DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.221897 文章编号: 0258-8013 (2024) 01-0034-12 中图分类号: TM 762 文献标识码: A

# 基于改进 MFAC 的交直流微电网分布式二次控制

杨畅,郑涛\*,李鹏宇,卜鸣

(西安交通大学电气工程学院,陕西省 西安市 710049)

## Distributed Secondary Control of Hybrid AC/DC Microgrid Based on Improved Model-free Adaptive Control

YANG Chang, ZHENG Tao\*, LI Pengyu, BU Ming

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shannxi Province, China)

ABSTRACT: To solve the problems that the existing distributed secondary control (DSC) of AC/DC microgrid is greatly influenced by the parameters of the primary control, the communication topology of DSC is complicated, and the secondary control parameters are difficult to set, etc., DSC of hybrid AC/DC microgrid based on improved MFAC (MFAC-DSC) is proposed. In this paper, the dynamic linearization parameters of distributed generation are estimated online by using the historical sampling data, and the traditional DSC's problem of being easily affected by the primary control parameters is solved. In order to deal with the issue of the interlinking converter communication failure. communication network and control strategy of DSC is optimized through no communication interlinking converter. Besides, the convergence of the MFAC-DSC control system is derived, and the stable convergence condition is given. Based on a real AC/DC microgrid experimental platform, the feasibility of MFAC-DSC is verified under various operating conditions. Compared with the traditional DSC strategy, the MFAC-DSC method can effectively reduce the power fluctuation caused by the change of distributed generation's droop coefficient, and the droop coefficient can be adjusted on a larger scale. Meanwhile, it solves the problems of control failure and bus voltage offset caused by the interlinking converter communication failure.

**KEY WORDS:** AC/DC microgrid; model-free adaptive control (MFAC); distributed secondary control; power distribution

摘要:针对现有交直流微电网分布式二次控制(distributed secondary control, DSC)受分布式电源一次控制参数影响较大、通信拓扑结构复杂、二次控制参数难以整定等问题,提出基于改进 MFAC 的交直流微电网 DSC(MFAC-DSC),利

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2019ZDLGY18-06)。 Key R&D Program of Shaanxi Province (2019ZDLGY18-06). 用分布式电源的历史采样数据在线估计其动态线性化参数,解决了传统方法受一次控制参数影响较大的问题;通过优化 DSC 的通信结构和控制策略,避免了互联变流器参与二次控制通信,解决了互联变流器通信失效影响 DSC 的问题;推导了 MFAC-DSC 系统收敛性,给出了稳定收敛条件。基于交直流微电网实验平台在多种工况下验证了 MFAC-DSC 的可行性,与传统的 DSC 策略的对比结果表明: MFAC-DSC 方法有效减少分布式电源下垂系数变化带来的功率波动,保证下垂系数有更大的调节范围,同时解决了互联变流器通信失效造成的控制失效和母线电压偏移等问题。

**关键词:** 交直流微电网; 无模型自适应控制; 分布式二次控制: 功率分配

## 0 引言

微电网作为分布式电源(distributed generation, DG)的能量接口,不仅提高了低碳能源的利用率,还有助于加强电力系统应对极端条件的能力,提升了电力系统的弹性与恢复力<sup>[1-3]</sup>。由于 DG 大多以直流电的形式输出,需要额外的电能变换设备接入交流电网,这无疑增加了系统的运行成本,降低了其运行效率<sup>[4]</sup>。交直流微电网的出现其目的是汇集直流 DG 输出的直流电,利用互联变流器(interlinking converter,IC)接入交流子网,并通过交流子网实现微电网的并网和离网操作。在交直流微电网内部,交流 DG、直流 DG 和 IC 协同运行达到负荷分配以及电压频率调整的目的。

微电网的分层控制是实现微电网内部电压频率调整、功率调控以及经济功率分配的主要手段。一般来说,微电网采用三层控制结构来实现电压功率调控<sup>[5-7]</sup>:一次控制,二次控制(secondary control, SC)以及三次控制,一次控制主要应对微秒级的电压和功率变化,SC 则针对毫秒时间量级,而三次

控制主要解决秒级甚至分钟级的控制问题。其中SC 主要解决有差一次控制所带来的电压频率偏移,并 调整不同 DG 之间的功率分配,已经成为微电网分 层控制结构中的重要一环。根据 DG 与控制器之间 的关系将微电网的 SC 策略划分为集中式[8-10]、分散 式[11-12]和分布式[13-15]。集中式 SC 利用中心控制器 调节各个 DG 的功率参考, 其控制结构简单, 但存 在单点失效的可能性。分散式 SC 利用本地信息并 附加系统的网络结构参数来实现功率分配和电压 频率恢复,但其过度依赖系统参数且控制效果有时 不尽如人意。分布式二次控制(distributed secondary control, DSC)利用较少的邻居通信来实现准确的功 率分配,已经成为现阶段国内外研究的热点[16-17]。 但是, 传统的交直流微电网 DSC 策略[16]存在以下 3 个方面问题: 1) 受被控系统参数变化的影响较大, 控制参数的波动会影响 DSC 的功率分配效果; 2) 通信拓扑结构复杂,交直流 DG 需要与 IC 进行通 信,这无疑增加了 IC 的通信负担; 3) 控制参数不 易整定, 其设计大多依赖于工程经验, 缺乏切实可 行的设计手段。

无模型自适应控制(model-free adaptive control, MFAC)作为一种运用历史采样数据进行被控对象模型估计的控制方法<sup>[18]</sup>,不要求系统的先验模型,控制器设计简单,已经在机器人控制、车辆控制等领域有广泛应用<sup>[19]</sup>,也有较多研究将 MFAC 应用于微电网领域<sup>[20-23]</sup>。文献[20-21]将 MFAC 应用到交直流微电网的 IC 控制中,实现交直流子网之间的功率互济,但其忽略了 IC 和交直流 DG 之间的功率互济,但其忽略了 IC 和交直流 DG 之间的功率与济,但其忽略了 IC 和交直流 DG 之间的功率分配;文献[22-23]分别将 MFAC 应用于独立交流微电网和独立直流微电网的 SC,但均采用集中式的控制方式,不可避免的会出现集中控制固有的问题,如单点失效、高通信要求等;此外,这两项研究主要针对单一供电形式微电网的功率分配问题,没有涉及 MFAC 在交直流混联微电网中的应用。

本文主要针对传统交直流微电网 DSC 受系统参数变化的影响较大、通信拓扑结构复杂、控制参数不易整定等问题,提出基于 MFAC 的交直流微电网 DSC 策略(MFAC-DSC),该方法利用 DG 的历史采样数据和稀疏通信技术将 DSC 问题转化为两个优化问题的迭代求解。该策略相比于传统的 DSC 策略,有效降低了系统参数变化对 SC 性能的影响,保证了微电网系统一次控制参数有更大的调节范

围;同时无需 IC 参与 SC 通信,减少了通信网络的复杂程度,避免了 IC 通信失效引发的 DG 功率波动以及直流母线电压偏移。

## 1 交直流微电网及其控制结构

### 1.1 交直流微电网的结构

交直流微电网的网架结构如图 1 所示,图中两台交流 DG 和两台直流 DG 分别连接在交、直流母线上<sup>[24-25]</sup>,构成交流子网和直流子网,两个子网通过 IC 进行连接,实现子网间的功率互济。交流子网主要负责交流 DG 和交流负荷的接入,并与上级电网进行连接,实现微电网的并网与离网运行。直流子网主要实现诸如光伏、蓄电池等直流型 DG 的接入并供给微电网内的直流负荷。

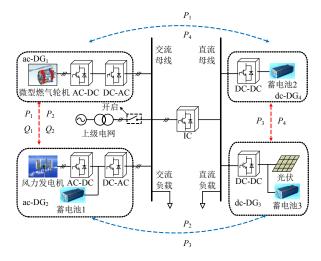
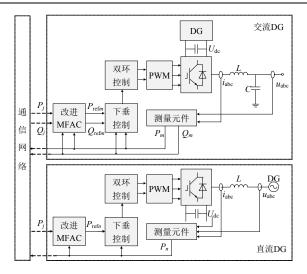


图 1 交直流微电网网架结构和分布式通信 Fig. 1 Structure of hybrid AC/DC microgrid with distributed communication

