpha_i e^u \quad (7)$$

其中, α_i 为增益系数; e_{vi} 为在原电压偏差 e^u 的基础上增加系数 α_i 后的电压误差,目的是为了结合电流误差 e_{di} 更好地控制系统的稳定性。则输出电压的补偿量可表示为:

$$\partial u_i = K_{PVi} e_{vi} + K_{Ivi} \int e_{vi} dt \quad (8)$$

其中, K_{PVi} 和 K_{Ivi} 为第 i 个DG的输出电压控制器的PI参数。

本文首先计算变换器输出电压平均值,然后将初始直流母线参考电压 u_{dc}^* 与输出电压平均值进行做差,差值经过PI调节为 ∂u_i ,叠加到初始直流母线参考电压上,相当于抬升了参考电压数值,对母线参考电压的抬升作用图见附录图A1。

基于以上分析,可以克服传统下垂控制带来的母线电压跌落,即式(1)可以改写为:

$$u_{dci} = u_{dc}^* - R_{di} i_{dci} + \partial u_i \quad (9)$$

从式(9)易看出,改进的下垂控制还是存在一定的缺陷,即无法准确地满足式(2),即改进的下垂控制无法满足功率分配的精度。基于这种需求,下文将继续对上述控制策略进行补充修正。

2.2 电流矫正控制

本小节中,直流微电网控制的目标是通过动态调整下垂系数使负载功率按变流器容量呈比例分配。定义单位输出电流 $i_{dci}^{pu} = i_{dci} / i_i^{\max}$,其中 $i_i^{\max}$ 为第 i 个DG的额定输出电流。通过补偿信号实时调节下垂系数,使各变流器的单位输出电流一致,就可以保证负载功率分配的精度,即:

$$\frac{i_{dci}}{i_i^{\max}} = \frac{i_{dcj}}{i_j^{\max}} \quad (10)$$

为使所研究的控制系统具有可扩展性,在具有多个节点,但某一条通信链路发生故障时,为了不影响整个控制系统,各节点均采用其相邻节点的平均值。基于平均一致性协议^[20],定义电流分配误差为:

$$e^i = \frac{i_{dci}}{q_i} - \frac{1}{n} \sum_{j \in N_i} \frac{i_{dcj}}{q_j} \quad (11)$$

其中, N_i 为第 i 个DG的邻居集; q_i 和 q_j 为恒定的比率系数,满足式(12)。

$$\frac{q_i}{i_i^{\max}} = \frac{q_j}{i_j^{\max}} \quad (12)$$

通过控制修正,在一个有限时间 T 内各DG的单

位输出电流将趋于平均一致,即:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow T} \left(\frac{i_{dci}}{q_i} - \frac{i_{dcj}}{q_j} \right) = 0 \\ \frac{i_{dc1}}{q_1} = \frac{i_{dc2}}{q_2} = \dots = \frac{i_{dci}}{q_i} = \dots = \frac{i_{dcn}}{q_n} = i_{avg} \end{cases} \quad (13)$$

$$e_{di} = \beta_i e^i \quad (14)$$

其中, i_{avg} 为参与二次控制的各DG单位输出电流的平均值; β_i 为增益系数; e_{di} 为在原电流偏差 e^i 的基础上增加系数 β_i 后的电流误差,目的是为了结合电压误差 e_{vi} 更好地控制系统的稳定性。则通过调整下垂系数的电流矫正环可表示为:

$$\partial d_i = K_{PCi} e_{di} + K_{ICi} \int e_{di} dt \quad (15)$$

$$r_{di} = R_{di} + \partial d_i \quad (16)$$

其中, K_{PCi} 和 K_{ICi} 为第 i 个DG的输出电流矫正环的PI参数。

针对变流器 i ,可以对 i_{dci}/q_i 与 $\left(\sum_{j \in N_i} i_{dcj}/q_j \right)/n$ 进行

比较,若前者较大,则增加变流器 i 下垂系数,等效于增加输出阻抗,相应地输出电流减少;若前者较小,则减小变流器 i 下垂系数,等效于减小输出阻抗,相应地输出电流增加。下垂系数调整效果图见附录图A2。

$$R_{di}(k+1) = R_{di}(k) + \partial d_i \quad (17)$$

式(17)表示下一时刻的下垂系数由上一时刻的下垂系数和系数调整量决定。

基于以上分析,可以设计一个含母线电压补偿和负荷功率动态分配的直流微电网协调控制策略,即由式(9)、式(15)和式(16)可得:

