

交直流微电网集群柔性控制及稳定性分析

李霞林, 李志旺, 郭力, 黄迪, 李鹏飞, 朱介北, 王成山

(智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 南开区 300072)

Flexible Control and Stability Analysis of AC/DC Microgrids Clusters

LI Xialin, LI Zhiwang, GUO Li, HUANG Di, LI Pengfei, ZHU Jiebei, WANG Chengshan

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Nankai District, Tianjin 300072, China)

ABSTRACT: This paper focused on the problem of local control stability control in a hierarchical multi-scale coordination control framework for flexible interlinking AC/DC MGs clusters. On one hand, the existing deterministic control strategy is difficult to effectively deal with smooth transition issue of the AC/DC MGs clusters operation control mode in emergencies, and on the other hand, the power coordination control must rely on communication. In order to solve the above problems, a new control strategy called AC/DC MGs clusters flexible control method was proposed to distinguish it from the existing deterministic control method. Applying the flexible control method, the local control of each device in the AC/DC MGs clusters no longer depends on a specific operation mode, and it is easy to realize smooth transition of the operation mode. More importantly, it only relies on the local measurement of electrical quantity information to achieve MGs clusters power coordination control. This paper discussed the effectiveness of the proposed flexible control method from two aspects: one is steady state and the other one is small signal modeling and stability analysis. Finally, a simulation example of multi-microgrid flexible interlinking clusters consisting of two DC microgrids, an AC microgrid, and isolated DC-DC and DC-AC interlinking devices were built in PSCAD/EMTDC, which verified the proposed method effectively.

KEY WORDS: AC/DC MGs clusters; flexible interlinking; flexible control; small signal model; stability analysis

摘要: 该文重点关注柔性互联交直流微电网集群分层多尺度协调控制框架中的就地控制(即稳定控制)问题。现有的确定性控制策略一方面难以有效应对紧急情况下交直流微电网集群运行控制模式的平滑切换, 另一方面为实现功率协调控制须依赖通信。为解决上述问题, 提出一种全新的控制策略以区别于现有的确定性控制方法, 称之为交直流微电网集群柔性控制方法。应用该柔性控制方法, 交直流微电网集群中各装置就地控制不再依赖于某个特定的运行模式, 易于实现

运行模式平滑切换。更重要的是, 仅依靠就地量测的电气量信息, 即可实现多微电网集群功率协调控制。从稳态和小信号建模及稳定性分析两方面, 论述了所提柔性控制方法的有效性。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了包含 2 个直流微电网、1 个交流微电网, 以及隔离 DC-DC 和 DC-AC 互联装置的多微电网柔性互联集群仿真算例, 对所提方法进行了有效验证。

关键词: 交直流微电网集群; 柔性互联; 柔性控制; 小信号建模; 稳定性分析

0 引言

集成分布式可再生能源、储能单元、先进电力电子技术和智能控制保护系统等的微电网技术已成为解决偏远、海岛地区供电, 提高需求侧用户供电可靠性, 应对高比例可再生能源接入的输出功率随机性和波动性等挑战^[1]的有效方式。若多个地理位置上毗邻的微电网以集群的形式互联运行^[2-3], 通过多微电网之间的功率协调控制和紧急功率支撑, 则更能有效应对系统内可再生能源和负荷的不确定性、单一微电网平衡单元备用容量不足等各种复杂工况, 能更大限度地提高微电网集群内分布式可再生能源发电系统和分布式储能单元能效, 增强系统整体供电可靠性、灵活性与运行稳定性^[4]。为有效应对包含不同供电类型(如交、直流微电网)、不同电压等级的微电网集群大规模接入的互联, 国内外学者提出交直流混联^[5-6]、基于柔性直流互联^[7-11]的多微电网集群互联结构。不失一般性, 本文考虑如图 1(a)所示基于电力电子装置柔性互联的交直流微电网集群结构示意图^[5], 交流微电网与直流微电网之间通过双向 DC-AC 互联, 不同电压等级的直流微电网间则可通过隔离双向 DC-DC 装置互联^[12]以实现电气隔离、功率灵活控制等目标。图中考虑

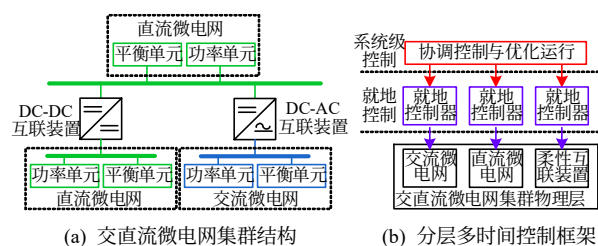


图 1 交直流微电网集群柔性互联示意结构

Fig. 1 Flexible interlinking of AC/DC MGs cluster

每个微电网内均含有平衡单元和功率单元 2 类基本单元^[13-14]，其中平衡单元主要是指建立和稳定微电网内电压和频率(交流微电网)，维持系统功率平衡的基本单元，如储能系统或可控型分布式电源；采用最大功率跟踪控制的可再生能源发电系统、基于功率调度模式的分布式电源，以及负荷等，均可看成是功率单元。针对如图 1(a)所示柔性互联交直流微电网集群，系统整体运行控制通常采用如图 1(b)所示分层多时间协调控制框架。有文献提出就地控制层、协调控制层以及能量优化 3 层控制体系^[15-17]，就地控制器属于装置级控制层(微电网集群内的平衡单元、功率单元及互联装置等就地控制器)，各装置通过实时就地量测的电气量信息进行快速且实时地稳定控制，而后两层控制均会涉及到多装置间或多子系统间的运行、控制状态等数据交互和通信，此处统一归纳为系统级控制。本文所关注的便是此类柔性互联交直流微电网集群分层多尺度协调控制框架中的就地控制稳定控制问题。

针对如图 1 所示柔性互联交直流微电网集群的就地控制(主要包含各微电网内平衡单元、功率单元的就地控制系统，以及 DC-DC 和 DC-AC 柔性互联装置的就地控制系统)，现有文献绝大多数采取的是一类随系统运行模式而定的确定性控制策略^[18-22]，即根据确定性的微电网集群系统运行模式，选择确定性的各子系统(包括微电网和柔性互联装置)的控制方式。举例来说，当各微电网工作在自治控制模式，其通过各自平衡单元建立电压(或频率)，互联装置运行接受上层功率指令，运行在功率调度控制模式^[21-22]。如遇紧急情况(如某个微电网平衡单元故障，需要其余正常微电网对其进行紧急支撑时)，导致交直流微电网集群实际运行方式发生改变时，在无快速通信及协调控制情况下，现有的确定性控制方式显然难以实现运行控制模式的平滑切换以保证系统暂态稳定^[21-22]。是否能有更合适的控制方法，能从根本上解决确定性控制策略无法有效适用