## 1.2 MFAC-DSC 策略

MFAC-DSC 的控制框图如图 2 所示,图 2(a)、(b)分别为交直流 DG 和 IC 的控制策略,可以看出,MFAC-DSC 是基于 DG 的下垂控制策略,MFAC-DSC 控制器通过通信网络获得相邻 DG 的功率信息,并结合本地 DG 的测量信息来计算下垂控制的功率定值。IC 则采用定直流电压的控制方式,在这种控制方式下,IC 无需与 DG 进行通信,有效减少了通信链路的数量,降低 IC 通信失效给 DSC 带来的影响。

作为 DG 最常用的一次控制策略,下垂控制模拟了交流子网中 P-f和 Q-U之间的下垂特性以及直流子网中  $P_{dc}$ - $U_{dc}$ 之间的下垂特性。下垂控制作为有差调节,单独使用这种控制方式会出现微电网电压频率偏移的问题,这时需要 SC 进行恢复。已有较



(a) 交流 DG 和直流 DG

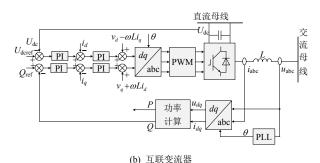


图 2 MFAC-DSC 控制框图 Fig. 2 Block diagram of MFAC-DSC

本文提出的 MFAC-DSC,交流 DG 和直流 DG 的一次控制特性如式(1)所示。

$$\begin{cases} \left\{ \begin{aligned} \omega_{m} &= \omega_{\text{ref}} - n_{\text{pm}} (P_{m} - P_{\text{ref}m}) \\ v_{m} &= V_{\text{ref}} - n_{\text{qm}} (Q_{m} - Q_{\text{ref}m}) \\ v_{\text{den}} &= V_{\text{dcref}} - n_{\text{den}} (P_{\text{den}} - P_{\text{dcrefn}}) \\ n &= N_{\text{ac}} + 1, N_{\text{ac}} + 2, \dots, N_{\text{ac}} + N_{\text{dc}} \end{aligned} \right. \end{cases}$$
(1)

假设交直流微电网有 $N_{ac}$ 台交流DG和 $N_{dc}$ 台直流DG,为了表述方便,将第 1 至 $N_{ac}$ 台DG 定义为

交流 DG;第  $N_{ac}+1$  台 DG 至第  $N_{ac}+N_{dc}$  台 DG 定义 为直流 DG;DG 的总数可以表示为  $N=N_{ac}+N_{dc}$ 。 $\omega_m$ 和  $\omega_{ref}$ 分别表示交流 DG<sub>m</sub> 的角速度及其参考值; $P_m$ 和  $P_{refm}$ 分别表示交流 DG<sub>m</sub> 输出的有功功率及其参 考值; $\nu_m$  和  $\nu_{ref}$  分别表示交流 DG<sub>m</sub> 输出的交流电压 及其参考值; $\nu_m$  和  $\nu_{ref}$  分别表示交流 DG<sub>m</sub> 输出的 无功功率及其参考值; $\nu_m$  和  $\nu_{ref}$  分别表示交流 DG<sub>m</sub> 输出的 无功功率及其参考值; $\nu_m$  和  $\nu_{ref}$  分别表示交流 DG<sub>m</sub> 的有功下垂系数和无功下垂系数; $\nu_{refm}$  分别 表示直流 DG<sub>n</sub> 输出的直流电压及其参考值; $\nu_{refm}$  分别 表示直流 DG<sub>n</sub> 输出的有功功率及其参考 值; $\nu_{refm}$  分别表示直流 DG<sub>n</sub> 的下垂系数。

## 1.3 MFAC-DSC 的稀疏通信

在MFAC-DSC中,利用稀疏通信的手段实现交直流微电网内的 SC,其通信拓扑如图 1 所示。其中,红色箭头指示每个子网内的通信拓扑,每个可控交流 DG(或直流 DG)均需与子网内相邻交流 DG(或直流 DG)进行通信,交换实时功率信息,需要说明的是,"相邻"的含义是指距离最近的相邻通信节点,而并非实际 DG 的位置相邻,这种相邻通信的方式有效减少了通信网络中的信息传输;蓝色箭头指示子网间的通信链路,直流 DG 和交流 DG 的有功功率信息在一条双向链路中进行交换。

IC 采用定直流电压控制方式,其无需参与通信 就能够实现交直流微电网间的功率互济。现有的 DSC<sup>[16]</sup>需要3类通信:子网内通信、子网间通信以 及 IC 与 DG 的通信,其中 IC 的通信压力是最大的, 因为其需要同时与交流 DG 和直流 DG 进行通信, 并且随着微电网规模的扩大, 其通信压力也在不断 增加,最少需要 N+1 条通信链路(N 为交直流 DG 的总数)。相比于传统需要 IC 通信的 DSC,本文提 出的 DSC 策略通过调整 IC 的控制策略来避免通 信,仅需要子网内通信和子网间通信两种通信方式 实现 DSC,解决了传统 DSC 中 IC 的通信压力大的 问题,在保证系统功率分配效果的同时,有效减少 了 DSC 对于通信链路的要求。本文提出的 MFAC-DSC 仅需要 N-1 条通信链路,就可以实现传统 DSC 同样的控制效果,并且两种 DSC 方法通信链路数 的差距会随着交直流 DG 总数的增加而不断增大。 由于 MFAC-DSC 无需 IC 参与通信, 其控制效果不 会受 IC 通信问题的影响,而现有的 DSC 方法在 IC 通信失效时可能会引发交直流 DG 的功率波动与电 压偏移; 而在子网内通信故障和子网间通信故障 时,两种方法的控制效果并没有明显差异。

## 2 改进 MFAC 分布式控制器

由于传统的 MFAC 控制器应用于微电网 SC时,需要使用全网 DG的功率信息,因此仅适用于集中式的 SC结构。本节设计了改进的 MFAC 分布式控制器,仅利用 DG的本地功率信息和相邻 DG的功率信息实现 DSC。

## 2.1 DG 的动态线性化建模

对于如图 1 所示的交直流微电网系统, $DG_i$  的输出功率模型可以利用自回归滑动平均模型(autoregressive moving average model, ARMA)模型表示:

$$\begin{cases} P_{i}(k+1) = f[\vec{P}_{i}^{L_{py}}(k), \vec{P}_{refi}^{L_{pu}}(k)] \\ Q_{i}(k+1) = f[\vec{Q}_{i}^{L_{qy}}(k), \vec{Q}_{refi}^{L_{qu}}(k)] \end{cases}, i \in \{1, 2, \dots, N_{ac} + N_{dc}\}$$
(2)

式中:  $P_i(k+1)$ 和  $Q_i(k+1)$ 分别为  $DG_i$ 在 k+1 时刻输出的有功功率和无功功率;  $P_{refi}(k)$ 和  $Q_{refi}(k)$ 分别为  $DG_i$ 在 k 时刻的有功参考值和无功参考值;  $L_{pu}$ ,  $L_{py}$ ,  $L_{qu}$ 和  $L_{qy}$ 为 4 个正整数,其取值与系统的阶数有关。  $DG_i$ 的输出功率及其参考值向量可表示为

$$\begin{vmatrix} \vec{P}_{i}^{L_{\text{py}}}(k) = [P_{i}(k), P_{i}(k-1), \cdots, P_{i}(k-L_{\text{py}})]^{\text{T}} \\ \vec{P}_{\text{refi}}^{L_{\text{pu}}}(k) = [P_{\text{refi}}(k), P_{\text{refi}}(k-1), \cdots, P_{\text{refi}}(k-L_{\text{pu}})]^{\text{T}} \\ \vec{Q}_{i}^{L_{\text{qy}}}(k) = [Q_{i}(k), Q_{i}(k-1), \cdots, Q_{i}(k-L_{\text{qy}})]^{\text{T}} \\ \vec{Q}_{\text{refi}}^{L_{\text{qu}}}(k) = [Q_{\text{refi}}(k), Q_{\text{refi}}(k-1), \cdots, Q_{\text{refi}}(k-L_{\text{qu}})]^{\text{T}}$$

根据式(2)所表示的 ARMA 模型,通过对其进行动态线性化,存在一个根据历史采样数据进行整定的伪偏导数(pseudo partial derivative,PPD) $\phi(k)$ ,使得输出功率动态线性化后的模型如式(3)所示。需要注意的是,对式(2)进行动态线性化时需要满足两个假设条件<sup>[18]</sup>:假设 1:函数 f 对于其自变量的偏导数连续;假设 2:系统满足广义 Lipschitz 条件。对于实际的控制系统,这两个假设条件一般是合理的,并且是可以接受的<sup>[9,18,21-23]</sup>。

$$\begin{cases} \Delta P_i(k+1) = \phi_{pi}(k) \Delta P_{refi}(k) \\ \Delta Q_i(k+1) = \phi_{qi}(k) \Delta Q_{refi}(k) \end{cases}$$
(3)