$$u_{dci} = u_{dc}^* - r_{di} i_{dci} + \partial u_i \quad (18)$$

从式(18)可以看出,采用这种改进的新型下垂控制策略既可以稳定母线电压也满足负荷功率分配的精度,控制策略详细图见图3。

2.3 分布式控制通信网络的拓扑结构

分布式控制系统中将每一个变流器看成一个节点,各个节点依据平均值估计一致性协议,与其相邻节点进行信息交流使得整个网络最终状态趋于一致。为了便于传递信息,该通信结构不需要与实际的直流微电网有相同的拓扑结构,只需各个变流器与其相邻的变流器之间交换变量,并根据其相邻节点的数据信息和自身的测量数据更新控制变量。基于此,本文采用双向环形网络的通信结构,如图4所示。即使某一通信链路出现故障,整个系统各个节点之间仍能保持通信连接,其可靠性较高。

3 二次控制稳定性分析

本节中,将对所提的分布式二次控制(式(18))

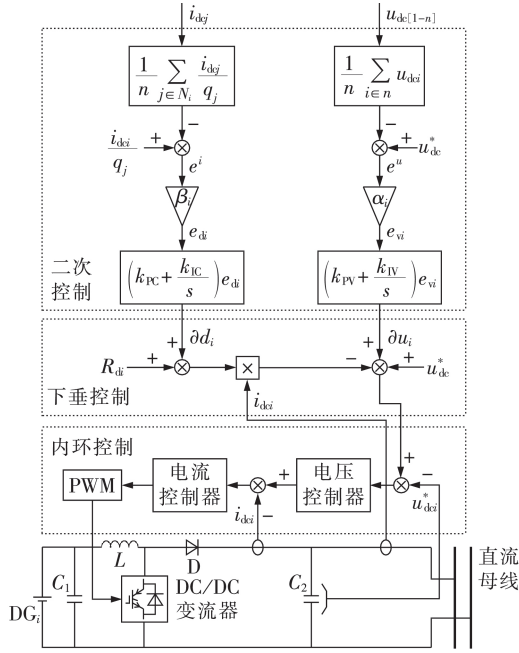


图 3 二次补偿控制框图

Fig.3 Control block diagram of secondary compensation

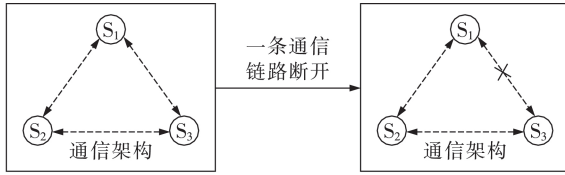


图 4 双向环形网络的通信结构

Fig.4 Communication structure of bi-directional toroidal network

的有效性进行理论分析,令:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{dci} = u_{avg} \approx u_b \quad (19)$$

其中, u_{avg} 为系统的平均电压; u_b 为微电网内直流母线的实际电压。在本文中,假设负载都是阻性负载,则有:

$$u_b = \mathbf{1}_{n \times 1}^T \mathbf{I} \mathbf{R}_l \quad (20)$$

其中, $\mathbf{1}_{n \times 1}$ 为所有元素都为 1 的 n 维向量; $\mathbf{R}_l$ 为负载电阻; $\mathbf{I} = [i_1 \ i_2 \ \cdots \ i_n]^T$ 。

所提的分布式二次控制可以定义为:

$$\mathbf{e}_v = \alpha \mathbf{e}^u \mathbf{1}_{n \times 1} - \beta \mathbf{L} \partial \mathbf{u} \quad (21)$$

$$\partial \dot{\mathbf{U}} = \mathbf{K}_p \dot{\mathbf{e}}_v + \mathbf{K}_i \mathbf{e}_v \quad (22)$$

其中, $\mathbf{L}$ 为通信架构的拉普拉斯矩阵; $\partial \mathbf{u} = [\partial u_1 \ \partial u_2 \ \cdots \ \partial u_n]^T$; $\beta = \text{diag}[\beta_1 \ \beta_2 \ \cdots \ \beta_n]$; $\mathbf{K}_p = \text{diag}[K_{p1} \ K_{p2} \ \cdots \ K_{pn}]$; $\mathbf{K}_i = \text{diag}[K_{i1} \ K_{i2} \ \cdots \ K_{in}]$; $\mathbf{e}_v = [e_{v1} \ e_{v2} \ \cdots \ e_{vn}]^T$; $\alpha = \text{diag}[\alpha_1 \ \alpha_2 \ \cdots \ \alpha_n]$ 。