此类复杂微电网集群多运行模式平滑切换的问题，是本文的主要研究动机之一。

多微电网以集群的形式互联运行，便是希望能够充分发挥系统内多分散式平衡单元的相互支撑作用，使之能够稀释大规模分布式电源或负荷(即功率单元)对单一微电网的功率扰动或冲击^[13-14,23]。在现有上文所述的确定性就地控制模式下，通常需要通过多微电网控制系统之间的快速通信和协调控制才能实现该目标^[21-24]。是否能有更合适的控制策略，仅依靠无需通信的就地控制系统，即可实现多微电网集群功率协调控制目标，便是本文另一个主要研究动机，即如何能使得此类柔性互联微电网集群能真正从物理层面和控制层面融合成为一个统一的整体。

基于上述 2 个主要研究动机，笔者所在研究团队针对交直流混合微电网的多并联 DC-AC 变流器，提出一种统一控制策略，能够适用多运行模式及平滑切换^[13]，然后将这个方法扩展到了多直流微电网柔性互联和协调控制^[14]。但这些前期工作仅针对简单交直流微电网或纯直流微电网互联系统，在此基础上，本文深入探讨了这一控制理念在包含多个交流、直流微电网柔性互联的微电网集群中的应用，并将之凝炼为柔性控制方法。该方法应用于图 1(b)所示交直流微电网集群的就地控制层，仅依靠就地量测的电气量信息，解决了上文所述的多微电网集群运行模式平滑切换及功率协调控制问题。此外，针对所提出的交直流微电网集群柔性控制方法，建立详细的小信号稳定性分析模型；为验证小信号模型的准确性，对比其时域仿真结果与详细电磁暂态仿真模型结果；在此基础上，分析系统中关键控制参数对系统稳定性的影响。最后，在 PSCAD/EMTDC 中搭建包含 2 个直流微电网、1 个交流微电网，以及隔离 DC-DC 和 DC-AC 互联装置的多微电网柔性互联集群仿真算例，对本文所提方法进行了有效验证。

1 交直流微电网集群柔性互联

本文考虑的交直流微电网群柔性互联结构如图 2 所示(箭头方向为功率正方向)，包含 2 个直流微电网(即 DCMG 1, DCMG 2 和 ACMG)，通过双向 DC-AC 和隔离双向 DC-DC 变流器进行柔性互联。需要指出的是，图 2 所示结构可扩展为更多交直流微电网柔性互联的应用场景。为便于分析，每

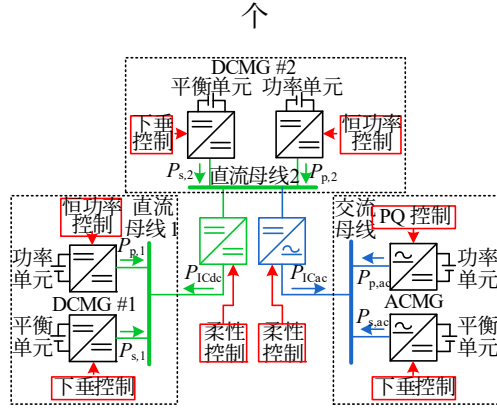


图2 本文所考虑的交直流集群系统

Fig. 2 Considered AC/DC MGs clusters

微电网内仅含有一个平衡单元和功率单元，且均通过相应电力电子装置接入微电网母线，其中平衡单元采用下垂控制建立微电网内电压(或频率)，功率单元则采用功率控制模式，通过在线调整功率参考指令以模拟相应分布式电源出力变化或负荷扰动。交流微电网和直流微电网，以及直流微电网之间则分别通过双向DC-AC和DC-DC变流器进行柔性互联，采用本文所提出的柔性控制方法。

在本文中，交微电网内DC-AC以及交直流DC-AC互联装置均采用常规两电平电压源型变流器拓扑；直流微电网内DC-DC变流器采用常规双向buck/boost拓扑结构；作为直流微电网之间的柔性互联装置，为实现电气隔离功能，本文采用高频隔离DAB结构^[12-13]，如图3所示，变压器T可为两侧提供电气隔离与电压等级的变换， n 为变压器变比， U_1 、 U_2 分别代表直流子网1与直流子网2的母线电压， i_L 为电感电流。

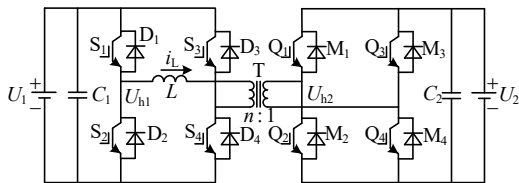


图3 DAB结构DC-DC变流器

Fig. 3 Main circuit of isolated bi-directional DC-DC converter

考虑该隔离DC-DC采用传统单移相控制^[13]，通过控制移相比来控制功率传输，其表达式如式(1)所示。

$$P = nU_1U_2d \cdot \frac{1-|d|}{2f_sL} \quad (1)$$

式中： d 为半个控制周期内的移相比， $-1 < d < 1$ ； f_s

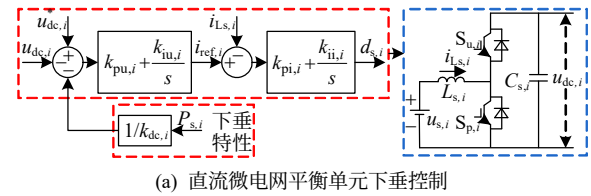
为开关频率。

2 交直流微电网集群柔性控制策略

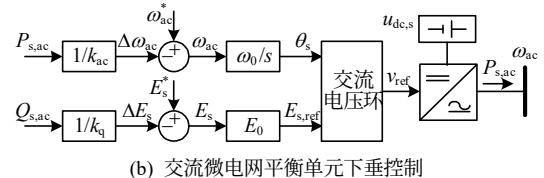
本文所研究的交直流微电网集群柔性控制策略由各微电网的下垂控制和交直流微电网接口变流器柔性控制构成，可在无通信情况下实现微电网集群系统的多微电网间功率协调控制及运行模式平滑切换2个主要功能。该控制策略的主要思路 and 具体分析叙述如下。