式中:  $\phi_{pi}(k)$ 为有功 PPD;  $\phi_{qi}(k)$ 为无功 PPD, 这两个值通过历史数据计算获得,有功功率和无功功率的差分如下:

$$\begin{cases} \Delta P_{i}(k+1) = P_{i}(k+1) - P_{i}(k) \\ \Delta Q_{i}(k+1) = Q_{i}(k+1) - Q_{i}(k) \\ \Delta P_{\text{ref}i}(k) = P_{\text{ref}i}(k) - P_{\text{ref}i}(k-1) \\ \Delta Q_{\text{ref}i}(k) = Q_{\text{ref}i}(k) - Q_{\text{ref}i}(k-1) \end{cases}$$

本文对于动态线性化方程需要做出以下3点说明<sup>[18]</sup>: 1) PPD 没有明确的物理含义,仅以数学意

义的形式存在; 2) 在满足假设 1 和假设 2 的条件下,可以通过严格数学推导证明式(2)和式(3)是等价的; 3) ARMA 的阶数不影响等价关系的成立与否,ARMA 的阶数越低,则 PPD 随时间的变化速度越慢,更容易利用历史采样数据对其进行估计。

## 2.2 改进 MFAC 分布式控制器

现阶段,针对微电网和 DG 的控制大多依赖于状态反馈,通过将采集得到的状态信息代入已知或部分已知的系统模型,从而计算控制系统输入。然而,这种状态反馈的思想忽略了对于历史采样数据的挖掘,历史数据中包含了系统模型的有关信息,这种信息不仅反映了当前系统的参数结构,而且体现了系统参数结构的变化。如果能够准确利用历史数据对控制系统进行调整,可以有效解决控制器参数设计困难、应用场景有限等问题。

MFAC 利用历史采样数据对交直流微电网系统的动态线性化模型进行调整,已有研究将其应用于直流微电网的集中式二次控制<sup>[9]</sup>。然而,传统的MFAC二次控制策略需要全网 DG 的输出功率信息,仅适用于集中式的二次控制方式。这里,对传统MFAC 的目标函数进行改进,使其仅需要相邻 DG的功率信息即可实现交直流微电网的二次控制。

在交直流微电网中,对于采用下垂控制的 DG,MFAC-DSC 方法可以通过同一个框架进行表述,在该框架下,MFAC-DSC 与有功 DSC、无功 DSC 变量之间的对应关系如表 1 所示,其中  $s \in \{p,q\}$ 代表有功 DSC 和无功 DSC, $i \in \{1,2,...,N\}$ 表示 DG 的编号, $\phi_{si}$ 对应动态线性化模型(式(3))的 PPD, $u_{si}$ 、 $v_{si}$ 、 $v_{si}$ 和  $v_{siref}$ 分别对应交直流 DG 下垂控制(式(1))的相关变量。

表 1 MFAC-DSC 的变量对应关系
Table 1 Corresponding relationship of variables in MFAC-DSC

MFAC-DSC	有功 DSC(交流/直流)	无功 DSC
$\phi_{si}$	有功 PPD $\phi_{pi}$	无功 PPD $\phi_{qi}$
$u_{si}$	有功参考 $P_{\text{refi}}/P_{\text{dcrefi}}$	无功参考 $Q_{refi}$
$y_{si}$	有功功率 $P_i/P_{dci}$	无功功率 $Q_i$
$x_{si}$	角频率 $o_i$ /直流电压 $v_{dci}$	交流电压 $v_i$
$x_{siref}$	角频率参考 $\omega_{\rm ref}$ /直流电压参考 $V_{ m dcref}$	交流电压参考 $V_{\rm ref}$

MFAC 分布式控制器主要通过历史采样点对系统的动态线性化模型进行预测。预测方法可转化为优化问题的求解,其目标函数如式(4)所示。

$$\min J[\hat{\phi}_{si}(k)] = [\Delta y_{si}(k) - \hat{\phi}_{si}(k) \Delta u_{si}(k)]^{2} + \mu |\hat{\phi}_{si}(k) - \hat{\phi}_{si}(k-1)|^{2}$$
(4)

式中 $\hat{\phi}_{si}(k)$ 是在 k 时刻 DG<sub>i</sub> 的 PPD 估计值, $\mu$ >0 为权重系数。输入输出变量的差分表示如下:

$$\begin{cases} \Delta y_{si}(k) = y_{si}(k) - y_{si}(k-1) \\ \Delta u_{si}(k) = u_{si}(k) - u_{si}(k-1) \end{cases}$$

PPD 预测的目标函数由两部分组成,第一部分对应系统的动态线性化方程(式(3)),其代表当前PPD 估计值所表征的方程输出与实际系统输出之间的残差平方和,这一项求最小是为了通过最小二乘算法,利用历史数据得到最接近式(3)所描述输入输出关系的 PPD 估计值  $\hat{\phi}_{si}(k)$ ;第二部分是一个惩罚项,其建立了第 k 时刻 PPD 估计值  $\hat{\phi}_{si}(k)$ 与第 k-1时刻 PPD 估计值  $\hat{\phi}_{si}(k)$ 和第 k-1时刻的 PPD 估计值

对于使目标函数式(4)取得最小值的解 $\hat{\phi}_{si}(k)$  =  $\hat{\phi}_{si}^*(k)$ , 认为是在 k 时刻 PPD 的最优估计值,并可以据此求解另一个优化问题获得第 k 时刻的系统输入。在 MFAC 分布式控制器中,其目标函数表达式如式(5)所示。

 $\min J[u_{si}(k)] = \xi_{si}^2(k+1) + \lambda [u_{si}(k) - u_{si}(k-1)]^2$  (5) 式中:  $\lambda > 0$  为权重系数;  $\xi_{si}(k+1)$ 的表达式如下:

$$\xi_{si}(k+1) = \alpha_{si}[x_{siref} - x_{si}(k)] + \sum_{j \in N_i} a_{ij}[y_{sj}(k) - y_{si}(k+1)]$$

式中:  $N_i$ 是与  $DG_i$  相邻的 DG 所组成的集合;  $a_{ij}>0$  表示  $DG_i$  和  $DG_j$  之间相邻;  $\alpha_{si}$  表示电压频率恢复系数;  $\xi_{si}(k+1)$ 的表达式由两部分组成,分别对应交直流微电网 DSC 控制中的两个目标:  $1)\alpha_{si}[x_{siref}-x_{si}(k)]$ 一项表示电压和频率与参考值之间的误差,其越小则代表交直流微电网的电压频率越接近额定值,即实现电压频率恢复;  $2)\sum_{j\in N_i}a_{ij}[y_{sj}(k)-y_{si}(k+1)]$ 表示

DG<sub>i</sub>与相邻 DG<sub>j</sub>输出功率之间的误差,其越小则表明相邻 DG 之间输出功率的差越小,即实现了全网 DG 的功率分配。当 $\xi_i(k+1) \rightarrow 0$  时,则代表在 k+1 时刻微电网电压和频率恢复到其额定值,并且 DG<sub>i</sub> 与相邻 DG 的输出功率达到一致,如果微电网内所有 DG 的输出功率均与相邻 DG 达到一致,则全网 DG 的输出将达成一致,即实现了全网的功率分配。

需要注意的是,MFAC-DSC 不仅能够解决交直 流微电网的功率均分问题,还能够实现其比例分配, 这时仅需要通过通信网络传输标幺值输出功率,即 采用 DG 输出功率除以其功率承担比例。这样,当 利用 MFAC-DSC 实现各个 DG 输出功率标幺值的一 致时,等同于各个 DG 输出功率的比例分配。

### 2.3 控制算法求解

MFAC 分布式控制器需要对式(4)和(5)进行求解,有较多可行的方法,如牛顿法、拟牛顿法等。但是这些优化问题的求解都是基于多次迭代,将这些方法应用于 SC 时,需要综合考虑控制算法的复杂度与控制器计算时间。