在本文中,采用所提的二次控制(式(18))要确保母线电压恢复到额定值;确保负荷功率分配的高精度,即式(2)成立。

联立式(5)和式(18)~(20)可以得到:

$$\mathbf{e}^u \mathbf{1}_{n \times 1} = (\mathbf{u}_{dc}^* - \mathbf{R}_l \mathbf{1}_{n \times 1}^T \mathbf{I}) \mathbf{1}_{n \times 1} = (\mathbf{R} + \partial \mathbf{d}) \mathbf{I} - \partial \mathbf{u} \quad (23)$$

$$(\mathbf{R} + \partial \mathbf{d} + \mathbf{R}_l \mathbf{1}_{n \times 1} \mathbf{1}_{n \times 1}^T) \mathbf{I} = \mathbf{u}_{dc}^* \mathbf{1}_{n \times 1} + \partial \mathbf{u} \quad (24)$$

令 $\mathbf{A} = \mathbf{R} + \partial \mathbf{d} + \mathbf{R}_l \mathbf{1}_{n \times 1} \mathbf{1}_{n \times 1}^T$, 根据文献[26]的证明, $\mathbf{A}$ 是可逆的,且 $\mathbf{A}$ 的逆矩阵是对角元素为正的严格对角矩阵,则:

$$\mathbf{I} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{u}_{dc}^* \mathbf{1}_{n \times 1} + \mathbf{A}^{-1} \partial \mathbf{u} \quad (25)$$

将式(25)代入式(23)有:

$$\mathbf{e}^u \mathbf{1}_{n \times 1} = (\mathbf{R} + \partial \mathbf{d}) \mathbf{I} - \partial \mathbf{u} =$$

$$(\mathbf{R} + \partial \mathbf{d}) \mathbf{A}^{-1} \mathbf{u}_{dc}^* \mathbf{1}_{n \times 1} + [(\mathbf{R} + \partial \mathbf{d}) \mathbf{A}^{-1} - \mathbf{E}] \partial \mathbf{u} =$$

$$(\mathbf{R} + \partial \mathbf{d}) \mathbf{A}^{-1} \mathbf{u}_{dc}^* \mathbf{1}_{n \times 1} - \mathbf{R}_l \mathbf{1}_{n \times 1} \mathbf{1}_{n \times 1}^T \mathbf{A}^{-1} \partial \mathbf{u} \quad (26)$$

将式(26)代入式(21)有:

$$\mathbf{e}_v = \alpha \mathbf{e}^u \mathbf{1}_{n \times 1} - \beta \mathbf{L} \partial \mathbf{u} =$$

$$\alpha (\mathbf{R} + \partial \mathbf{d}) \mathbf{A}^{-1} \mathbf{u}_{dc}^* \mathbf{1}_{n \times 1} - (\alpha \mathbf{R}_l \mathbf{1}_{n \times 1} \mathbf{1}_{n \times 1}^T \mathbf{A}^{-1} + \beta \mathbf{L}) \partial \mathbf{u} \quad (27)$$

$$\dot{\mathbf{e}}_v = -(\alpha \mathbf{R}_l \mathbf{1}_{n \times 1} \mathbf{1}_{n \times 1}^T \mathbf{A}^{-1} + \beta \mathbf{L}) \partial \dot{\mathbf{u}} \quad (28)$$

将式(22)代入式(28)有:

$$\dot{\mathbf{e}}_v = \mathbf{Z} (\mathbf{K}_p \dot{\mathbf{e}}_v + \mathbf{K}_i \mathbf{e}_v) \quad (29)$$

其中, $\mathbf{Z} = -(\alpha \mathbf{R}_l \mathbf{1}_{n \times 1} \mathbf{1}_{n \times 1}^T \mathbf{A}^{-1} + \beta \mathbf{L})$ 。根据文献[26]的证明,矩阵 $\mathbf{Z}$ 是赫尔维茨矩阵。对式(29)进行变换有:

$$(\mathbf{E} - \mathbf{Z} \mathbf{K}_p) \dot{\mathbf{e}}_v = \mathbf{Z} \mathbf{K}_i \mathbf{e}_v \quad (30)$$