2.1 交/直流微电网下垂控制

交直流微电网内平衡单元采用下垂控制，其中图4所示为一类最常用的下垂控制具体实现。



(a) 直流微电网平衡单元下垂控制



(b) 交流微电网平衡单元下垂控制

图4 微电网平衡单元下垂控制

Fig. 4 Droop control for slack terminals in MGs

采用图4所示下垂控制后，稳态时交直流微电网内平衡单元出力与其相应的频率和直流电压满足如下下垂特性(尽管本文中每个微电网内仅考虑只有一个平衡单元，若含多个下垂控制平衡单元，其综合下垂特性亦可写成式(2)所示形式)：

$$\begin{cases} u_{dc,i} = u_{dc,i}^* - \frac{P_{s,i}}{k_{dc,i}} \\ \omega_{ac} = \omega_{ac}^* - \frac{P_{s,ac}}{k_{ac}} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $u_{dc,i}^*$ 、 $u_{dc,i}$ ($i=1,2$)分别表示直流子网 i 的直流电压参考值和实际直流母线电压； $P_{s,i}$ 表示直流子网 i 内平衡单元实际输出功率； $k_{dc,i}$ 为下垂系数； ω_{ac}^* 、 ω_{ac} 分别表示交流微电网的频率参考值和实际频率值； $P_{s,ac}$ 表示交流微电网内平衡单元实际输出有功功率； k_{ac} 表示交流微电网平衡单元的下垂系数。上述中所提及的直流电压、频率和功率均为标么值，并考虑其基准值分别为 $U_{dcB,i}$ 、 ω_B 和 S_B 。

通过设置合理的下垂系数，可以实现每个微电网内多平衡单元的并联运行与自主功率分配，一种

常用控制目标便是使得平衡单元根据其额定容量进行功率分配。此外，文献[21,25]提出基于运行成本等微增率的改进下垂控制，即式(2)中将平衡单元实际输出功率替换为运行成本一阶导数，进而实现经济运行。在实际复杂运行工况下，运行成本最小仅仅是优化调度的一种控制目标，且优化运行通常是在更长的时间尺度层完成，如图 1(b)所示系统级控制层。在就地控制层，主要关心暂态功率平衡，因此式(2)所示下垂控制更为合理。

2.2 微电网间 DC-DC 和 DC-AC 互联装置柔性控制

假定直流微电网 1、直流微电网 2 和交流微电网中平衡单元额定容量分别为 $P_{\text{dcs},1}$ 、 $P_{\text{dcs},2}$ 和 P_{acs} ，且其容量比满足 $P_{\text{dcs},1}:P_{\text{dcs},2}:P_{\text{acs}}=\alpha:1:\beta$ 。当各微电网中的平衡单元均处于正常工作状态时，期望通过 DC-DC 和 DC-AC 互联装置控制实现 3 个微电网内平衡单元的实际输出功率 $P_{s,1}$ 、 $P_{s,2}$ 和 $P_{s,ac}$ 能够按照其容量比(即 $\alpha:1:\beta$)来运行，以充分提高微电网群内平衡单元利用效率，能有效减小各自微电网中备用容量，能有效应对微电网内大功率扰动。在无互联通信情况下，如何实现上述微电网集群系统的多微电网间功率协调控制目标及运行模式平滑切换，DC-DC 和 DC-AC 互联装置就地控制系统设计是关键。为此，本文提出如图 5、6 所示 DC-DC 和 DC-AC 互联装置柔性控制方法。

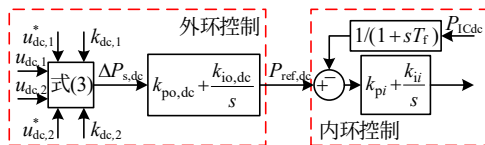


图 5 DC-DC 互联装置柔性控制策略

Fig. 5 Flexible control for DC-DC interlinking converter

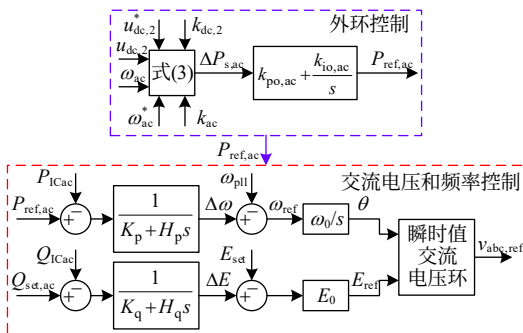


图 6 DC-AC 互联装置柔性控制策略

Fig. 6 Flexible control for DC-AC interlinking converter

2.2.1 多微电网平衡单元功率协调控制实现

基于式(2)所示下垂运行特性，DC-DC 和 DC-AC

柔性互联装置通过就地量测的电压或频率信息，即可计算得到此时微电网内平衡单元出力情况。另一方面，为实现本文考虑的多微电网间平衡单元功率协调控制目标，图 5、6 所示互联装置柔性控制策略中外环控制中，互联功率增量 $\Delta P_{s,dc}$ 、 $\Delta P_{s,ac}$ 可表示为

$$\begin{cases} \Delta P_{s,dc} = k_{dc,1}(u_{dc,1}^* - u_{dc,1}) - \alpha[k_{dc,2}(u_{dc,2}^* - u_{dc,2})] \\ \Delta P_{s,ac} = k_{ac}(\omega_{ac}^* - \omega_{ac}) - \beta[k_{dc,2}(u_{dc,2}^* - u_{dc,2})] \end{cases} \quad (3)$$

在获得式(3)所示互联功率增量后，DC-DC 和 DC-AC 外环控制通过 PI 控制器对该增量进行处理，进而得到实际的传输功率参考值 $P_{ref,dc}$ 和 $P_{ref,ac}$ 。由 PI 控制特性可知，稳态情况下，式(3)中互联功率增量 $\Delta P_{s,dc}$ 和 $\Delta P_{s,ac}$ 均应为零，从而达到了本文所期望的多微电网间平衡单元功率协调控制目的。

在实现上述功率协调控制中，图 4 所示微电网下垂控制是基础，基于式(3)的互联装置外环功率控制是关键。需要指出的是，若式(2)采用文献[21,25]中基于运行成本等微增率的改进下垂控制，此时柔性互联装置在量测就地电压或频率信息后，通过式(2)计算得到的是平衡单元运行成本的实际微增率。然后 DC-DC 和 DC-AC 互联装置在外环控制中，通过对两侧微电网内平衡单元运行成本的实际微增率之差进行比例积分控制，便可实现多微电网集群的经济运行。这表明本文所提柔性控制策略具有一定的通用性和可扩展性。

