基于动态扩散算法的直流微电网简化分布式二层控制

廖达威^{1,2},高 飞^{1,2}

(1. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室,上海 200240;2. 上海交通大学 电气工程系,上海 200240)

摘要:孤岛直流微电网采用下垂控制实现电流均分时,均流效果受馈线阻抗影响且带来电压跌落。为实现电压恢复和电流精确均分,提出了一种采用动态扩散算法的简化分布式二层控制策略。相比于传统二层控制,该简化二层控制策略仅包含1台积分控制器和1个通信变量,简化了控制结构,减轻了通信链路负担。策略采用动态扩散算法进行分布式通信,改善了系统的收敛速度以及稳定性。考虑到不可忽略通信采样时间对系统稳定性的影响,建立了系统的离散时间小信号模型,绘制根轨迹图分析了二层控制增益和通信采样周期等关键参数对系统稳定性的影响。最后,基于MATLAB/Simulink的仿真结果验证了所提策略在动态性能和稳定性上的优越性。

关键词:直流微电网;分布式控制;扩散算法;离散时间模型;二层控制
 中图分类号:TM761
 文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202301018

0 引言

随着风电、光伏等分布式电源(distributed generation,DG)的快速发展,微电网得到了广泛的应用。 和交流微电网相比,直流微电网不存在频率、相位以 及无功功率管理的问题,且越来越多的电力负荷采 用直流供电^[1],因此直流微电网能够减少能量变换 环节,提高系统效率,同时直流微电网也成为船舶、 飞机电力系统的高效组网形式^[2]。本文主要关注孤 岛直流微电网的分布式控制问题。

孤岛直流微电网中采用分层控制的控制架构对 各DG进行控制^[3]。一层控制主要用于实现电压和 电流的控制,以及各DG之间的初步电流分配。在 一层控制中,下垂控制得到了广泛的应用和研究,其 无需通信、即插即用的优点使得直流微电网具有更 强的鲁棒性以及可拓展性^[4]。但下垂控制导致了电 压跌落,同时各DG的馈线阻抗不均等,因此需要引 入二层控制来消除电压偏差以及提高电流分配的精 度。本文主要关注直流微电网的一层和二层控制。

根据二层控制中通信形式的不同,可以将二层 控制分为集中式、分布式和分散式控制^[5]。在集中 式二层控制中,存在1台中央控制器负责采集整个 系统的信息并向所有DG发布控制指令,其控制策 略简单、控制效果好,但十分依赖中央控制器,且中 央控制器的单点故障会导致系统无法正常运行。相 比之下,分散式控制无需通信系统和中央控制器,但

收稿日期:2022-08-03;修回日期:2022-11-23

在线出版日期:2023-01-18

基金项目:上海市自然科学基金资助项目(22ZR1429800) Project supported by the Natural Science Foundation of Shanghai(22ZR1429800) 其控制效果受到系统线路阻抗的影响,且不利于实现全局控制目标^[6]。分布式控制不需要中央控制器,克服了单点故障的影响,同时通过分布式通信网络能够实现全局的控制目标。

目前大多数分布式二层控制采用并联控制器架 构,即在二层控制中针对不同的控制目标设置相应 的控制器,将这些控制器的输出之和作为二层控制 的输出。文献[7-10]中的二层控制包括了2台并联 的控制器,分别用于实现电压恢复和电流或功率均 分。文献[11-12]则使用了3台并联的比例积分 (proportional integral, PI) 控制器共同构成二层控 制,分别实现荷电状态(state of charge, SOC)均衡、 电流均分以及平均电压恢复。但由于多台并联控制 器共同影响1个变量,存在相互影响,其控制参数 往往难以设计:且在分布式控制中,多台控制器意 味着需要多个通信变量,加重了通信链路的负担。 文献[13-14]均通过1台积分控制器同时实现电流均 分和平均电压恢复,并使用有限集的模型预测控制 实现一层控制。但在系统建模中没有考虑分布式通 信算法对系统的影响。

在分布式算法方面,现有的二层控制大部分采 用一致性算法^[8-9,12-16]。而相比于一致性算法,扩散 算法具有更快的收敛速度和更小的稳态误差,是一 种更好的分布式估计算法^[17]。目前扩散算法在微电 网中的应用还比较有限。文献[18]基于扩散算法提 出了一种交流微电网的分布式二层控制策略,实现 了频率和电压恢复。文献[19]在直流微电网的分布 式二层控制中使用动态扩散算法(dynamic diffusion algorithm, DDA),实现了母线电压恢复和输出 电流均分,但其需要提前观测馈线阻抗,且仍包含 2台并联控制器,需要2个通信变量。 在系统建模方面,上述分布式二层控制的相关 工作(如文献[7-8,11-14,19])均通过连续时间模型 来分析系统的稳定性。但实际上数字控制器、通信 网络等均为离散时间子系统,连续时间模型无法准 确地描述系统的动态特性。文献[20]建立了系统的 离散时间模型,分析了通信延时等关键参数对系统 稳定性的影响,但其模型没有考虑恒流和恒功率负 载;分布式算法采用一致性算法,二层控制策略也采 用了传统的并联结构。