其中, $\mathbf{E}$ 为单位矩阵。

基于以上分析,若控制器参数选择为 $\mathbf{K}_p > 0$ 、 $\mathbf{K}_i > 0$,则可以得到:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}^u(t) = 0 \quad (31)$$

从式(31)可得本文提出的二次补偿控制能够将母线电压恢复到额定值,也能满足负荷功率分配的高精度。

4 仿真分析

为了验证所提分布式二次控制方案的有效性,在 MATLAB / Simulink 环境中搭建了孤岛直流微电网仿真测试模型。该孤岛直流微电网系统由 2 个常规的微电源(DG₁、DG₂)和 1 个备用微电源(DG₃)以及阻抗性负荷 $\mathbf{R}_l$ 和备用的可控负荷 $\mathbf{R}_2$ ($\mathbf{R}_1 = \mathbf{R}_2 = 5 \ \Omega$) 组成,如附录图 A3 所示。微电网内母线的额定电压设置为 48 V,各 DG 由 1 台升压型 DC / DC 转换器驱动,并根据某些给定的比例选择不同的额定容量,如在仿真中选择的 3 个变流器额定容量比为 $\mathbf{S}_1 : \mathbf{S}_2 : \mathbf{S}_3 = 1 : 2 : 3$,即额定输出电流比为 $\eta_1 : \eta_2 : \eta_3 = 1 : 2 : 3$ 。

4.1 采用分布式二次控制的仿真分析

采用分布式二次控制的仿真结果如附录图 A4 和 A5 所示。从图 A4 可以看出,在 $t \in [0, 2) \text{ s}$ 期间,由于传统下垂控制的影响,母线电压下降到 40 V,存在 8 V 的电压偏差,不能准确地跟踪直流母线参考电压。在 $t = 2 \text{ s}$ 引入本文所提的二次控制时,母线电压迅速恢复到参考值 48 V。从图 A5 可以看出,在

$t = 2\text{ s}$ 时,由于引入了二次控制,输出电流均有所上升,这是因为在仿真时用的是阻性负载,引入二次补偿控制后输出电压上升,而负载阻值不变,因此总的输出电流增加。以上结果表明,提出的二次控制能够带来精确的负荷功率分配比,即 $i_{\text{dc1}}:i_{\text{dc2}}:i_{\text{dc3}}=1:2:3$,满足式(2)。

4.1.1 负荷功率波动

主要仿真分析了独立直流微电网中负荷功率波动对系统稳定性的影响。如在孤岛微电网中,发生重负载的投切时,系统应能独立承担功率波动的影响,能迅速按变流器容量呈比例分配负荷功率,保证系统的平稳运行。

采用本文提出的分布式二次补偿控制,负荷波动时母线电压、DG输出电流分别如图5和图6所示。从图5可以看出,仿真开始时系统迅速响应,母线电压稳定在48 V,在 $t=4\text{ s}$ 时系统接入负荷 R_2 ,由于下垂特性,母线电压均有所下降,但迅速恢复到48 V;在 $t=8\text{ s}$ 时断开负荷 R_2 ,母线电压上升,但很快恢复到48 V。从图6可以看出,在 $t=4\text{ s}$ 前系统迅速响应,负荷功率达到精准分配;在 $t=4\text{ s}$ 时接入了负荷 R_2 ,DG输出电流迅速上升,并精准地达到负荷功率分配的要求,即 $i_{\text{dc1}}:i_{\text{dc2}}:i_{\text{dc3}}=1:2:3$,满足式(2);在 $t=8\text{ s}$ 时切除负荷 R_2 ,输出电流下降,但系统稳定性不受影响,依然满足负荷功率分配的高精度。

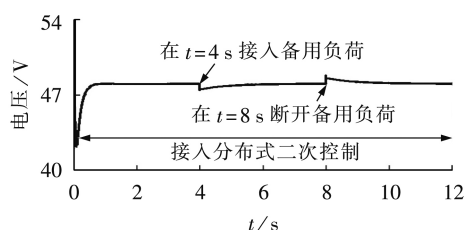


图5 负荷波动时直流母线电压

Fig.5 DC bus voltage during load fluctuation

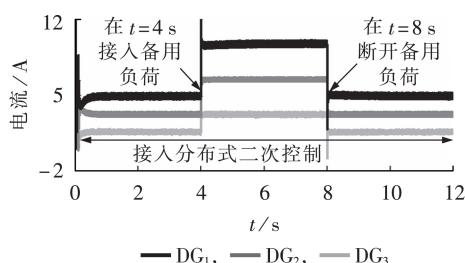


图6 负荷波动时DG输出电流

Fig.6 Output current curve of DG during load fluctuation

4.1.2 DG的即插即用性

针对独立运行的直流微电网,当部分DG因故障等原因退出运行时,为了确保微电网系统内的源荷功率平衡,正常运行情况下的DG需迅速调整输出功率来稳定母线电压及平衡功率需求。