2.2.2 微电网集群运行模式平滑切换实现

基于式(3)以及图 5、6 所示 DC-DC 和 DC-AC 互联装置柔性控制策略中的外环控制后，得到互联装置实际输出功率参考值，该参考值表达式如式(4)所示。

$$\begin{cases} P_{ref,dc} = \Delta P_{s,dc} (k_{po,dc} + \frac{k_{io,dc}}{s}) \\ P_{ref,ac} = \Delta P_{s,ac} (k_{po,ac} + \frac{k_{io,ac}}{s}) \end{cases} \quad (4)$$

式中： $k_{po,dc}$ 、 $k_{io,dc}$ 为互联 DC-DC 外环 PI 控制器的比例系数与积分系数； $k_{po,ac}$ 、 $k_{io,ac}$ 分别代表互联 DC-AC 外环 PI 控制的比例系数与积分系数。

内环控制的首要目标便是能够准确跟踪该功率参考值，以实现多微电网平衡单元的功率协调控制目标。此外，还期望通过该柔性控制策略，实现微电网多运行模式平滑切换。为此，本文所提互联装置柔性控制采用如图 5、6 所示的内环控制策略。具体分析如下：

对于 DC-DC 互联装置来说, 其内环控制为直接功率控制。由式(1)可知通过调整移相比便可控制高频隔离双向 DC-DC 传输功率, 因此 DC-DC 互联装置内环直接功率控制采用移相控制, 如图 5 所示, 其中 P_{ICdc} 为互联 DC-DC 输出实际功率, T_f 为低通滤波系数, d_{12} 为移相比, k_{pi} 、 k_{ii} 分别代表内环 PI 控制器的比例系数与积分系数。

对于 DC-AC 互联装置来说, 其内环控制采用交流电压和频率控制, 采用具有模拟惯性环节的下垂控制, 如图 6 所示。通过获得实际输出有功功率 P_{ICac} 与功率参考值 $P_{\text{ref,ac}}$ 的差值具有模拟惯性环节的下垂控制得到其频率变化量 $\Delta\omega$, 并在此基础上与通过锁相获得的交流微电网频率 ω_{pll} (该频率稳态下和交流微电网频率 ω_{ac} 一致) 求和得到内环控制的参考频率, 并经积分获得三相电压瞬时值闭环控制系统的相位信号 θ 。由无功功率控制环路得到三相电压瞬时值闭环系统的幅值信号 E_{ref} 。其中 K_p 与 H_p 分别代表有功环路下垂系数与惯性系数, $Q_{\text{set,ac}}$ 为互联装置无功设置值, Q_{ICac} 为互联装置的无功功率, K_q 与 H_q 为其无功环路的下垂系数与惯性系数, E_{set} 为电压设定值。

为解释本文所提图 5、6 所示 DC-DC 和 DC-AC 柔性控制策略可解决微电网集群多平衡单元功率协调控制和多运行模式平滑切换问题, 接下来从稳态层面分析其可行性, 而动态稳定性则可通过小扰动稳定性模型进行分析和判断, 下节将会对交直流微电网集群柔性控制进行详细的小信号建模。

1) 正常运行模式。

当微电网集群内各平衡单元均正常时, 均满足式(2)所示下垂运行特性, DC-DC 互联装置与 DC-AC 互联装置采用图 5、6 所示柔性控制策略运行。由于其外环控制均采用 PI 控制, 考虑到 PI 控制的无差控制特性, 稳态时满足式(3)所示互联功率增量为零, 进而保证:

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{s,dc}} = P_{\text{s,1}} - \alpha P_{\text{s,2}} = 0 \\ \Delta P_{\text{s,ac}} = P_{\text{s,ac}} - \beta P_{\text{s,2}} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

由系统功率平衡关系, 还可得到:

$$\begin{cases} P_{\text{s,1}} + P_{\text{p,1}} + P_{\text{ICdc}} = 0 \\ P_{\text{s,2}} + P_{\text{p,2}} - P_{\text{ICdc}} - P_{\text{ICac}} = 0 \\ P_{\text{s,ac}} + P_{\text{p,ac}} + P_{\text{ICac}} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

结合式(5)、(6), 可以推导出微电网集群正常运

行稳态下各平衡单元及互联装置传输功率分别如下:

$$\begin{cases} P_{\text{s,1}} = -\frac{\alpha(P_{\text{p,1}} + P_{\text{p,2}} + P_{\text{p,ac}})}{\alpha + \beta + 1} \\ P_{\text{s,2}} = -\frac{P_{\text{p,1}} + P_{\text{p,2}} + P_{\text{p,ac}}}{\alpha + \beta + 1} \\ P_{\text{s,ac}} = -\frac{\beta(P_{\text{p,1}} + P_{\text{p,2}} + P_{\text{p,ac}})}{\alpha + \beta + 1} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_{\text{ICdc}} = \frac{\alpha(P_{\text{p,2}} + P_{\text{p,ac}}) - (\beta + 1)P_{\text{p,1}}}{\alpha + \beta + 1} \\ P_{\text{ICac}} = \frac{\beta(P_{\text{p,1}} + P_{\text{p,2}}) - (\alpha + 1)P_{\text{p,ac}}}{\alpha + \beta + 1} \end{cases} \quad (8)$$

由上述分析可知, 基于所提柔性控制策略, 多微电网平衡单元可实现预期所设定的功率协调控制目标。

2) 直流微电网支撑模式。

若直流微电网内平衡单元因故进入限流状态或退出运行时, 与之相连的柔性互联装置采用本文所提柔性控制策略是否可以实现运行模式的平滑切换以支撑该故障直流微电网, 接下来将以直流微电网 2 平衡单元退出运行为例来回答该问题。

假定在正常运行模式下, 考虑突然退出直流微电网 2 平衡单元。此时 DC-DC 与 DC-AC 互联装置仍采用图 5、6 所示柔性控制策略(不需要任何通信, 不需要进行任何运行模式检测和判断, 控制系统不作任何切换和处理), 由于外环 PI 控制作用, 仍会使互联功率增量 $\Delta P_{\text{s,dc}}$ 和 $\Delta P_{\text{s,ac}}$ 趋于零; 且此时直流微电网 1 和交流微电网内平衡单元正常工作, 故稳态下满足如下关系:

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{s,dc}} = P_{\text{s,1}} - \alpha[k_{\text{dc,2}}(u_{\text{dc,2}}^* - u_{\text{dc,2}})] \\ \Delta P_{\text{s,ac}} = P_{\text{s,ac}} - \beta[k_{\text{dc,2}}(u_{\text{dc,2}}^* - u_{\text{dc,2}})] \end{cases} \quad (9)$$

另一方面, 由微电网集群稳态功率平衡关系可得:

$$\begin{cases} P_{\text{p,1}} + P_{\text{s,1}} + P_{\text{ICdc}} = 0 \\ P_{\text{p,2}} - P_{\text{ICdc}} - P_{\text{ICac}} = 0 \\ P_{\text{p,ac}} + P_{\text{s,ac}} + P_{\text{ICac}} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

联立式(9)、(10)可得系统内正常平衡单元及柔性装置传输功率分别如下:

$$\begin{cases} P_{\text{s,1}} = -\frac{\alpha(P_{\text{p,1}} + P_{\text{p,2}} + P_{\text{p,ac}})}{\alpha + \beta} \\ P_{\text{s,ac}} = -\frac{\beta(P_{\text{p,1}} + P_{\text{p,2}} + P_{\text{p,ac}})}{\alpha + \beta} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_{\text{ICdc}} = \frac{\alpha(P_{\text{p},2} + P_{\text{p,ac}}) - \beta P_{\text{p},1}}{\alpha + \beta} \\ P_{\text{ICac}} = \frac{\beta(P_{\text{p},1} + P_{\text{p},2}) - \alpha P_{\text{p,ac}}}{\alpha + \beta} \end{cases} \quad (12)$$

基于上述功率关系, 再结合式(2)所示下垂控制特性, 便可以推导出各微电网内稳态电压和频率:

$$\begin{cases} u_{\text{dc},1} = u_{\text{dc},1}^* + \frac{\alpha(P_{\text{p},1} + P_{\text{p},2} + P_{\text{p,ac}})}{\alpha + \beta} \frac{1}{k_{\text{dc},1}} \\ u_{\text{dc},2} = u_{\text{dc},2}^* + \frac{P_{\text{p},1} + P_{\text{p},2} + P_{\text{p,ac}}}{\alpha + \beta} \frac{1}{k_{\text{dc},2}} \\ \omega_{\text{ac}} = \omega_{\text{ac}}^* + \frac{\beta(P_{\text{p},1} + P_{\text{p},2} + P_{\text{p,ac}})}{\alpha + \beta} \frac{1}{k_{\text{ac}}} \end{cases} \quad (13)$$

综上分析, 当直流微电网 2 平衡单元退出后, 采用本文所提柔性控制策略后, 系统能重新运行至新的平衡点; 且从式(11)还能看出, 此时系统内正常的平衡单元仍能实现功率协调控制目标。

3) 交流微电网支撑模式。

当交流微电网内平衡单元故障时, 交流系统失去频率支撑。此时 DC-AC 互联装置仍采用图 6 所示柔性控制策略, 由于外环 PI 控制作用, 会使互联功率增量 $\Delta P_{\text{s,ac}}$ 趋于零; 两直流微电网及 DC-DC 互联装置不受影响; 故该模式下满足如下稳态关系:

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{s,dc}} = P_{\text{s},1} - \alpha P_{\text{s},2} = 0 \\ \Delta P_{\text{s,ac}} = k_{\text{ac}}(\omega_{\text{ac}}^* - \omega_{\text{ac}}) - \beta P_{\text{s},2} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

此时系统功率平衡关系满足:

$$\begin{cases} P_{\text{p},1} + P_{\text{s},1} + P_{\text{ICdc}} = 0 \\ P_{\text{p},2} + P_{\text{s},2} - P_{\text{ICdc}} - P_{\text{ICac}} = 0 \\ P_{\text{p,ac}} + P_{\text{ICac}} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

结合上述两式可得系统内正常平衡单元及柔性装置传输功率分别如下:

$$\begin{cases} P_{\text{s},1} = -\frac{\alpha(P_{\text{p},1} + P_{\text{p},2} + P_{\text{p,ac}})}{1 + \alpha} \\ P_{\text{s},2} = -\frac{P_{\text{p},1} + P_{\text{p},2} + P_{\text{p,ac}}}{1 + \alpha} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} P_{\text{ICdc}} = \frac{\alpha(P_{\text{p},2} + P_{\text{p,ac}}) - P_{\text{p},1}}{1 + \alpha} \\ P_{\text{ICac}} = -P_{\text{p,ac}} \end{cases} \quad (17)$$

基于上述式(16)、(17)稳态功率关系, 由式(2)可得:

$$\begin{cases} u_{\text{dc},1} = u_{\text{dc},1}^* + \frac{\alpha(P_{\text{p},1} + P_{\text{p},2} + P_{\text{p,ac}})}{1 + \alpha} \frac{1}{k_{\text{dc},1}} \\ u_{\text{dc},2} = u_{\text{dc},2}^* + \frac{P_{\text{p},1} + P_{\text{p},2} + P_{\text{p,ac}}}{1 + \alpha} \frac{1}{k_{\text{dc},2}} \\ \omega_{\text{ac}} = \omega_{\text{ac}}^* + \frac{\beta(P_{\text{p},1} + P_{\text{p},2} + P_{\text{p,ac}})}{1 + \alpha} \frac{1}{k_{\text{ac}}} \end{cases} \quad (18)$$

由此可以看出当交流微电网平衡单元退出后, 采用本文所提柔性控制策略后, 系统亦可重新运行至新的平衡点; 且从式(16)也能看出此时系统内正常的平衡单元能实现本文所设定的功率协调控制目标。

上文主要从稳态层面分析了本文所提出的控制方法在解决交直流微电网集群多运行模式下功率协调及平滑切换问题上的有效性。大功率波动、运行模式切换等暂态工况不仅容易对系统内直流电压、交流频率等造成冲击, 且当控制参数选择不当时, 还可能导致系统出现功率振荡等稳定性问题。为此, 本文接下来将首先建立交直流微电网集群多运行模式下的小信号稳定性分析模型进行稳定性分析, 为后续深入研究系统功率振荡稳定机理分析及控制器参数优化设计提供基础; 然后建立详细的电磁暂态时域仿真模型, 验证本文所提出的控制方法在暂态工况下的控制性能。