基于上述研究,本文在下垂控制的基础上,提出 了一种采用动态扩散算法的简化分布式二层控制, 该控制策略仅需将1个状态表征量作为通信变 量,引入1台积分控制器即可同时实现精确的电流 均分和平均电压恢复,简化了控制结构,并减轻了通 信链路的负担。建立了离散时间模型,通过根轨迹 研究了通信采样周期对策略稳定性的影响。基于 MATLAB / Simulink 仿真平台,验证了该简化分布式 二层控制策略的有效性和优越性。

1 直流微电网的传统协调控制

直流微电网结构如图1所示,其中主要包括控制器、通信网络和电气网络3个部分。控制器包含一层控制和二层控制;各控制器通过分布式的通信网络交互信息;电气网络由Buck变换器、LC滤波器、馈线阻抗以及负载组成。下面将主要介绍各DG采用的一层控制和二层控制。







1.1 使用下垂控制的一层控制

不同于并网模式的直流微电网主要由并网变换器支撑直流母线电压,孤岛模式下的直流微电网需要各DG工作在电压源模式下来支撑母线电压。电压源模式下的一层控制器主要包含电压电流双环PI控制以及下垂控制2个部分,其控制框图如图1所示。图中: $R_{\text{line,i}}(i,j \in N, N$ 为所有变换器的集

合)分别为Buck变换器i,j的馈线阻抗; $i_{ref,i}$ 为变换器i电压控制器的输出电流; $v_{ref,i}$ 为变换器i的电压参考值; $v_{DC,i}$ 为变换器i的输出电压; $i_{L,i}$ 为变换器i的电压参 感电流; $G_{PL,V}(s)$ 为电压控制器的传递函数; d_i 为变换器i一层控制输出的占空比信号; V_{in} 为Buck变换器的输入电压; V^* 为系统的电压额定值; $R_{d,i}$ 为引入的虚拟阻抗,即下垂系数; δv_i 为二层控制的输出量,表示下垂曲线的偏移量; $L_{X}C$ 分别为LC滤波器的电感、电容; R_{load} 、 I_{load} 和 P_{load} 分别为电阻负载的电阻值、 恒流负载的电流值和恒功率负载的有功功率。

双环PI控制包含2台串联的PI控制器,其数学 模型分别如式(1)、(2)所示。

$$\dot{u}_{\mathrm{ref},i} = G_{\mathrm{PI},\mathrm{V}}(s) \left(v_{\mathrm{ref},i} - v_{\mathrm{DC},i} \right) \tag{1}$$

$$d_{i} = \frac{1}{V_{in}} G_{\text{PI, C}}(s) \left(i_{\text{ref, }i} - i_{L,i} \right)$$
(2)

式中:G_{PLC}(s)为电流控制器的传递函数。

通过下垂控制来调整v_{ref,i},变换器*i*仅使用下垂 控制而得出的电压参考值v_{ref,droop,i}为:

$$v_{\text{ref, droop, }i} = V^* - R_{\text{d, }i} i_{L,i} \tag{3}$$

当双环 PI 控制能够稳定收敛时,变换器 i 的稳态输出电压能够跟随式(3)中的电压参考值,如式(4)所示。

$$v_{\mathrm{DC},i} = v_{\mathrm{ref},\mathrm{droop},i} \tag{4}$$

因此,结合图1所示的馈线阻抗,稳态时公共直流母线电压v_{bus}为:

 $v_{bus} = v_{DC,i} - R_{line,i} i_{DC,i} = V^* - R_{d,i} i_{L,i} - R_{line,i} i_{DC,i}$ (5) 式中: $i_{DC,i}$ 为变换器i的输出电流。可见,仅采用下垂 控制时,母线电压将偏离电压额定值 V^* 。另外,稳态 时输出电流将和电感电流相等,如式(6)所示。

$$i_{\text{DC},i} = i_{L,i} \tag{6}$$

将式(6)代入式(5)中,可得稳态时变换器*i、j* 输出电流的分配比例为:

$$\frac{i_{\text{DC},i}}{i_{\text{DC},j}} = \frac{R_{\text{d},j} + R_{\text{line},j}}{R_{\text{d},i} + R_{\text{line},i}}$$
(7)