采用本文提出的分布式二次补偿控制,仿真开始时系统迅速响应,图7显示了微电网内直流母线的电压。可见在 $t=4\text{ s}$ 时系统接入备用DG₃,可以看出直流母线电压上升,但迅速恢复到48 V;在 $t=8\text{ s}$ 时假设备用微电源发生故障切除DG₃,母线电压有很小的下降波动,但很快恢复到48 V。图8显示了DG的输出电流,在 $t=4\text{ s}$ 前系统迅速响应,由DG₁和DG₂平衡系统的功率需求,即 $i_{\text{dc1}}:i_{\text{dc2}}=1:2$;在 $t=4\text{ s}$ 时接入备用DG₃,DG₃迅速参与负荷功率分配,电流由0上升并满足了功率分配的高精度,即 $i_{\text{dc1}}:i_{\text{dc2}}:i_{\text{dc3}}=1:2:3$;在 $t=8\text{ s}$ 时假设备用微电源故障切除DG₃,DG₃输出电流降为0,系统的负荷功率重新由DG₁和DG₂负担。

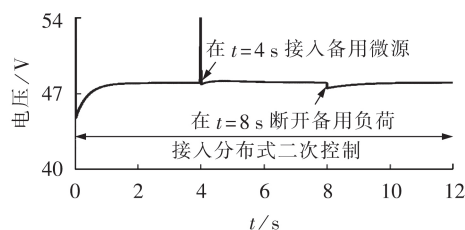


图7 微电源发生故障时的直流母线电压

Fig.7 DC bus voltage under micro source fault

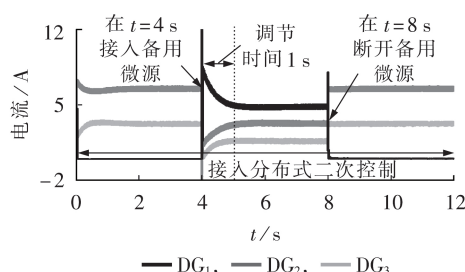


图8 微电源发生故障时的DG输出电流

Fig.8 Output current of DG under micro source fault

4.2 临时故障的鲁棒性

针对独立运行的直流微电网,在稳定运行期间可能会发生母线相接地故障。本小节为了展示本文提出的控制策略具有故障容错能力,在 $t \in [3, 4)\text{ s}$ 期间临时设置了直流母线相接地故障,仿真结果见附录图A6和图A7。在故障期间 $t \in [3, 4)\text{ s}$ 时,从图A6可以看出,母线电压下降到几乎为0,图A7显示输出电流突然上升。但是,一旦故障被清除,在经过3 s的调节过程后,整个系统开始稳定运行并恢复到故障前的相同状态。以上结果表明本文提出的控制策略具有临时的故障容错能力。

4.3 通信链路故障的鲁棒性

在本节中对所提的二次控制进行通信故障测试。3个微电源的电流分配比设置与4.1.1节相同,即 $i_{\text{dc1}}:i_{\text{dc2}}:i_{\text{dc3}}=1:2:3$,负荷 R_1 和 R_2 同时接入系统。在 $t \in [0, 2)\text{ s}$ 期间引入传统的下垂控制,仿真结果如附录图A8和图A9所示。可见DG的输出电流存在

共享偏差,并且母线电压存在严重跌落。但是在 $t \in [2.2, 2.8]$ s期间, DG_1 和 DG_3 之间的通信链路断开,使得 DG_1 的控制器在该时间段内不能与 DG_3 的控制器交互,如图4所示。由附录图A8和图A9可以看出,在通信故障期间DG的输出电流共享误差变得更大,但是最终实现了负荷功率的精准分配,且母线电压也恢复到额定值48 V。以上结果表明本文提出的控制策略具有临时的通信链路故障容错能力。