3 交直流微电网集群柔性控制小信号建模

基于第 2 部分的控制系统描述, 本节将建立上文所分析的 3 种典型运行模式下的交直流微电网集群柔性控制小信号稳定性分析模型。一方面基于该小信号模型, 可以从动态稳定控制层面分析本文所提柔性控制方法可实现多运行模式平滑切换的可行性; 另外可利用该模型, 进行详细的控制器参数优化和系统稳定性分析。

3.1 正常运行模式下的系统小信号稳定性模型

本文将基于模块化建模思路, 建立交直流微电网集群柔性控制小信号稳定性分析模型。本文将系统整体小信号模型分为 3 大块, 即交流微电网小信号模型、直流微电网小信号模型, 以及柔性互联装置小信号模型。需要指出的是, 在建模过程中本文忽略了柔性互联装置 DC-AC 与交流微网平衡单元的电压内环控制, 这样处理的前提是如果内环控制相对外环的时间尺度足够小, 内环控制对外环生成的电压能够实时快速跟踪, 那么在外环时间尺度下的建模即可忽略内环, 从而简化了该单元的数学模

型,更便于分析。

3.1.1 交流微电网小信号模型

正常运行模式下交流微电网的小信号模型可用图7来表示。

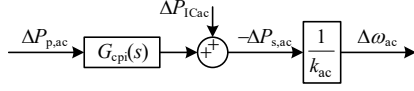


图7 交流微电网小信号模型：正常运行模式

Fig. 7 Small signal model of ACMG: normal operation mode

由图7可以得出在有小扰动时,交流微电网频率增量表达式为

$$\Delta\omega_{ac} = \frac{G_{cpi}(s)}{k_{ac}} \Delta P_{p,ac} + \frac{1}{k_{ac}} \Delta P_{1Cac} \quad (19)$$

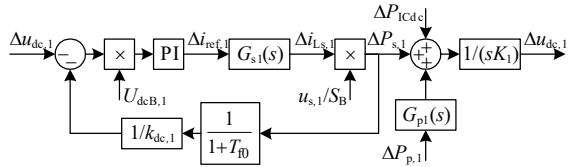
式中 $G_{cpi}(s)$ 为交流微电网内功率单元的有功电流闭环传函,表达式为

$$G_{cpi}(s) = \frac{k_{pid}s + k_{iid}}{Ls^2 + (R + k_{pid})s + k_{iid}} \quad (20)$$

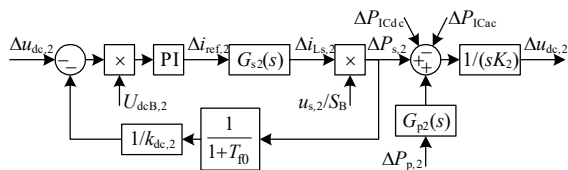
式中: k_{pid} 、 k_{iid} 分别为PI控制的比例增益与积分增益; L 、 R 为变流器滤波电感与等效电阻。

3.1.2 直流微电网小信号模型

正常运行模式下直流微电网小信号模型可描述如图8所示。



(a) DCMG 1小信号模型



(b) DCMG 2小信号模型

图8 直流微电网小信号模型：正常运行模式

Fig. 8 Small signal model of DCMG: normal operation mode

由图8可得直流微电网1和2内直流电压和平衡单元动态特性:

$$\begin{cases} sK_1\Delta u_{dc,1} = \Delta P_{s,1} + \Delta P_{p,1}G_{p1}(s) + \Delta P_{1Cdc} \\ \Delta P_{s,1} = -G_1(s)\Delta u_{dc,1} \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} sK_2\Delta u_{dc,2} = \Delta P_{s,2} + \Delta P_{p,2}G_{p2}(s) - \Delta P_{1Cdc} - \Delta P_{1Cac} \\ \Delta P_{s,2} = -G_2(s)\Delta u_{dc,2} \end{cases} \quad (22)$$

其中 $G_{si}(s)$ 、 $G_{pi}(s)$ 和 $G_i(s)$ ($i=1,2$) 的表达式为

$$\begin{cases} G_{si}(s) = \frac{U_{dcB,i}(k_{pi,i}s + k_{ii,i})}{L_{s,i}s^2 + k_{pi,i}U_{dcB,i}s + k_{ii,i}U_{dcB,i}} \\ G_{pi}(s) = \frac{U_{dcB,i}(k_{pp,i}s + k_{ip,i})}{L_{p,i}s^2 + k_{pp,i}U_{dcB,i}s + k_{ip,i}U_{dcB,i}} \\ G_i(s) = \frac{U_{dcB,i}(k_{pu,i} + \frac{k_{iu,i}}{s})G_{si}(s)\frac{u_{s,i}}{S_B}}{1 + \frac{U_{dcB,i}(k_{pu,i} + \frac{k_{iu,i}}{s})G_{si}(s)\frac{u_{s,i}}{S_B}}{k_{dc,i}(1 + sT_{f0})}} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $k_{pp,i}$ 、 $k_{ip,i}$ 分别代表 DCMG i 功率单元电流环的比例增益与积分增益; $k_{pi,i}$ 、 $k_{ii,i}$ 分别代表 DCMG i 平衡单元电流环的比例增益与积分增益; $k_{pu,i}$ 、 $k_{iu,i}$ 分别代表 DCMG i 平衡单元电压环比例增益与积分增益; $L_{s,i}$ 、 $L_{p,i}$ 代表 DCMG i 内平衡单元与功率单元的电感; K_i 为电压积分系数,表达式为 $K_i = (C_i U_{dcB,i}^2)/S_B$, C_i 为 DCMG i 侧母线对地电容; T_{f0} 为低通滤波系数。

3.1.3 DC-DC 与 DC-AC 互联装置小信号模型

1) DC-DC 互联装置小信号模型。

DC-DC 互联装置小信号模型可用图9描述。

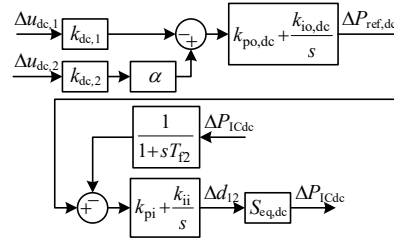


图9 DC-DC 互联装置小信号模型：正常运行模式

Fig. 9 Small signal model of DC-DC: normal operation mode

由图9可得外环控制系统小信号模型可表述为

$$\Delta P_{ref,dc} = (\alpha k_{dc,2}\Delta u_{dc,2} - k_{dc,1}\Delta u_{dc,1})(k_{po,dc} + \frac{k_{io,dc}}{s}) \quad (24)$$