MFAC 分布式控制器对于式(4)和(5)的求解是基于非线性规划的一阶必要条件  $\nabla J = 0$  ,得到如式(6)—(8)所示的优化求解迭代方程。其中, $\eta$ 、 $\rho$  为优化求解过程的步长因子,  $d_i = \sum_{j=1,j\neq i}^N a_{ij}$  ,  $\varphi_{si}(k)$  通过  $DG_i$  与相邻 DG 的交互通信获得,控制器的其他参数均来自于历史采样数据和当前状态反馈。

$$\hat{\phi}_{si}(k) = \hat{\phi}_{si}(k-1) + \frac{\eta \Delta u_{si}(k-1)}{\mu + |\Delta u_{si}(k-1)|^2} \times \left[ \Delta y_{si}(k) - \hat{\phi}_{si}(k-1) \Delta u_{si}(k-1) \right]$$
(6)

$$u_{si}(k) = u_{si}(k-1) + \frac{\rho d_i \hat{\phi}_{si}(k)}{\lambda + |d_i \hat{\phi}_{si}(k)|^2} \varphi_{si}(k)$$
 (7)

$$\varphi_{si}(k) = \alpha_{si}[x_{siref} - x_{si}(k)] + \sum_{j \in N_i} a_{ij}[y_{sj}(k) - y_{si}(k)]$$
 (8)

为了提高 PPD 估计算法对非线性系统中时变 参数的跟踪能力,需要在特定情况下对 PPD 进行重置<sup>[32]</sup>,具体的重置方法如式(9)所示。

$$\hat{\phi}_{si}(k) = \hat{\phi}_{si}(1) \text{if } \left| \hat{\phi}_{si}(k) \right| \le \varepsilon \tag{9}$$

综上所述,MFAC 分布式控制器的流程图如图 3 所示。

## 3 稳定性分析

本节给出 MFAC-DSC 的稳定性证明,分析迭代更新式(6)—(8)结果的有界性和收敛性。已有相关文献研究了 MFAC 控制器的稳定性问题<sup>[18,33]</sup>,因此部分结论直接以引理的形式给出。

假设  $3^{[33]}$ : 对于  $\forall i \in \{1,2,\cdots,N\}$ ,  $\exists \varepsilon>0$ , 使 得  $\phi_i>\varepsilon>0$ 。

引理  $1^{[18]}$ : 利用式(6)更新得到 PPD 的真实值  $\phi_i(k)$  和估计值  $\hat{\phi_i}(k)$  有界,并且  $\sup_{k>0}\{|\phi_i(k)|\}=b$ 。

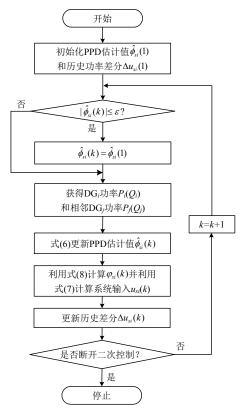


图 3 MFAC 分布式控制器流程图

Fig. 3 Flow chart of MFAC distributed controller

假设 4: 对于动态线性化方程式(3),通过调整系统输入 u 和系统输出 y 的量纲,使得 b 足够小,即对于  $\forall \kappa > 0$ ,均可以保证  $0 < b < \kappa$  存在。

引理 2: 对于任意矩阵  $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$  ,向量  $x \in \mathbb{R}^n$  ,则矩阵范数不等式 $\|Ax\|_1 \le \|A\|_1 \cdot \|x\|_1$  成立。

引理  $3^{[34]}$ : 对于具有正对角元的不可约次随机矩阵集合 $\Omega \subset \mathbb{R}^{N \times N}$ ,有下列不等式成立:

$$\|\boldsymbol{M}(N)\boldsymbol{M}(N-1)\cdots\boldsymbol{M}(1)\|_{2} \leq \beta$$

式中:  $0 \le \beta \le 1$ ;  $M(k) \in \Omega$  (k = 1, 2, ..., N) 为 N 个任意 选取的次随机矩阵。

定理 1: 在假设 1—4 的条件下,对于采用式(1) 作为 DG 一次控制方式的交直流微电网,采用式(6)—(8)所示的 MFAC-DSC 策略可以保证:

$$\lim_{k \to \infty} \varphi_{si}(k) = 0, \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}, \forall s \in \{p, q\}$$

其中,MFAC-DSC 的参数选择方法如下:

1) 
$$\exists \lambda_{\min} > 0$$
, 使得  $\lambda > \lambda_{\min} > b^2$ ;

2) 
$$\rho < 2/\left[\max_{i \in \{1,2,\cdots N\}} \left(\frac{\alpha_{si}n_{si}}{b} - \alpha_{si}n_{si} + d_i\right)\right]$$

3)  $\alpha_{si}n_{si} < d_i$ 

关于定理 1 的数学证明见附录 A。

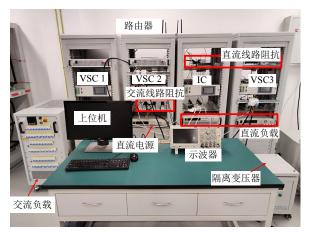
对于定理 1 需要做出以下 3 点说明: 1) 参数

选择方法较为保守,其参数选择方法是通过数学缩放得到,是保证系统稳定性的充分条件,但是不满足定理 1 参数选择要求的 DSC 系统仍然有可能稳定; 2) 给出 MFAC-DSC 中控制参数  $\alpha_i$ ,  $\lambda$  和  $\rho$  的取值范围,有关  $\mu$  和  $\eta$  的取值范围已经有相关文献进行研究<sup>[33]</sup>,文中没有详细展开; 3) 参数可选择范围较大,其只能保证系统的稳定性,对于控制性能要求需要根据实际控制系统进行调整,但调整范围需要满足定理 1 的要求,参数调整的目的是在满足系统稳定性的前提下提高系统的控制性能,其主要依赖实际系统和工程经验。

## 4 实验验证

## 4.1 实验平台

为了验证 MFAC-DSC 策略的可行性,利用电 力电子设备搭建了如图 4 所示的交直流微电网实验 平台,用电压源型变流器(voltage source converter, VSC)来模拟交流 DG、直流 DG 和 IC, 其中 VSC1 和 VSC2 模拟交流 DG, VSC3 模拟直流 DG。VSC 和交直流微电网的结构参数如附表 B1 所示。在实 验的开始阶段,交流子网共接入了900+300jVA的 负荷,直流子网共接入了600W的负荷。DG的一 次控制策略部署在 VSC 内部的 TMS320F28335 DSP 控制器上,其主要负责采集 VSC 的电压电流, 实现双环控制和下垂控制算法,实验过程中的采集 得到的电压电流及功率信息均来自于 DSP 控制器。 树莓派开发板作为 VSC 的二次控制器, 部署了 MFAC-DSC 算法, 其通过高速串行总线获取 VSC 的功率、电压和频率信息并向其下达功率指令。树 莓派之间通过无线通信交换 VSC 的实时功率信息, 用于MFAC-DSC算法的计算。交直流微电网中VSC 和 IC 的控制参数如附表 B2 所示。



(a) 物理接线图

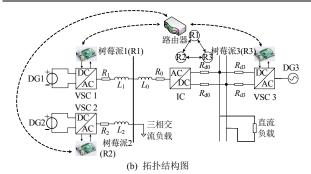


图 4 交直流微电网实验平台

Fig. 4 Experimental platform of hybrid AC/DC microgrid

在 DG 的下垂控制中,需要利用一阶低通滤波器对有功功率和无功功率进行滤波 $^{[35]}$ ,实验选取的滤波器截止频率 $\omega_c=2\pi\cdot20\,\mathrm{rad/s}$ 。一阶低通滤波器保证了在有功功率和无功功率的 ARMA(式(2))中阶数  $L_{\mathrm{py}}=L_{\mathrm{qy}}=1$ ,而  $L_{\mathrm{pu}}$  和  $L_{\mathrm{qu}}$  与交直流微电网状态变量的个数有关,会随着交直流微电网网架结构、负荷状况的不同而有所差异。对于 PPD 估计参数 $\eta$ 和 $\mu$ ,当其取值满足  $0<\eta<1$  且 $\mu>0$  时 $\phi_{\mathrm{st}}(k)$ 有界 $^{[33]}$ ;对于系统输入估计参数 $\rho$ 和 $\lambda$ ,可以根据定理 1 确定的稳定边界进行参数选择。MFAC-DSC 对参数的依赖程度不高,只需要保证参数满足稳定性条件,并根据二次控制的性能要求在稳定性条件所确定的范围内调整参数取值即可,实验中使用的 MFAC 分布式控制器的参数如附表 B3 所示。