可见,仅采用下垂控制时,各变换器输出电流分 配将受到馈线阻抗的影响,而馈线阻抗往往难以观 测,因此将难以实现各DG的准确电流均分。为了 弥补下垂控制的不足,消除母线电压偏差以及改善 电流均分效果,引入二层控制对式(3)所示的下垂曲 线进行调整:

$$v_{\text{ref,}i} = v_{\text{ref, droop,}i} + \delta v_i \tag{8}$$

1.2 并联架构的分布式二层控制

由1.1节所述,二层控制需要实现母线电压恢复 以及电流均分性能提升这2个控制目标。由于馈线 阻抗一般无法准确测量,在无新增母线电压采样点 的情况下,各本地控制器无法测得母线电压。因此 一般采用平均电压恢复来近似实现母线电压恢 复^[8,13,19-20],如式(9)所示。

$$\lim_{t \to \infty} v_{\text{avg}} = \lim_{t \to \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} v_{\text{DC},i} = V^*$$
(9)

式中:v_{avg}为变换器的平均输出电压;n为变换器总数。其次,各变换器输出电流需要严格按照下垂系数的反比分配,如式(10)所示。

$$\lim_{\to\infty} \frac{i_{\text{DC},i}}{i_{\text{DC},j}} = \frac{R_{\text{d},j}}{R_{\text{d},i}}$$
(10)

稳态时式(11)成立。

$$R_{\mathrm{d},i}i_{\mathrm{DC},i} = R_{\mathrm{d},j}i_{\mathrm{DC},j} \tag{11}$$

为方便起见,定义下垂虚拟压降v_{vir,i}为:

$$v_{\text{vir},i} = R_{\text{d},i} i_{\text{DC},i} \tag{12}$$

因此实现电流均分即为实现各变换器的下垂虚 拟压降相等。

现有文献通过在二层控制引入2台并联控制器分别实现上述电压恢复及电流均分的控制目标^[8,11,19-20],如图2(a)所示。二层电压控制器的输出δν_{1,i}为:

$$\delta v_{1,i} = G_{\mathrm{PI,SV}}(s) \left(V^* - v_{\mathrm{DC,avg},i} \right) \tag{13}$$

式中: $G_{\text{PI,SV}}(s)$ 为二层电压控制器的传递函数,其输入为电压额定值 V^* 和本地观测的电压平均值 $v_{\text{DC,avg,}i}$ 之差。

二层电流控制器的输出 δv_{2i} 为:

$$\delta v_{2,i} = G_{\text{PI, SC}}(s) \left(v_{\text{vir, avg}, i} - v_{\text{vir}, i} \right)$$
(14)

式中: G_{PI,sc}(s)为二层电流控制器的传递函数,其输入为本地观测到的平均下垂虚拟压降v_{vir,avg,i}和本地的下垂虚拟压降v_{vir,i}之差。将2台并联控制器的输出之和作为偏移量,对下垂曲线进行调整,如式(15) 所示。

$$\delta v_i = \delta v_{1,i} + \delta v_{2,i} \tag{15}$$

这种并联结构较为直观,能够同时实现上述2 个控制目标;但二次控制参数的设计较困难,2台并



Fig.2 Cooperative secondary control strategies of DC microgrid

联控制器的参数将互相影响对方的动态响应。此外,不同的控制器之间至少需要2个通信变量 (x_{comm,1}、x_{comm,2})才能分别观测出直流电压平均值 v_{DC,ay,i}以及平均虚拟压降v_{vir,ay,i},因此增加了通信链路的负担。

2 基于动态扩散算法的简化二层控制

为解决并联结构的二层控制带来的参数设计复杂和通信负担较大的问题,本文通过引入1个状态 表征量,设计了仅包含1台积分控制器和1个通信变 量的二层控制策略。该策略使用动态扩散算法,通 过分布式通信网络即可估计状态表征量的平均值, 同时实现了直流母线电压调整和电流均分性能的提 升。相比于传统的并联结构,提出的二层控制策略 简化了控制参数设计,减轻了通信负担。

2.1 简化的分布式二层控制

为简化第1章所述的并联结构二层控制,本文 首先引入了1个状态表征量 ζ_i,其定义为输出电压 和下垂虚拟压降之比,如式(16)所示。

$$\zeta_i = \frac{v_{\text{DC},i}}{v_{\text{vir},i}} \tag{16}$$

在该表征量的基础上,本文设计了一种简化的 二层控制策略,如图2(b)所示,其仅包含1台积分控 制器,其控制表达式为:

$$\delta v_i = K_{isv} \int \left(V^* - R_{d,i} i_{DC,i} \zeta_{avg,i} \right) dt = K_{isv} \int \left(V^* - v_{vir,i} \zeta_{avg,i} \right) dt$$
(17)