内环控制系统小信号模型可表述为

$$\Delta P_{1Cdc} = \frac{S_{eq,dc}(sk_{pi} + k_{ii})(1 + sT_{f2})}{s^2T_{f2} + (S_{eq,dc}k_{pi} + 1)s + S_{eq,dc}k_{pi}} \Delta P_{ref,dc} \quad (25)$$

式中 $S_{eq,dc} = nU_{10}U_{20}(1 - 2D)/2f_sLS_B$, 其中 D 为稳态时的占空比信号, U_{10} 与 U_{20} 代表两侧电压的稳态值, 简化分析时可代入两侧直流母线的基准电压。

结合式(24)、(25)可得, DC-DC 传输功率动态特性为

$$\Delta P_{1Cdc} = -G_{udc1}(s)\Delta u_{dc,1} + G_{udc2}(s)\Delta u_{dc,2} \quad (26)$$

对式(34)进行简单变换,可得出 $\mathbf{X}$ 和 $\Delta \mathbf{P}_{IC}$ 关于 $\Delta \mathbf{P}_p$ 的动态响应方程,即交直流微电网集群在正常运行模式下的完整小信号稳定性分析模型:

$$\begin{cases} \mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{BC})^{-1} \mathbf{A} \Delta \mathbf{P}_p \\ \Delta \mathbf{P}_{IC} = (\mathbf{I} - \mathbf{CB})^{-1} \mathbf{C} \mathbf{A} \Delta \mathbf{P}_p \end{cases} \quad (36)$$

3.2 直流微电网支撑模式下的系统小信号稳定性模型

当直流微电网 2 退出运行时,直流微电网 2 小信号模型应调整为图 12,微电网集群其余模型不变。

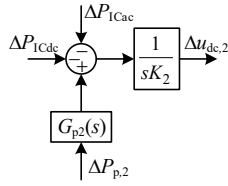


图 12 直流微电网 2 模型：直流微电网支撑模式

Fig. 12 DCMG2 model: DCMG support mode

该模式下,直流微电网 2 小信号模型的表达式为

$$sK_2 \Delta u_{dc,2} = G_{p2}(s) \Delta P_{p,2} - \Delta P_{ICac} - \Delta P_{ICdc} \quad (37)$$

由式(37)和图 12 可知,平衡单元退出后 $G_2(s)$ 为零,所以该模式下完整的小信号模型可将矩阵 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 调整为 $\mathbf{A}_{dc}$ 、 $\mathbf{B}_{dc}$,其余不变。

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{dc} = \text{diag}\left\{\frac{G_{p1}(s)}{sK_1 + G_1(s)}, \frac{G_{p2}(s)}{sK_2}, \frac{G_{cpi}(s)}{k_{ac}}\right\} \\ \mathbf{B}_{dc} = \begin{bmatrix} \frac{1}{sK_1 + G_1(s)} & 0 \\ -\frac{1}{sK_2} & -\frac{1}{sK_2} \\ 0 & \frac{1}{k_{ac}} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (38)$$

该模式下矩阵方程与式(34)、(36)形式一致,经过简单变换,可得直流微电网支撑模式下的完整小信号稳定性分析模型:

$$\begin{cases} \mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{B}_{dc} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{A}_{dc} \Delta \mathbf{P}_p \\ \Delta \mathbf{P}_{IC} = (\mathbf{I} - \mathbf{CB}_{dc})^{-1} \mathbf{C} \mathbf{A}_{dc} \Delta \mathbf{P}_p \end{cases} \quad (39)$$

3.3 交流微电网支撑模式下的系统小信号稳定性模型

3.3.1 交流微电网支撑模式下的模型变化

当系统处于交流微电网支撑模式时,此时系统中的 DC-AC 互联装置起频率支撑作用,并通过功

率传输,满足交流子网内的功率平衡关系。该模式下,DC-AC 互联装置内环的小信号模型与锁相环模型如图 13 所示,微电网集群其余部分模型不变。

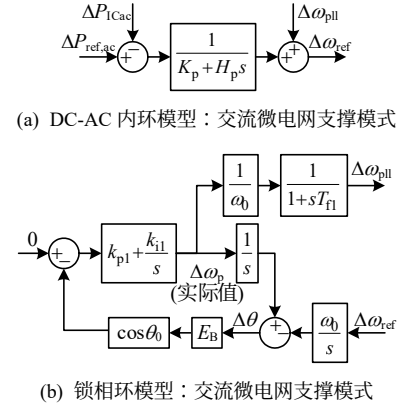


图 13 交流微电网模式下的 DC-AC 与锁相环模型

Fig. 13 DC-AC & PLL model of ACMG support mode

图 13(a)中,该模式下的 $\Delta P_{ICac} = -\Delta P_{p,ac}$,此时交流母线频率通过 DC-AC 内环获得,其表达式为

$$\Delta \omega_{ref} = \frac{\Delta P_{ref,ac} - \Delta P_{ICac}}{K_p + H_p s} + \Delta \omega_{pll} \quad (40)$$

同时,锁相环的数学模型变化为

$$\Delta \omega_{pll} = G_{pll}(s) \Delta \omega_{ref} \quad (41)$$

结合(28)、(40)和(41),可得:

$$\Delta \omega_{ref} = G_{ref,1}(s) G_{ref,2}(s) G_{p2}(s) \Delta P_{p,2} + (G_{ref,1}(s) + G_{ref,1}(s) G_{ref,2}(s)) \Delta P_{p,ac} - G_{ref,1}(s) G_{ref,2}(s) \Delta P_{ICdc} \quad (42)$$

其中:

$$\begin{cases} G_{ref,1}(s) = 1 / [(K_p + H_p s)(1 - G_{pll}(s)) + k_{ac} G_{pll}(s)(k_{po,ac} + \frac{k_{io,ac}}{s})] \\ G_{ref,2}(s) = \frac{(k_{po,ac} + \frac{k_{io,ac}}{s}) \beta k_{dc,2}}{sK_2 + G_2(s)} \end{cases} \quad (43)$$

3.3.2 交流微电网支撑模式下的完整小信号模型

该模式下,定义矩阵 $\mathbf{X}_{ac} = [\Delta u_{dc,1}, \Delta u_{dc,2}, \Delta \omega_{ref}]^T$, $\Delta \mathbf{P}_{IC,ac} = [\Delta P_{ICdc}]$,此时的矩阵方程可写成:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{ac} = \mathbf{A}_{ac} \Delta \mathbf{P}_p + \mathbf{B}_2 \Delta \mathbf{P}_{IC,ac} \\ \Delta \mathbf{P}_{IC,ac} = \mathbf{C}_{ac} \mathbf{X}_{ac} \end{cases} \quad (44)$$