## 4.2 功率分配

为了验证 MFAC-DSC 控制策略在 DG 之间功率均分和功率比例分配的有效性以及对微电网电压频率恢复的能力,进行了两组实验验证 MFAC-DSC 的控制效果。

#### 4.2.1 功率均分

MFAC-DSC 策略下的功率均分实验结果如图 5 所示,图 5(a)、(b)分别展示的是实验过程中各台 VSC 的有功功率和无功功率均分情况,实验一共持续了  $60 \, \text{s}$ ,分为  $3 \, \text{个阶段}$ : 1)  $t=10 \, \text{s}$  时,开启 SC; 2)  $t=30 \, \text{s}$  时,增加  $300 \, \text{W}$  直流负荷; 3)  $t=50 \, \text{s}$  时,减少  $600 \, \text{W}$  交流负荷。

从实验结果可以看出,在开启 SC 后,所有 VSC 的输出功率(有功功率和无功功率)达到了均分的状态;负荷的增减均不会破坏功率均分的效果,所有 VSC 都参与对负荷变化的调整。

### 4.2.2 功率比例分配

为了验证 MFAC-DSC 策略能够使 VSC 按照三次控制给定的功率比例进行分配,进行了功率比例分配实验,假定三次控制给定的功率比例为  $P_1$ : $P_2$ :

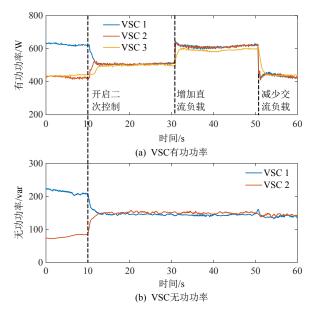


图 5 功率均分实验中 VSC 的输出功率

Fig. 5 Output power of VSC in the experiment under power sharing

 $P_{3}$ =3:2:1,实验结果如图 6 所示,图 6(a)为 VSC 功率比例分配的效果,图 6(b)、(c)分别为实验过程中交流子网频率和直流母线电压的变化,实验过程采用与 4.2.1 节相同的负荷变化情况。

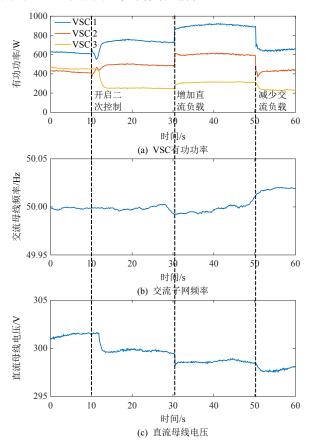


图 6 功率比例分配实验中的有功功率、频率和直流电压 Fig. 6 Active power, frequency and DC voltage in the experiment under power proportional distribution

从实验结果来看,在开启 SC 后,交直流微电网内负荷能够精准的按照 3:2:1 的比例在各个 VSC 中进行分配,负荷的增加和减少均不会影响功率在 VSC 中的分配情况;整个实验过程中,交流子网的频率和直流子网的直流母线电压均在额定值附近运行,并且在开启 SC 后,交流子网的频率和直流子网的母线电压会向其额定值方向调整,说明 MFAC-DSC 策略具有电压频率恢复的能力。

#### 4.3 通信失效

在 MFAC-DSC 策略中,由于借助了通信技术实现功率分配,需要考虑通信不可靠对功率分配效果以及稳定性的影响。图 7 为 VSC2 失效前后,交直流微电网中各台 VSC 的有功功率。实验一共进行了 3 次调整: 1) t=10 s 时,将 VSC2 的通信断开; 2) t=30 s 时,增加 300 W 的直流负荷; 3) t=50 s 时,VSC2 通信恢复。

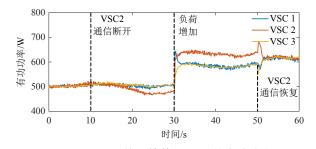


图 7 VSC2 通信失效前后 VSC 的有功功率 Fig. 7 Active power of VSC before and after VSC2 communication failure

从实验结果来看,在 VSC2 通信失效后,其输出功率会偏离其他 VSC,系统负荷的变化会影响功率差异的大小。但其他两台 VSC 仍能保持功率均分的状态,不会受到 VSC2 通信失效的影响。在 VSC2 通信恢复后,所有的 VSC 恢复到功率均分的状态。因此,在 MFAC-DSC 策略下,单台 VSC 的通信失效不会影响系统稳定性,只会导致 VSC 的功率分配存在偏差。

### 4.4 对比分析

相比于传统的 DSC 策略,MFAC-DSC 策略在一次控制参数变化和通信拓扑复杂度等方面具有更大优势。本文在如图 4 所示的交直流微电网实验平台中实现了文献[16]的 DSC 策略,并与 MFAC-DSC 策略在下垂系数变化和 IC 通信失效两个方面进行对比。

#### 4.4.1 下垂系数变化

改变 VSC3 下垂系数的对比实验结果如图 8 所示,图 8(a)、(b)分别展示的是在 MFAC-DSC 下和

在文献[16]的 DSC 下各台 VSC 的有功功率情况,在实验过程中一共进行了 4 次调整: 1)  $t=10 \,\mathrm{s}$  时,开启 SC; 2)  $t=25 \,\mathrm{s}$  时,将  $n_{\mathrm{dc}}$  增大至  $40 \,\mathrm{V/kW}$ ; 3)  $t=40 \,\mathrm{s}$  时,将  $n_{\mathrm{dc}}$  增大至  $50 \,\mathrm{V/kW}$ ; 4)  $t=50 \,\mathrm{s}$  时,将  $n_{\mathrm{dc}}$  恢复至额定值  $30 \,\mathrm{V/kW}$ 。

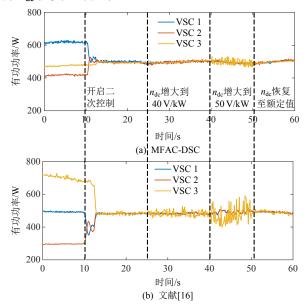


图 8 下垂系数变化 MFAC-DSC 与传统 DSC 的对比 Fig. 8 Comparison between MFAC-DSC and traditional DSC with droop coefficient changing

显然,当 VSC3 的下垂系数增大到 40V/kW, 文献[16]提出的 DSC 策略会导致 VSC3 的输出功率 发生波动,而此时 MFAC-DSC 方法仍然能够保持 VSC3 功率稳定。在下垂系数增大到 50 V/kW 时, MFAC-DSC 也会出现功率波动,但相比于文献[16] 的 DSC 策略,其功率波动范围较小。

从实验结果可以看出,MFAC-DSC 相比于传统DSC 受一次控制参数的影响较小,在一次控制参数发生变化时,MFAC-DSC 可以保证精准的二次控制效果,而传统 DSC 可能会出现功率波动的问题。这种优势存在的原因是 MFAC-DSC 的控制参数会根据历史采样数据进行调整,PPD 估计算法(式(6))会根据历史采样点估计最佳的系统的动态线性化参数,保证了 MFAC-DSC 更好的控制性能。

### 4.4.2 IC 通信失效

文献[16]的 DSC 算法要求 IC 参与通信,但其通信失效可能导致 DSC 性能下降甚至引发系统失稳。这里,将文献[16]提出的 DSC 算法部署到实验平台,在 IC 通信故障的情况下进行实验,实验结果如图 9 所示。在实验过程中,*t=*0 s 时切断 IC 通信,并在 *t=*10、30 和 50 s 分别进行增加 600 W 直流负载、减少 300 W 直流负载和恢复 IC 通信操作。

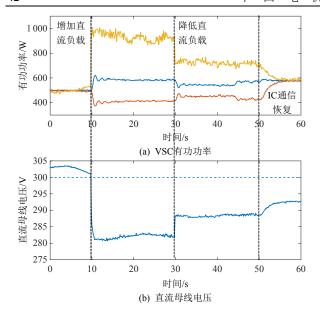


图 9 文献[16]DSC 算法在 IC 通信失效前后实验结果 Fig. 9 Experimental results of DSC algorithm in Ref.[16] before and after IC communication failure

从实验结果可以看出,当 IC 通信失效后,负荷的变化会引起功率波动,并影响直流电压,导致直流电压出现较大偏移。这是由于此时 IC 失去了平衡交流子网与直流子网功率的能力,需要将 DSC 控制策略退出,以保证交直流微电网的安全运行。而 MFAC-DSC 不需要 IC 参与到二次控制的通信过程当中,在 IC 出现通信失效的情况时,MFAC-DSC 方法仍能保持正常的功率分配效果。对比此时 MFAC-DSC 的实验结果(图 5)与现有 DSC 的实验结果(图 9),MFAC-DSC 避免了因 IC 通信失效给 DSC 带来的问题。