式中: K_{isv} 为二层控制的积分增益; $\zeta_{avg,i}$ 为本地所观测到的状态表征量的平均值。

下面将从稳态性能的角度直观地说明该控制策略。若通信算法能够稳定收敛,则当系统达到稳态时,各控制器均能够通过1个通信变量*x*_{comm}准确地观测出状态表征量的平均值,如式(18)所示。

$$\mathcal{L}_{\text{avg},i} = \zeta_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{v_{\text{DC},i}}{v_{\text{vir},i}} \quad i \in \mathbb{N}$$
(18)

式中: ζ_{avg} 为控制器观测出状态表征量的平均值。

由于当二层控制的积分控制器到达稳态时,其 输入为0,因此稳态时下垂虚拟压降相等,如式(19) 所示。

$$v_{\text{vir},i} = \frac{V^*}{\zeta_{\text{avg},i}} = \frac{V^*}{\zeta_{\text{avg}}} = v_{\text{vir}} \quad i \in N$$
(19)

考虑到式(12)中下垂虚拟压降的定义,实现下 垂虚拟压降相等的同时也意味着实现了式(11),即 实现了输出电流按照下垂系数的反比分配。另外, 当各变换器的下垂虚拟压降相等时,由式(18)、(19) 可得平均电压恢复到额定值,如式(20)所示。

$$V^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} v_{\text{DC},i}$$
(20)

综上,该控制策略仅使用1台积分控制器和1个

通信变量 x_{comm} 即可实现平均电压恢复以及精确的 电流均分,大幅简化了控制参数设计,减轻了通信 负担。

2.2 动态扩散算法

该控制策略利用动态扩散算法来实现各控制器 之间的分布式通信,从而估计全局平均值。相比于 目前广泛采用的一致性算法,动态扩散算法具有更 快的收敛速度和更小的稳态误差^[17],从而可以改善 二层控制的动态性能。

本文采用动态扩散算法^[19]来实现全局平均值的 实时采样和实时观测,如式(21)所示。

$$\begin{cases} \psi_{i}(k) = (1 - \mu) \omega_{i}(k - 1) + \mu r_{i}(k) \\ \phi_{i}(k) = \psi_{i}(k) + \omega_{i}(k - 1) - \psi_{i}(k - 1) \\ \omega_{i}(k) = \sum_{i \in \mathbb{N}} b_{ij} \phi_{j}(k) \end{cases}$$
(21)

式中: $\psi_i(k)$ 和 $\phi_i(k)$ 为中间变量; $\omega_i(k)$ 为本地观测得 到的全局平均值; $r_i(k)$ 为本地的采样值; μ 为该动态 扩散算法的步长; N_i 为通信节点i的相邻节点集合; b_i 为通信节点i、j的通信权重,由式(22)决定。

$$B = \left[b_{ij} \right] = \frac{A + I_n}{2} \tag{22}$$

式中:A为通信邻接矩阵;I_n为n阶单位矩阵。

为保证算法的稳定收敛,步长μ以及通信邻接 矩阵A的设置需要满足一定条件。通信步长与算法 的收敛性能有关,一般而言,步长μ的合理范围为 (0,1],步长越小,收敛速度越慢,但越有利于稳定收 敛。步长对稳定性的影响将在第3章加以讨论。其 次,通信邻接矩阵A必须是右随机矩阵,即满足AE= E(E为元素均为1的n×1维列向量)^[17]。此外,分布 式通信网络必须是连通的,即任意2个节点间至少 存在1条通路。本文的通信邻接矩阵采用 Metropolis 规则^[20],依据具体的通信网络拓扑设计,如式(23) 所示。

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\max\{n_i, n_j\}} & j \in N_i, i \neq j \\ 1 - \sum_{j \in N_i} a_{ij} & j = i \\ 0 & j \notin N_i \end{cases}$$
(23)

式中:n_i、n_j分别为通信节点*i*、*j*的相邻节点数目;a_{ij} 为通信邻接矩阵中的元素。

动态扩散算法和离散时间一致性算法在同样的 采样时间及同样的通信网络拓扑下的收敛速度对比 如图3所示。图中:x1-x6为状态变量。此处以最常 见的环形通信网络拓扑为例,在采样时间*T*com均为 0.01 s的情况下,动态扩散算法的收敛速度优于一致 性算法。



图3 动态扩散算法和一致性算法的对比

Fig.3 Comparison between dynamic diffusion algorithm and consensus algorithm

3 离散时间域稳定性分析

本章主要分析采用上述简化分布式二层控制策 略的直流微电网系统的小信号稳定性。考虑到工程 实际中通信网络和本地控制器的不可忽略的采样时 间,建立了系统的离散时间模型。在该模型的基 础上,通过根轨迹分析了关键参数对系统稳定性的 影响。