5 结论

本文以补偿母线电压和负荷功率精准分配为目的,结合传统下垂控制方法提出了一种分布式二次补偿控制策略。通过理论和仿真分析,得出了以下结论。

(1)利用二次控制方法对传统下垂控制带来的直流母线电压跌落进行补偿,使得母线电压恢复到额定值;通过对下垂系数的不断调整,达到了负荷功率分配的高精度。

(2)相对于集中控制,本文所提的分布式二次控制策略性能更好,且在不忽略线缆阻抗的情况下,系统能够稳定运行以及达到负荷功率分配的高精度。

(3)通过对直流微电网系统在各种运行模式下的仿真测试,所提控制策略具备DG的即插即用性,且系统具有很强的鲁棒性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] YANG X, ZHANG Y, HE H, et al. Real-time demand side management for a microgrid considering uncertainties[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3401-3414.
- [2] 杨晓东, 张有兵, 卢俊杰, 等. 基于区块链技术的能源局域网储能系统自动需求响应[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3703-3716.
YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, LU Junjie, et al. Block-chain-based automated demand response method for energy storage system in an energy local network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3703-3716.
- [3] 杨晓东, 张有兵, 蒋杨昌, 等. 微电网下考虑分布式电源消纳的电动汽车互动响应控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 390-400.
YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, JIANG Yangchang, et al. Renewable energy accommodation-based strategy for electric vehicle considering dynamic interaction in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 390-400.
- [4] 施婕, 郑漳华, 艾芊. 直流微电网建模与稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 86-90.
SHI Jie, ZHENG Zhanghua, AI Qian. Modeling of DC micro-grid and stability analysis [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 86-90.
- [5] LIU X K, HE H, WANG Y W, et al. Distributed hybrid secondary control for a DC microgrid via discrete-time interaction[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(4): 1865-1875.
- [6] 李玉梅, 查晓明, 刘飞. 含有多个恒功率负荷的多源直流微电网振荡抑制研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 40-46.
LI Yumei, ZHA Xiaoming, LIU Fei. Oscillation suppression of multi-source DC microgrid with multiple constant-power loads [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 40-46.
- [7] 孟明, 陈世超, 卢玉舟, 等. 基于功率分层的直流微电网协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 30-37.
MENG Ming, CHEN Shichao, LU Yuzhou, et al. Coordinated control based on power hierarchy for DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 30-37.
- [8] SHAFIEE Q, DRAGIČEVIĆ T, VASQUEZ J C, et al. Hierarchical control for multiple DC-microgrids clusters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 922-933.
- [9] MENG L, SHAFIEE Q, TRECATE G F, et al. Review on control of DC microgrids and multiple microgrid clusters[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(3): 928-948.
- [10] HE J, LI Y. An enhanced microgrid load demand sharing strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(9): 3984-3995.
- [11] WANG P, LU X, YANG X, et al. An improved distributed secondary control method for DC microgrids with enhanced dynamic current sharing performance [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(9): 6658-6673.
- [12] KHORSANDI A, ASHOURLOO M, MOKHTARI H, et al. Automatic droop control for a low voltage DC microgrid[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(1): 41-47.
- [13] KHORSANDI A, ASHOURLOO M, MOKHTARI H. A decentralized control method for a low-voltage DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 793-801.
- [14] KAPER S K, KUMAR A, CHOUDHARY N K. A novel approach of load sharing and busbar voltage regulation using busbar voltage stabilizing controller in autonomous DC microgrid [C]//IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems. Delhi, India: IEEE, 2017: 1-6.
- [15] 张丹, 王杰, 弥潇. 直流微电网自适应滑模控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 138-143.
ZHANG Dan, WANG Jie, MI Xiao. Adaptive sliding mode control strategy for DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 138-143.
- [16] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids: a general approach toward standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 58(1): 158-172.
- [17] ANAND S, FERNANDES B G, GUERRERO J. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1900-1913.
- [18] HAN R, MENG L, GUERRERO J M, et al. Distributed non-linear control with event-triggered communication to achieve current-sharing and voltage regulation in DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 6416-6433.
- [19] GUO F, WEN C, MAO J, et al. Distributed secondary voltage and frequency restoration control of droop-controlled inverter-based microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(7): 4355-4364.
- [20] 顾伟, 薛帅, 王勇, 等. 基于有限时间一致性的直流微电网分布式协同控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 49-55.
GU Wei, XUE Shuai, WANG Yong, et al. DC micro-grid distributed collaborative control based on finite time consistency [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 49-55.