## 5 结论

本文提出了基于改进 MFAC 的交直流微电网 DSC 策略,实现了 DG 之间精准的功率分配和交直流微电网的电压频率恢复,通过对 DSC 通信结构的设计,仅利用相邻 DG 之间的功率信息即可实现二次控制目标而无需 IC 参与通信过程,解决了传统方法通信拓扑复杂的问题;并利用历史采样数据对交直流微电网当前运行状态进行估计,减弱了一次控制参数变化对控制性能的影响。稳定性理论分析结果表明,合适的控制参数选择可以保证 MFAC-DSC 迭代过程的收敛性;基于真实交直流微电网平台的实验结果表明,MFAC-DSC 能够适应更大范围的 DG 下垂系数波动,并在 IC 通信失效时保持原有的控制性能。

## 参考文献

- [1] 别朝红,林超凡,李更丰,等.能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J].中国电机工程学报,2020,40(9):2735-2744.
  - BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2744(in Chinese).
- [2] 别朝红,林雁翎,邱爱慈. 弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(22):1-9.
  - BIE Zhaohong, LIN Yanling, QIU Aici. Concept and research prospects of power system resilience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 1-9(in Chinese).
- [3] 郑子萱,倪扶瑶,汪颖,等. 基于模型预测控制混合储能系统的直流微电网韧性提升策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 152-159.

  ZHENG Zixuan, NI Fuyao, WANG Ying, et al. Operation resilience enhancing strategy of DC microgrid based on model predictive controlled hybrid energy storage system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 152-159(in Chinese).
- [4] TRIPS, CUCUZZELLAM, CHENG Xiaodong, et al. Distributed averaging control for voltage regulation and current sharing in DC microgrids[J]. IEEE Control Systems Letters, 2019, 3(1): 174-179.
- [5] OLIVARES D E, MEHRIZI-SANI A, ETEMADI A H, et al. Trends in microgrid control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1905-1919.
- [6] SAHOO S K, SINHA A K, KISHORE N K. Control techniques in AC, DC, and hybrid AC DC microgrid: a review[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(2): 738-759.
- [7] 顾伟,楼冠男,柳伟.微电网分布式控制理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2019. GU Wei, LOU Guannan, LIU Wei. Distributed control theory and method of microgrid[M]. Beijing: Science Press, 2019(in Chinese).
- [8] 李得民,吴在军,赵波,等.基于模型预测控制的孤岛 微电网二次调节策略[J]. 电力系统自动化,2019,43(10): 60-67.

  LI Demin, WU Zaijun, ZHAO Bo, et al. Secondary regulation strategy for islanded microgrid based on model predictive control[J]. Automation of Electric Power
- [9] 米阳,常俊飞,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].

Systems, 2019, 43(10): 60-67(in Chinese).

- Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 92-98(in Chinese).
- [10] EGHTEDARPOUR N, FARJAH E. Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1494-1505.
- [11] YANG Pengcheng, XIA Yanghong, YU Miao, et al. A decentralized coordination control method for parallel bidirectional power converters in a hybrid AC-DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6217-6228.
- [12] 赵睿,章雷其,辛焕海,等。微网孤岛运行的分散自趋 优控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 30-36. ZHAO Rui, ZHANG Leiqi, XIN Huanhai, et al. A decentralized self-optimizing control strategy for islanded Microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 30-36(in Chinese).
- [13] 郭方洪,李赫,王函韵,等.直流微电网分布式弹性二次电压恢复与电流分配控制[J].电力系统自动化,2022,46(4):84-92.
  - GUO Fanghong, LI He, WANG Hanyun, et al. Distributed resilient secondary voltage restoration and current distribution control of DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 84-92(in Chinese).
- [14] 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.

  LV Zhengyu, SU Chen, WU Zaijun, et al. Distributed secondary control strategy and its communication
- secondary control strategy and its communication topology optimization for islanded microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 209-219(in Chinese).

  [15] 孙伟,方昭,杨建平,等.考虑随机时变延时的孤岛微
- 电网分布式二次控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 864-875.

  SUN Wei, FANG Zhao, YANG Jianping, et al. Distributed secondary control of islanded microgrid with stochastic time-varying delay[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 864-875(in Chinese).
- [16] ESPINA E, CÁRDENAS-DOBSON R, SIMPSON-PORCO J W, et al. A consensus-based secondary control strategy for hybrid AC/DC microgrids with experimental validation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(5): 5971-5984.
- [17] 杨炜晨,苗世洪,张世旭,等. 交直流混合微电网群分布式自治经济控制策略[J]. 中国电机工程学报,2021,41(3): 857-867.

  YANG Weichen,MIAO Shihong,ZHANG Shixu,et al. Distributed autonomous economic control strategy for AC/DC hybrid microgrid cluster[J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(3): 857-867(in Chinese).

- [18] 侯忠生,金尚泰. 无模型自适应控制-理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013. HOU Zhongsheng, JIN Shangtai. Model-free adaptive control — theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2013(in Chinese).
- [19] 青岛大学系统科学研究院. MFAC 应用领域[Application Fields][EB/OL](2021-12-19)[2022-06-01] . https://assc. qdu.edu.cn/info/1148/1285.htm.

  Academy of System Science Control of Qingdao University . Application Fields of MFAC[EB/OL] (2021-12-19)[2022-06-01] . https://assc.qdu.edu.cn/info/1148/1285.htm(in Chinese).
- [20] ZHANG Huaguang, ZHOU Jiaguo, SUN Qiuye, et al. Data-driven control for interlinked AC/DC microgrids via model-free adaptive control and dual-droop control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 557-571.
- [21] 周建国. 网络化交直流混合微电网功率分担的分布式协同控制方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018. ZHOU Jianguo. Researches on distributed coordinated control methods of power sharing for networked AC/DC hybrid microgrids[D]. Shenyang: Northeastern University, 2018(in Chinese).
- [22] 常俊飞. 基于数据驱动的直流微电网群协调控制与优化运行[D]. 上海: 上海电力大学, 2021. CHANG Junfei. Data driven based coordinated control and optimized operation of dc microgrid cluster[D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2021(in Chinese).
- [23] MA Zixiao, WANG Zhaoyu, GUO Yifei, et al. Nonlinear multiple models adaptive secondary voltage control of microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 227-238.
- [24] YOO H J, NGUYEN T T, KIM H M. Consensus-based distributed coordination control of hybrid AC/DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2): 629-639.
- [25] LI Zhongwen, CHENG Zhiping, SI Jikai, et al. Distributed event-triggered hierarchical control to improve economic operation of hybrid AC/DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 37(5): 3653-3668.
- [26] YAO Weitao, WANG Yu, XU Yan, et al. Distributed weight-average-prediction control and stability analysis for an islanded microgrid with communication time delay[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1): 330-342.
- [27] ZHANG Runfan, HREDZAK B. Nonlinear sliding mode and distributed control of battery energy storage and photovoltaic systems in AC microgrids with communication delays[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(9): 5149-5160.

- [28] SIMPSON-PORCO J W, SHAFIEE Q, DÖRFLER F, et al. Secondary frequency and voltage control of islanded microgrids via distributed averaging[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11): 7025-7038.
- [29] LI Yu, ZHANG Zhenbin, 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.
- [30] NASIRIAN V, MOAYEDI S, DAVOUDI A, et al. Distributed cooperative control of DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4): 2288-2303.
- [31] HAMAD A A, AZZOUZ M A, EL-SAADANY E F. Multiagent supervisory control for power management in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 1057-1068.
- [32] 吴熙,王梦婷,施星宇,等.基于无模型自适应控制的 双馈风机次同步振荡附加阻尼控制方法[J].中国电机工程学报,2022,42(10):3601-3613.
  - WU Xi, WANG Mengting, SHI Xingyu, et al. SSO supplementary damping control method for DFIG based on model-free adaptive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3601-3613(in Chinese).
- [33] BU Xuhui, YU Qiongxia, HOU Zhongsheng, et al. Model free adaptive iterative learning consensus tracking control for a class of nonlinear multiagent systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics: Systems, 2019, 49(4): 677-686.
- [34] YANG Shiping, XU Jianxin, LI Xuefang. Iterative learning control with input sharing for multi-agent consensus tracking[J]. Systems & Control Letters, 2016, 94: 97-106.
- [35] 陈杰, 闫震宇, 赵冰, 等. 下垂控制三相逆变器阻抗建模与并网特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4846-4856.
  CHEN Jie, YAN Zhenyu, ZHAO Bing, et al. On the impedance modelling and grid-connected characteristics of the three-phase droop controlled inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4846-4856(in Chinese).