3.1 离散时间状态空间模型

系统的状态空间模型由通信网络、本地控制器 以及电气网络3个部分组成。首先结合式(21)— (23),建立通信网络的离散时间模型(采样时间为 *T*_{com})如式(24)所示。

$$\Delta \boldsymbol{x}_{\text{DDA}}(k+1) = \boldsymbol{A}_{\text{DDA}} \Delta \boldsymbol{x}_{\text{DDA}}(k) + \boldsymbol{B}_{\text{DDA}} \Delta \boldsymbol{\zeta}(k)$$

$$\Delta \boldsymbol{\zeta}_{\text{avg}}(k) = \boldsymbol{C}_{\text{DDA}} \Delta \boldsymbol{x}_{\text{DDA}}(k) + \boldsymbol{D}_{\text{DDA}} \Delta \boldsymbol{\zeta}(k)$$

(24)

式中: Δ 表示对应变量的小扰动; x_{DDA} 为动态扩散算 法引入的状态变量; ζ 为各节点的本地采样值; ζ_{avg} 为各节点观测到的平均值; A_{DDA} 、 B_{DDA} 、 C_{DDA} 、 D_{DDA} 为系 数矩阵。其次,对本地控制器进行建模。先对简化 二层控制策略进行线性化处理,二层控制策略的输 入误差 $e_{sv,i}$ 为:

$$\Delta e_{\rm SV, i} = \Delta V^* - R_{\rm d, i} \Delta i_{\rm DC, i} \Delta \zeta_{\rm avg, i} =$$

$$\Delta V^* - R_{\mathrm{d},i} i_{\mathrm{DC},i}^0 \Delta \zeta_{\mathrm{avg},i} - R_{\mathrm{d},i} \zeta_{\mathrm{avg}}^0 \Delta i_{\mathrm{DC},i} \qquad (25)$$

式中:上标0代表对应变量的稳态值。同时二层控制器的输出为:

$$\Delta \delta v_i = K_{isv} \Delta e_{SV,i} / s \tag{26}$$

将基于下垂控制的一层控制和上述二层控制结合,并通过双线性变换方式进行离散化,即可得本地控制器的离散时间模型(采样时间为*T*_{ett})如式 (27)所示。

$$\Delta \mathbf{x}_{\text{ctrl}}(k+1) = \mathbf{A}_{\text{ctrl}} \Delta \mathbf{x}_{\text{ctrl}}(k) + \mathbf{B}_{\text{ctrl}} \Delta \mathbf{u}_{\text{ctrl}}(k)$$

$$\Delta \mathbf{d}(k) = \mathbf{C}_{\text{ctrl}} \Delta \mathbf{x}_{\text{ctrl}}(k) + \mathbf{D}_{\text{ctrl}} \Delta \mathbf{u}_{\text{ctrl}}(k)$$
(27)

$$\boldsymbol{x}_{\text{ctrl}}(k) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_{\text{SV}}^{\text{T}}(k) & \boldsymbol{X}_{\text{V}}^{\text{T}}(k) & \boldsymbol{X}_{\text{C}}^{\text{T}}(k) \end{bmatrix}^{\text{T}}$$
(28)

$$\boldsymbol{u}_{\text{ctrl}}(k) = \begin{bmatrix} V^* \boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}(k) \boldsymbol{v}_{\text{DC}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{i}_{L}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(29)

式中: X_{sv} 、 X_v 以及 X_c 分别为二层积分控制器、一层

电压及电流 PI 控制器引入的状态变量; $\mathbf{x}_{\text{etrl}}, \mathbf{u}_{\text{etrl}}$ 分别 为本地控制器状态变量、输出变量矩阵; $A_{\text{etrl}}, B_{\text{etrl}}, C_{\text{etrl}}$ 为系数矩阵; $\Delta d(k), \zeta(k), \mathbf{v}_{\text{DC}}, \mathbf{i}_L$ 分别为 $\Delta d(k), \zeta(k), \mathbf{v}_{\text{DC}}, \mathbf{i}_L$ 的向量形式。

进一步对电气网络建模。该系统采用图1所示 单母线结构,电气网络包括Buck变换器、LC滤波器、馈线阻抗以及恒阻、恒流和恒功率负载。电气网 络的连续时间模型如式(30)所示。