- [21] NASIRIAN V, DAVOUDI A, LEWIS F L, et al. Distributed adaptive droop control for DC distribution systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 944-956.
- [22] 吕振宇, 苏晨, 吴在军, 等. 孤岛型微电网分布式二次调节策略及通信拓扑优化[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 209-219.
LÜ Zhengyu, SU Chen, WU Zaijun, et al. Distributed secondary control strategy and its communication topology optimization for islanded microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 209-219.
- [23] SETIAWAN M A, ABU-SIADA A, SHAHNIA F. A new technique for simultaneous load current sharing and voltage regulation in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(4): 1403-1414.
- [24] GAO F, BOZHKO S, ASHER G, et al. An improved voltage compensation approach in a droop-controlled DC power system for the more electric aircraft[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 7369-7383.
- [25] 肖湘宁, 王鹏, 陈萌. 基于分布式多代理系统的孤岛微电网二次电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8): 1894-1902.
XIAO Xiangning, WANG Peng, CHEN Meng. Secondary voltage control in an islanded microgrid based on distributed

multi-agent system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1894-1902.

- [26] GUO F, XU Q, WEN C, et al. Distributed secondary control for power allocation and voltage restoration in islanded DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4): 1857-1869.

作者简介:



李祥山

李祥山(1995—),男,甘肃武威人,硕士研究生,主要研究方向为微电网分布式控制(E-mail:xiangshan_l@163.com);

杨晓东(1990—),男,安徽阜阳人,博士,通信作者,主要研究方向为需求侧管理、灵活性机制、新能源电力系统优化与控制(E-mail:yang_xd90@163.com);

张有兵(1971—),男,湖北大冶人,教授,博士,主要研究方向为智能电网、分布式发电及新能源优化控制、电动汽车入网、电力系统通信、电能质量监控(E-mail:youbingzhang@zjut.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Coordinated control of DC microgrid considering bus voltage compensation and load power dynamic sharing

LI Xiangshan¹, YANG Xiaodong¹, ZHANG Youbing¹, XU Zhicheng², XIE Luyao¹, LU Haiqiang³

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

3. Center of Technology Research and Development, Jiaxing Hengchuang Power Equipment Co., Ltd., Jiaxing 314033, China)

Abstract: As for the islanding DC microgrid is required to independently bear bus voltage stability and accurate power sharing, a coordinated control strategy considering bus voltage compensation and load power dynamic sharing is proposed. Firstly, the droop control is used in the primary control layer to realize power sharing among DGs (Distributed Generations). Secondly, on the basis of droop control, the distributed secondary control considering voltage regulation control and current correction control is proposed, which compensates the DC bus voltage drop caused by the traditional droop control, so that the bus voltage recovers to the rated value. And through the constant adjustment of the droop coefficient, the high precision of the load power sharing is achieved. Finally, the designed control strategy is verified by simulation on MATLAB/Simulink under different operating modes, simulative results show that the proposed control strategy can achieve the stable operation of DC microgrid and the dynamic distribution of load power, and satisfy the requirements of supply plug and play for DGs.

Key words: DC microgrid; droop control; distributed secondary control; voltage recovery; power sharing