#### 附录 A 定理 1 的数学证明

定理 1: 在假设 1—4 的条件下,对于采用式(1)作为 DG 一次控制方式的交直流微电网,采用式(6)—(8)所示的 MFAC-DSC 策略可以保证:

$$\begin{split} &\lim_{k\to\infty} \varphi_{si}(k) = 0\;,\;\; \forall i \in \{1,2,\ldots,N_{\mathrm{ac}} + N_{\mathrm{dc}}\}\;\; \forall s \in \{p,q\} \\ &\text{其中,MFAC-DSC 的参数选择方法如下:} \\ &1 、 \exists \lambda_{\min} > 0\;,\;\; 使得\; \lambda > \lambda_{\min} > b^2\;; \end{split}$$

$$2, \rho < \frac{2}{\max_{i \in \{1, 2, \dots N\}} \left( \frac{\alpha_{si} n_{si}}{b} - \alpha_{si} n_{si} + d_i \right)};$$

 $3 \cdot \alpha_{si} n_{si} < d_i$ 

证明:

在交直流微电网有功 DSC 和无功 DSC 统一的表示方法 下,系统的动态线性化模型可以表示为

$$\Delta y_{si}(k+1) = \phi_{si}(k) \Delta u_{si}(k) \tag{A1}$$

 $DG_i$ 其在 k 时刻的下垂控制策略如式(A2)所示。

$$x_{si}(k) = x_{siref} - n_{si}[y_{si}(k) - u_{si}(k-1)]$$
 (A2)

式中 $n_{si}$ 为下垂控制的下垂系数,分别对应交流 DG 有功 DSC 的  $n_{pi}$  和无功 DSC 的  $n_{qi}$  以及交流 DG 有功 DSC 的  $n_{dci}$ 。

将式(A2)代入式(8),可以得到:

$$\varphi_{si}(k) = \alpha_{si} n_{si} [y_{si}(k) - u_{si}(k-1)] + \sum_{j \in N_i} a_{ij} [y_{sj}(k) - y_{si}(k)] =$$

$$(\alpha_{si} n_{si} - d_{si}) y_{si}(k) - \alpha_{si} n_{si} u_{si}(k-1) + \sum_{i \in N_i} a_{ij} y_{sj}(k)$$
(A3)

式(A3)在第 k+1 时刻做差分,并代入动态线性化模型式(A1),可以得到:

$$\varphi_{si}(k+1) - \varphi_{si}(k) = (\alpha_{si}n_{si} - d_i)\Delta y_{si}(k+1) - \alpha_{si}n_{si}\Delta u_{si}(k) + \sum_{j \in N_i} a_{ij}\Delta y_{sj}(k+1) = (\alpha_{si}n_{si} - d_i)\phi_{si}(k)\Delta u_{si}(k) - \alpha_{si}n_{si}\Delta u_{si}(k) + \sum_{j \in N_i} a_{ij}\phi_{sj}(k)\Delta u_{sj}(k) = [\alpha_{si}n_{si}\phi_{si}(k) - \alpha_{si}n_{si} - d_i\phi_{si}(k)]\Delta u_{si}(k) + \sum_{i \in N} a_{ij}\phi_{sj}(k)\Delta u_{sj}(k)$$
(A4)

对于交直流微电网内的所有 DG,可以将式(A4)写成向量的形式,如式(A5)所示。

$$\vec{\boldsymbol{\varphi}}_{s}(k+1) - \vec{\boldsymbol{\varphi}}_{s}(k) = \boldsymbol{P}_{s}(k)\Delta \vec{\boldsymbol{u}}_{s}(k) \tag{A5}$$

其中,

$$\vec{\boldsymbol{\varphi}}_{s}(k) = [\varphi_{s1}(k) \quad \varphi_{s2}(k) \quad \cdots \quad \varphi_{sN}(k)]^{\mathrm{T}}$$

$$\Delta \vec{\boldsymbol{u}}_{s}(k) = [\Delta u_{s1}(k) \quad \Delta u_{s2}(k) \quad \cdots \quad \Delta u_{sN}(k)]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{P}_{s}(k) = [\Delta u_{s1}(k) \quad \Delta u_{s2}(k) \quad \cdots \quad \Delta u_{sN}(k)]^{\mathrm{T}}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_{s1}n_{s1}\phi_{s1}(k) - \alpha_{s1}n_{s1} - d_1\phi_{s1}(k) \cdots & a_{1N}\phi_{sN}(k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{sN}\phi_{s1}(k) & \cdots \alpha_{sN}n_{sN}\phi_{sN}(k) - \alpha_{sN}n_{sN} - d_N\phi_{sN}(k) \end{bmatrix}$$

将式(7)写成向量化的形式,如式(A6)所示。

$$\Delta \vec{\boldsymbol{u}}_s(k) = \boldsymbol{H}_s(k) \vec{\boldsymbol{\varphi}}_s(k) \tag{A6}$$

式中 
$$\mathbf{H}_{s}(k) = d_{\text{iag}}\left[\frac{\rho d_{i}\hat{\phi}_{si}(k)}{\lambda + |d_{i}\hat{\phi}_{si}(k)|^{2}}\right]$$
。

将式(A6)代入式(A5), 得到式(A7)。

$$\vec{\boldsymbol{\varphi}}_s(k+1) = [\boldsymbol{I}_N + \boldsymbol{H}_s(k)\boldsymbol{P}_s(k)]\vec{\boldsymbol{\varphi}}_s(k) = \boldsymbol{M}_s(k)\vec{\boldsymbol{\varphi}}_s(k) \quad (A7)$$

式中:  $I_N \in \mathbb{R}^{N \times N}$  为单位矩阵;  $M_s(k)$ 矩阵的元素  $m_{ij}(k)$ 表达式如下:

$$n_{ij}(k) = \begin{cases} 1 + \frac{\rho d_i \hat{\phi}_{si}(k)}{\lambda + |d_i \hat{\phi}_{si}(k)|^2} [\alpha_{si} n_{si} \phi_{si}(k) - \alpha_{si} n_{si} - d_i \phi_{si}(k)], i = j \\ \frac{a_{ij} \rho d_i \hat{\phi}_{si}(k) \phi_{sj}(k)}{\lambda + |d_i \hat{\phi}_{si}(k)|^2}, i \neq j \end{cases}$$

根据假设 3 和引理 1,由于  $\phi_i(k)$  和  $\hat{\phi_i}(k)$  均有界,因此,可通过选择  $\lambda$  保证不等式(A8)和(A9)存在,即  $\exists \lambda_{\min} > 0$ ,使 得  $\lambda > \lambda_{\min} > b^2$ ,则有:

$$0 < \frac{d_{i}\hat{\phi}_{si}(k)\phi_{sj}(k)}{\lambda + |d_{i}\hat{\phi}_{si}(k)|^{2}} \le \frac{d_{i}\hat{\phi}_{si}(k)}{2\sqrt{\lambda}|d_{i}\hat{\phi}_{si}(k)|} b \le \frac{b}{2\sqrt{\lambda}} < \frac{b}{2\sqrt{\lambda_{\min}}} < \frac{1}{2} \text{ (A8)}$$

$$0 < \frac{d_i \hat{\phi}_{si}(k)}{\lambda + |d_i \hat{\phi}_{si}(k)|^2} \le \frac{d_i \hat{\phi}_{si}(k)}{2\sqrt{\lambda} |d_i \hat{\phi}_{si}(k)|} \le \frac{1}{2\sqrt{\lambda}} < \frac{1}{2\sqrt{\lambda_{\min}}} < \frac{1}{2b}$$
 (A9)

根据不等式(A8)和(A9)通过选择合适的 $\rho$ 、 $\alpha_{si}$ 、 $n_{si}$  使得 $m_{ii}(k)$ >0, $\rho$ 的选择方法如下:

$$\rho < \frac{2}{\max_{i \in \{1, 2, \dots N\}} \left(\frac{\alpha_{si} n_{si}}{b} - \alpha_{si} n_{si} + d_i\right)}$$
(A10)

$$\alpha_{si} n_{si} < d_i \tag{A11}$$

根据假设 4, 对于矩阵  $M_s(k)$ , 令其第 i 行和  $S_i(k)$ <1, 可以得到:

$$\alpha_{si} n_{si} > \frac{\sum_{j \in N_i} a_{ij} [\phi_{sj}(k) - \phi_{si}(k)]}{1 - \phi_{si}(k)} > \frac{d_i b}{1 - b} > 0$$
 (A12)