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}}_{mg}(t) = \mathbf{A}_{mg} \Delta \mathbf{x}_{mg}(t) + \mathbf{B}_{mg} \Delta \mathbf{d}(t) \\ \Delta \mathbf{y}_{mg}(t) = \mathbf{C}_{mg} \Delta \mathbf{x}_{mg}(t) + \mathbf{D}_{mg} \Delta \mathbf{d}(t) \end{cases}$$
(30)

$$\boldsymbol{x}_{\rm mg}(t) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_{\rm DC}(t) \\ \boldsymbol{i}_{L}(t) \end{bmatrix}$$
(31)

$$\boldsymbol{y}_{\rm mg}(t) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_{\rm DC}(t) \\ \boldsymbol{i}_{L}(t) \\ \boldsymbol{i}_{\rm DC}(t) \end{bmatrix}$$
(32)

式中: $x_{mg}(t), y_{mg}(t)$ 分别为电气网络状态变量向量和 输出变量向量; $A_{mg}, B_{mg}, C_{mg}, D_{mg}$ 为系数矩阵。通过 将上述三部分模型结合,可得系统在离散时间域下 的状态空间模型。结合的过程如附录A图A1所示, 具体步骤如下:①使用零阶保持器,将连续时间域下 的电气网络模型转化为采样时间为 T_{ctrl} 的z域模型; ②将采样时间为 T_{ctrl} 的z域控制器模型和z域电气网 络模型结合;③使用零阶保持器,将上述采样时间为 T_{ctrl} 的z域模型转化为采样时间为 T_{com} 的z域模型;④ 将采样时间为 T_{com} 的控制器及电气网络模型和通信 网络模型结合得到系统模型。

3.2 根轨迹分析

在上述离散时间模型的基础上,通过观察系统的根轨迹,分析恒功率负载*P*_{load}、通信步长μ、二层控制积分增益*K*_{isy}以及通信采样周期*T*_{com}对系统稳定性的影响。系统的参数设置如附录B表B1所示。

当通信步长 μ从 0.2 开始,以 0.2 的间隔变化到 2.2,系统的根轨迹如附录 B 图 B1 所示。可以看出: 增大 μ 的过程中,系统的特征根将向圆外移动;当 μ=2.2 时,系统失稳。

当二层控制积分增益 K_{isv} 从 20 开始,以 20 的间 隔变化到 160 时,系统的根轨迹如附录 B 图 B2 所示。可以看出,增大 K_{isv} 的过程中,系统的特征根将向单 位圆以外运动,即系统趋向于失稳。

当通信采样周期 T_{com} 从 50 ms 开始, 以 50 ms 的 间隔变化到 600 ms 时, 系统的根轨迹如附录 B 图 B3 所示。可以看出, 增大 T_{com} 的过程中, 系统的1 对特 征根将从左边移动至单位圆外, 系统失稳。

二层控制积分增益的取值也将会影响通信采样 周期的稳定区间。在不同的二层控制积分增益下, 改变通信采样周期,由系统稳定与否,可以画出系统 的*K*_{isv}-*T*_{com}稳定域。附录 B 图 B4 对比了本文所提控 制策略和文献[14]提出的控制策略的稳定域,可以 看出,本文提出的控制策略能够增大系统的稳定域, 在相同的二层控制积分增益下,可以容忍更大的通 信采样周期,对通信网络的要求更低。

4 结果分析与讨论

为了验证所提简化二层控制策略的有效性,在 MATLAB/Simulink仿真环境下搭建含6个DG的直 流微电网。系统的电气拓扑以及通信拓扑如附录C 图C1所示。系统的参数设置见附录B表B1。

4.1 负载突变

在t=0.4 s前,系统采用传统的下垂控制;t=0.4 s 时,加入所提的分布式二层控制策略。公共直流母 线上的恒功率负载在t=1.0 s时从500 W变化到 700 W,恒流负载在t=1.5 s时从10 A变化到8 A。系 统的平均电压恢复以及电流均分效果如图4(a)所 示。在t=0.4 s前,各 DG 的输出电流分配受馈线阻抗 影响,导致分配不均;系统的平均电压也低于额定 值。在t=0.4 s后,在二层控制的作用下,平均电压恢 复到额定值48 V,各 DG 的输出电流能够准确均分。 在t=1.0 s以及t=1.5 s时,面对负载的突变,二层控制 策略仍然能够实现平均电压恢复以及电流均分。图 4(b)给出了采用文献[14]中控制策略的动态响应。 对比图4(a)和图4(b)可以看出,在电压恢复时间相 近的前提下,本文所提控制策略能够在 0.04 s内实 现电流均分,和文献[14]相比,提升了动态性能。