附录

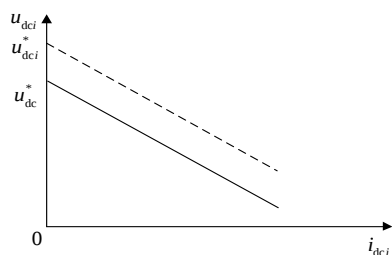


图 A1 母线参考电压抬升效果

Fig.A1 Bus reference voltage rise effect

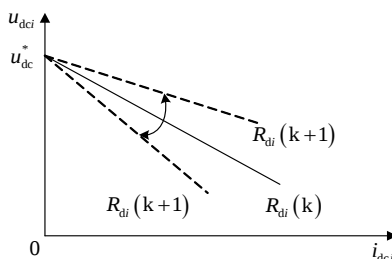


图 A2 下垂系数调整效果

Fig.A2 Droop coefficient adjustment effect

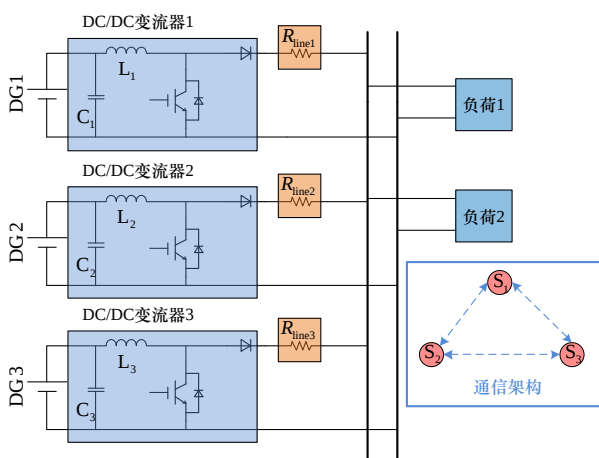


图 A3 直流微电网仿真架构图

Fig.A3 Architecture diagram of DC microgrid simulation

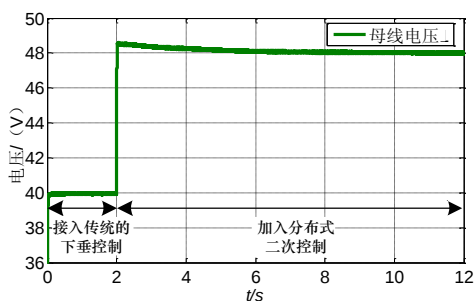


图 A4 引入二次补偿控制下母线电压曲线

Fig.A4 DC bus voltage curve with secondary compensation control

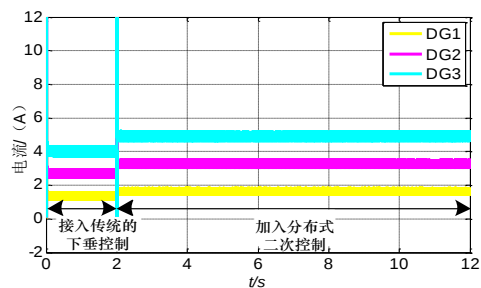


图 A5 引入二次补偿控制下 DG 输出电流曲线

Fig.A5 Output current curve of DG under secondary compensation control

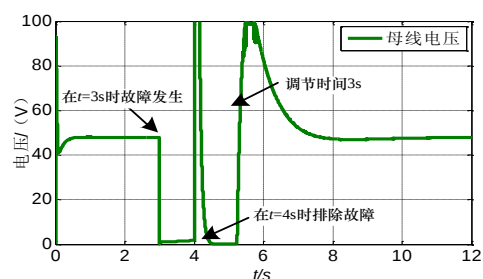


图 A6 直流母线相接地故障时电压曲线

Fig.A6 DC bus voltage curve in DC bus phase to ground fault

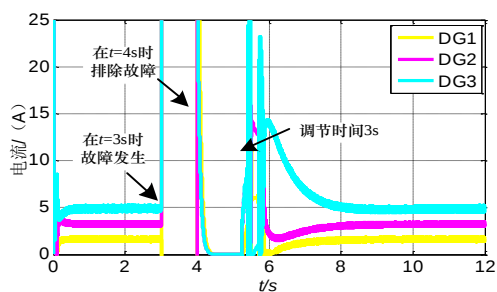


图 A7 直流母线相接地故障时 DG 输出电流曲线

Fig.A7 Output current curve of DG in DC bus phase to ground fault

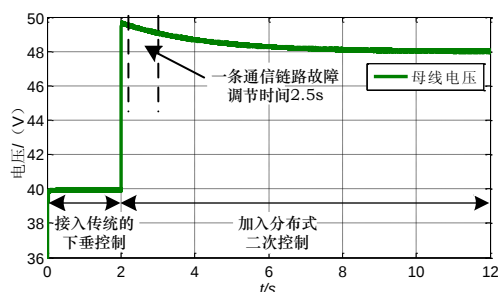


图 A8 通信断开时直流母线电压曲线

Fig.A8 Output voltage of DC bus in communication lost test

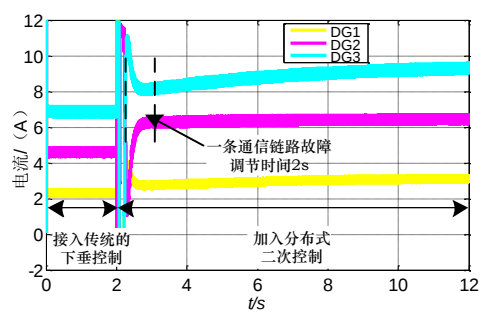


图 A9 通信断开时 DG 输出电流曲线

Fig.A9 Output currents of DG in
communication lost test