由于不等式(A12)恒成立,因此  $M_s(k)$ 的第 i 行和  $S_i(k)<1$ 。此时,  $M_s(k)$ 为不可约次随机矩阵,根据引理 2 和引理 3,式(A7)可以转化为

$$\|\vec{\boldsymbol{\varphi}}_{s}(k+1)\|_{2} \leq \|\boldsymbol{M}_{s}(k)\boldsymbol{M}_{s}(k-1)\cdots\boldsymbol{M}_{s}(1)\|_{2} \|\vec{\boldsymbol{\varphi}}_{s}(1)\|_{2} \leq \beta^{\lfloor k-1/P \rfloor} \|\vec{\boldsymbol{\varphi}}_{s}(1)\|_{2}$$

式中:将 $M_s(k)$ 进行分组相乘;P为分组的个数; $[\cdot]$ 表示取整符号; $0<\beta<1$ 。

综上所述, $\lim_{k\to\infty} \varphi_{si}(k) = 0$ ,因此定理 1 得证。

## 附录 B 相关参数

表 B1 VSC 和交直流微电网的结构参数 Table B1 Structural parameters of VSC and hybrid AC / DC microgrid

类型	参数	数值
	交流电压有效值/V	173
	频率/Hz	50
并网换流器(VSC)	直流电压/V	300
开州铁机奋(VSC)	滤波电感/mH	1.2
	滤波电容/μF	16
	开关频率/kHz	10
	$R_0/\Omega$ , $L_0/mH$	0.4, 0.33
交流子网	$R_1/\Omega$ , $L_1/mH$	1.1, 2.67
文机1四	$R_2/\Omega$ , $L_2/mH$	0.7, 1.45
	交流负荷	900+300j VA
	$R_{ m d0}/\Omega$	0.5
直流子网	$R_{ m d3}/\Omega$	1
	直流负荷/W	600

表 B2 VSC 的控制参数
Table B2 Control parameters of VSC

类型	参数	数值
VSC 1	有功功率参考值/W	600
	无功功率参考值/var	300
	有功下垂系数/Hz/kW	0.05
	无功下垂系数/(V/kvar)	20
	频率恢复系数 $\alpha_{\rm pl}/({ m kW/Hz})$	0.005
	电压恢复系数 $lpha_{ m ql}$ /(kvar/V)	0.005
	二次控制通信速率/Hz	100
	有功功率参考值/W	400
	无功功率参考值/var	0
	有功下垂系数/(Hz/kW)	0.05
VSC 2	无功下垂系数/(V/kvar)	20
	频率恢复系数 $\alpha_{p2}$ /(kW/Hz)	0.005
	电压恢复系数 $lpha_{q2}$ /(kvar/V)	0.005
	二次控制通信速率/Hz	100
VSC 3	有功功率参考值/W	500
	有功下垂系数/(V/kW)	30
	电压恢复系数 $\alpha_{p3}$ /(kW/V)	0.005
	二次控制通信速率/Hz	100

表 B3 MFAC 分布式控制器参数

Table B3 Parameters of MFAC distributed controller t

参数	数值	参数	数值
η	0.01	λ	0.02
ρ	0.01	$\mu$	0.02



杨畅

在线出版日期: 2022-10-12。 收稿日期: 2022-07-11。 作者简介:

杨畅(1996),男,博士研究生,主要从 事交直流微电网的分布式控制技术研究, yangchang1996@stu.xjtu.edu.cn;

\*通信作者:郑涛(1977),男,博士,副教授,主要从事电力线载波通信、微电网的保护与控制相关研究,tzheng@mail.xitu.edu.cn;

李鹏宇(1999), 男,硕士研究生,主要 从事新能源并网技术研究,lipengyu0628 @stu.xjtu.edu.cn;

卜鸣(2000),女,硕士研究生,主要从 事能量路由器协调控制技术研究,bm1234 @stu.xjtu.edu.cn。

(责任编辑 马晓华, 邱丽萍)

## Distributed Secondary Control of Hybrid AC/DC Microgrid Based on Improved Model-free Adaptive Control (MFAC)

YANG Chang, ZHENG Tao\*, LI Pengyu, BU Ming (School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University)

KEY WORDS: AC/DC microgrid; model-free adaptive control (MFAC); distributed secondary control; power distribution

AC/DC microgrid connects DGs with DC output and AC output through interlinking converter (IC), which reduces the number of power conversion equipment and improves the efficiency. Distributed secondary control (DSC) of hybrid AC/DC microgrid is to manage power sharing and voltage restoration throughout the microgrid by local neighbor communication.

This paper proposes a DSC of hybrid AC/DC microgrid based on improved MFAC (MFAC-DSC). The historical data of DG is used to estimate the dynamic linearization parameters of hybrid microgrid, and DSC can be realized by solving two optimization problems. Compared with the existing DSC, MFAC-DSC can reduce the influence of primary control's parameters on DSC and realize accurate power sharing among DGs without communicating with IC.

The block diagram of MFAC-DSC is shown in Fig. 1. MFAC-DSC is based on droop control and the power information of adjacent DGs is acquired through the communication network. Improved MFAC can be utilized to calculate the power reference of DG according to the local and neighbor power information. Herein, IC adopts constant DC voltage control and doesn't need to communicate with other DGs in MFAC-DSC. The same performance can be achieved comparing to the existing DSC, and IC can also act as a bridge to transfer active power between ac-MG and dc-MG with the collaboration of ac-DGs and dc-DGs.

For notional convenience, active DSC and reactive DSC in MFAC-DSC can be expressed in the same framework. The corresponding relationship of variables in MFAC-DSC is shown in Table 1.

MFAC-DSC can predict the dynamic linearization model of hybrid AC/DC microgrid by using historical data and the prediction can be transformed into an optimization problem, which is shown in (1).

$$\min J[\hat{\phi}_{si}(k)] = [\Delta y_{si}(k) - \hat{\phi}_{si}(k) \Delta u_{si}(k)]^{2} + \mu |\hat{\phi}_{si}(k) - \hat{\phi}_{si}(k-1)|^{2}$$
(1)

where  $\hat{\phi}_{si}(k)$  is the estimated value of pseudo partial

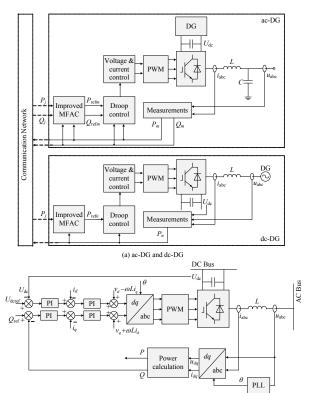


Fig. 1 Block diagram of MFAC-DSC

Table 1 Corresponding relationship of variables in MFAC-DSC

MFAC-DSC	Active DSC (ac-DG/dc-DG)	Reactive DSC	
$\phi_{si}$	Active PPD $\phi_{pi}$	Reactive PPD $\phi_{qi}$	
$u_{si}$	Power reference $P_{\text{refi}}/P_{\text{dcrefi}}$	Power reference $Q_{\text{refi}}$	
$y_{si}$	Active power $P_i/P_{dci}$	Reactive power $Q_i$	
$x_{si}$	Frequency $\omega_i/DC$ voltage $v_{dci}$	AC voltage $v_i$	
$x_{siref}$	Frequency reference $\omega_{\mathrm{ref}}$	AC voltage reference $V_{\rm ref}$	
	DC voltage reference $V_{\rm dcref}$		

derivative (PPD) and  $\mu > 0$  is the weight coefficient.

According to the estimated value of PPD in (1), system input  $u_{si}(k)$  can be calculated by solving another optimization problem, which is depicted by (2).

$$\min J[u_{si}(k)] = \xi_{si}^2(k+1) + \lambda [u_{si}(k) - u_{si}(k-1)]^2$$
 (2)

where  $\xi_{si}(k+1)$  can be expressed as follow

$$\xi_{si}(k+1) = \alpha_{si}[x_{siref} - x_{si}(k)] + \sum_{j \in N_i} a_{ij}[y_{sj}(k) - y_{si}(k+1)]$$

The power reference of DGs can be calculated based on the optimization problems (1)-(2) and MFAC-DSC can be realized.