4.2 通信链路故障

为了验证分布式策略在发生通信链路故障的 情况下的可行性,同样地,在t=0.4 s时加入分布式二 层控制,恒功率负载在t=1.0 s时从500 W 变化到 700 W。此外,在t=0.4 s时,DG₅和DG₆之间的通信链 路出现故障;在t=0.6 s时,通信链路恢复;在t=1.01 s 时,DG₅和DG₆之间的通信链路再次出现故障。系 统在通信故障下的响应如附录C图C2所示。可以 看到,在通信链路出现故障,通信拓扑变为线状后, 系统仍能实现电流均分。在t=0.6s通信网络拓扑发 生变换时,系统的稳态性能没有受到影响。t=1.01s 时,通信链路再次发生故障,但系统仍然能实现电流 精确均分和平均电压恢复。

4.3 变换器故障

在*t*=0.4 s时加入分布式二层控制;在*t*=1.0 s时, DG₆出现故障,从微电网中脱离,通信中断;在*t*=1.6 s 时,DG₆恢复供电。系统响应见附录C图C3。系统 在变换器出现故障和恢复后仍能快速响应,实现平 均电压恢复和电流均分。

4.4 通信采样周期稳定域验证

在*t*=2 s前,恒功率负载为400 W,系统在分布式 二层控制下达到稳态;*t*=2 s时,恒功率负载从400 W 变为500 W。此时的系统响应如图5所示。对比图5 (a)和图5(b)可以看出,同样的采样周期*T*_{con}=200 ms 下,在采用本文提出的控制策略时,系统能够稳定; 而采用文献[14]的控制策略将导致系统失稳。因此 本文提出的控制策略能够增大系统的稳定域。





5 结论

本文提出了一种简化的直流微电网分布式二层 控制策略,通过引入1个包含了输出电压和下垂虚 拟压降的状态表征量,在仅使用1台积分控制器和 1个通信变量的情况下就可以实现平均电压恢复和 电流均分,简化了系统参数设计和通信链路的负担。 文章的主要结论如下:

1)相比于传统一致性算法,本文采用的基于动态扩散算法的二层控制策略具有更大的可容忍通信 采样周期(即更好的稳定性);

2)在一定范围的通信采样周期下,本文提出的 简化二层控制策略在直流微电网面对负载突变、通 信链路故障和电气网络故障时均能够实现平均电压 恢复以及电流均分,具有较强的鲁棒性;

3)基于系统离散时间模型的稳定性分析以及对 应结果表明,更大的二层控制积分增益、更大的采样 周期以及更大的恒功率负载都会导致系统的稳定性 变差,且过大的通信步长也会带来不稳定。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1]薛贵挺,张焰,祝达康.孤立直流微电网运行控制策略[J].电力自动化设备,2013,33(3):112-117.
 XUE Guiting, ZHANG Yan, ZHU Dakang. Operational control
 - strategy of stand-alone DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3):112-117.
- [2] GAO F, BOZHKO S, COSTABEBER A, et al. Control design and voltage stability analysis of a droop-controlled electrical power system for more electric aircraft[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(12):9271-9281.
- [3] GAO F, KANG R, CAO J, et al. Primary and secondary control in DC microgrids: a review [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(2):227-242.
- [4]朱珊珊,汪飞,郭慧,等.直流微电网下垂控制技术研究综述
 [J].中国电机工程学报,2018,38(1):72-84,344.
 ZHU Shanshan,WANG Fei,GUO Hui,et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2018, 38(1):72-84,344.
- [5] GUERRERO J M, CHANDORKAR M, LEE T L, et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids-part I:decentralized and hierarchical control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4):1254-1262.
- [6] 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.
- [7] HAN Renke, WANG Haojie, JIN Zheming, et al. Compromised controller design for current sharing and voltage regulation in DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019,34(8):8045-8061.
- [8] DONG Mi, LI Li, NIE Yuwen, et al. Stability analysis of a novel distributed secondary control considering communication delay in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019,10(6):6690-6700.
- [9]杨丘帆,黄煜彬,石梦璇,等. 基于一致性算法的直流微电网多 组光储单元分布式控制方法[J].中国电机工程学报,2020,40 (12):3919-3928.

YANG Qiufan, HUANG Yubin, SHI Mengxuan, et al. Consensus based distributed control for multiple PV-battery storage units in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40 (12):3919-3928.

- [10] 米阳,常後飞,时帅,等.基于数据驱动的孤岛直流微电网二次 控制[J].电力自动化设备,2021,41(5):92-98.
 MI Yang, CHANG Junfei, SHI Shuai, et al. Data-driven based secondary control for islanded DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(5):92-98.
- [11] HOANG K D, LEE H H. Accurate power sharing with balanced battery state of charge in distributed DC microgrid
 [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66 (3):1883-1893.
- [12] ZENG Yuji, ZHANG Qinjin, LIU Yancheng, et al. Hierarchical cooperative control strategy for battery storage system in islanded DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5):4028-4039.
- [13] LI Y, ZHANG Z B, DRAGIČEVIĆ T, et al. A unified distributed cooperative control of DC microgrids using consensus protocol[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 1880-1892.
- [14] ZHANG Qinjin, ZENG Yuji, LIU Yancheng, et al. An improved distributed cooperative control strategy for multiple energy storages parallel in islanded DC microgrid [J]. IEEE

Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(1): 455-468.

[15] 林嘉伟,王志新,张永.独立直流微电网中考虑不同容量的分 布式储能系统能量控制策略[J].电力自动化设备,2020,40 (10):139-146.

LIN Jiawei, WANG Zhixin, ZHANG Yong. Energy control strategy of distributed energy storage system considering different capacities in isolated DC microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 139-146.

- [16]朱晓荣,马英乔,赵澄颢.基于模型预测控制算法的多风储直流微电网分布式电压二次控制策略[J].电力自动化设备,2021,41(10):184-191.
 ZHU Xiaorong, MA Yingqiao, ZHAO Chenghao. Distributed voltage secondary control strategy of multi wind-storage DC microgrid based on model predictive control algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(10):184-191.
- [17] TU Shengyuan, SAYED A H. Diffusion strategies outperform consensus strategies for distributed estimation over adaptive networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60 (12):6217-6234.

- [18] YU Jiahao, GAO Fei, WEI Shanshan, et al. An improved distributed secondary control scheme in islanded AC microgrids [C]//2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Detroit, USA: IEEE, 2020; 1335-1342.
- [19] LIAO D W, GAO F, ZHAO Y T, et al. A dynamic diffusion algorithm for distributed secondary control of DC microgrids [C]//2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Detroit, USA; IEEE, 2020; 1299-1306.
- [20] MENG L X, DRAGICEVIC T, ROLDÁN-PÉREZ 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.

作者简介:

廖达威(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为直流 微电网控制(E-mail:alonekayak@sjtu.edu.cn);

高 飞(1985—),男,副教授,博士,主要研究方向为直 流微电网控制与稳定性(E-mail:fei.gao@sjtu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Simplified distributed secondary control based on dynamic diffusion algorithm in DC microgrid

LIAO Dawei^{1,2}, GAO Fei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: When droop control is used to achieve current sharing in islanded DC microgrid, the current sharing performance is affected by feeder impedance and the voltage drop is caused. In order to achieve both voltage restoration and accurate current sharing, a simplified distributed secondary control strategy based on dynamic diffusion algorithm is proposed. Compared with the traditional secondary control, the proposed strategy only includes one integral controller and one communication variable, which simplifies the control structure and reduce the burden of communication links. The strategy adopts a dynamic diffusion algorithm for distributed communication to improve the convergence speed and stability of the system. Considering the impact of communication rates on the system stability, a discrete-time small-signal model of the system is established, based on which the influence of key parameters on the system stability, such as secondary control gains and communication rates, is analyzed through plotting the eigenvalue diagrams. Finally, the simulative results based on MATLAB / Simulink verify the superiority of the proposed strategy in dynamic performance and stability.

Key words: DC microgrid; distributed control; diffusion algorithm; discrete-time model; secondary control





Fig.A1 Discrete-time system modeling process

附录 B 表 B1 系统参数设置

Table B1 System parameters			
类别	参数	符号	数值
通信网络	通信步长	μ	0.5
	通信采样周期	$T_{\rm com}$	1 ms
本地控制器	下垂系数	R _d . i	0.1
	一层电压 PI 控制	$K_{\rm pv}$	13
		$K_{ m iv}$	800
	一层电流 PI 控制	$K_{\rm pv}$	5
		$K_{\rm iv}$	100
	二层控制	$K_{\rm isv}$	10
电气网络	输入电压	$V_{\rm in}$	100 V
	母线电压额定值	V^*	48 V
	馈线阻抗	R _{line} , i	$0.1/0.12/0.13/0.14/0.15/0.16~\Omega$
	电阻负载	R _{load}	5 Ω
	恒流负载	Iload	10 A
	恒功率负载	$P_{\rm load}$	500 W
	LC 滤波器	L	1.8 mH
		С	2 200 mF



图 B1 系统随通信步长 μ变化的根轨迹图 Fig.B1 Eigenvalue diagram of system with varying μ



图 B2 系统随二层积分增益 K_{isv} 变化的根轨迹图









Fig.B3 Eigenvalue diagram of system with varying $T_{\rm com}$





图 C1 仿真中的直流微电网架构











图 C3 变换器故障时的系统响应

Fig.C3 System response under converter fault