对式(44)进行简单变换可得交流微电网支撑模式下的完整小信号稳定性分析模型:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{ac} = (\mathbf{I} - \mathbf{B}_{ac} \mathbf{C}_{ac})^{-1} \mathbf{A}_{ac} \Delta \mathbf{P}_p \\ \Delta \mathbf{P}_{IC,ac} = (\mathbf{I} - \mathbf{C}_{ac} \mathbf{B}_{ac})^{-1} \mathbf{C}_{ac} \mathbf{A}_{ac} \Delta \mathbf{P}_p \end{cases} \quad (45)$$

其中：

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{A}_{ac} &= \begin{bmatrix} \frac{G_{p1}(s)}{sK_1 + G_1(s)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_{p2}(s)}{sK_2 + G_2(s)} & \frac{1}{sK_2 + G_2(s)} \\ 0 & G_{ref,1}(s)G_{ref,2}(s)G_{p2}(s) & G_{ref,1}(s)(1 + G_{ref,2}(s)) \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_{ac} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{sK_1 + G_1(s)} \\ \frac{1}{sK_2 + G_2(s)} \\ -G_{ref,1}(s)G_{ref,2}(s) \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_{ac} &= [-G_{udc1}(s) \quad G_{udc2}(s) \quad 0] \end{aligned} \right. \tag{46}$$

上述交直流微电网集群 3 种运行模式下的小信号稳定性分析模型(即式(36)、(39)与(45))的准确性将在下文中得到验证。

4 仿真验证与稳定性分析

4.1 仿真系统

本文采用图 2 所示的交直流微电网集群结构,对本文所提出的控制策略进行仿真验证并与小信号建模的结果(黑色曲线为电磁暂态仿真结果,红色为小信号模型仿真结果)进行比对。具体结构如下:1) 直流子网均由直流电压源与 Buck-Boost DC-DC 变流器组成;2) 交流子网由直流电压源与 DC-AC 构成;3) 选取 3 个平衡单元额定功率满足: $P_{dcs,1}:P_{dcs,2}:P_{ac,s}=1:1:1$, 且所有单元的额定功率均为 $S_B=100\text{kW}$;4) DCMG1 与 DCMG2 的额定电压分别为 400、800V, ACMG 的额定电压和频率分别为 380V 和 50Hz;5) 低通滤波系数 $T_{f0}=0.001$, $T_{f1}=0.02$, $T_{f2}=0.01$ 。以上所有单元的控制策略均按图 2 所示的设定,系统详细参数如表 1—5 所示。

表 1 直流子网 1 参数
Tab. 1 Parameters of DCMG1

单元	子系统	参数	数值
平衡单元	硬件参数	直流源电压	300V
		LC 滤波器	0.5mH/250μF
	P-U 下垂	电压设定值/下垂系数	1/20
	电压环 PI	$k_{pu,1}/k_{iu,1}$	5/100
	电流环 PI	$k_{pi,1}/k_{ii,1}$	0.01/1
功率单元	硬件参数	直流源电压	300V
	电流环 PI	LC 滤波器	0.5mH/250μF
		$k_{pp,1}/k_{ip,1}$	0.005/1

4.2 仿真验证

本文进行了正常模式运行、直流微电网支撑模

表 2 直流子网 2 参数
Tab. 2 Parameters of DCMG2

单元	子系统	参数	数值
平衡单元	硬件参数	直流源电压	600V
		LC 滤波器	0.5mH/250μF
	P-U 下垂	电压设定值/下垂系数	1/10
	电压环 PI	$k_{pu,2}/k_{iu,2}$	5/100
	电流环 PI	$k_{pi,2}/k_{ii,2}$	0.01/1
功率单元	硬件参数	直流源电压	600V
	电流环 PI	LC 滤波器	0.5mH/250μF
		$k_{pp,2}/k_{ip,2}$	0.005/1

表 3 交流子网参数
Tab. 3 Parameters of ACMG

单元	子系统	参数	数值
平衡单元	硬件参数	LC 滤波器	0.25mH,0.02Ω/150μF,0.25Ω
		频率设定/下垂系数	1/40
	P-f 下垂	电压设定值/下垂系数	1/0
	PR 控制	$k_p/k_i/\omega_c$	4/5/0.1rad/s
功率单元	硬件参数	LCL 滤波器	0.4mH,0.025Ω/100μF,0.25Ω/0.1mH
单元	电流环 PI	k_{pid}/k_{iid}	0.2/50

表 4 互联 DC-DC 参数
Tab. 4 Parameters of interlinking DC-DC

单元	子系统	参数	数值
双向 DC-DC	硬件参数	额定功率	100kW
		变压器变比($n:1$)	2:1
		辅助电感	0.1mH
	功率控制	开关频率	4kHz
		外环 PI 控制($k_{po,dc}/k_{io,dc}$)	1/100
		内环 PI 控制(k_{pi}/k_{ii})	0.1/50

式及交流微电网支撑模式 3 种工况下的仿真测试,并对比了详细电磁暂态仿真及利用小信号模型所获得的仿真结果(即图中带 Δ 标识的电气量仿真波形)。

表 5 互联 DC-AC 参数

Tab. 5 Parameters of interlinking DC-AC

子系统	参数	数值
硬件参数	额定容量	100kVA
	额定直流/交流电压(L-LRMS)	800V/380V
	LCL 滤波器	0.5mH/0.02Ω/150μF, 0.25Ω/0.25mH/0.01Ω
功率控制	开关频率	10kHz
	外环功率控制($k_{p0,ac}/k_{i0,ac}$)	1/10
	P - f 下垂 频率设定/下垂系数/惯量($\omega_{set}/K_p/H_p$)	$\omega_{ac}/100/0.1$
	Q - E 下垂 电压设定/下垂系数/惯量($E_{set}/K_q/H_q$)	1/10/0.05
	PR 控制 $k_p/k_r/\omega_c$	4/5/0.1rad/s
	锁相环 k_p/k_{il}	1/5

1) 工况 1：正常模式运行。

该工况下的仿真结果如图 14 所示，具体分析如下：在 $t=0.5s$ 时互联装置启动，整个系统工作在正常运行模式，由于本文将 3 个子网的平衡单元额定容量设置为相等，该模式下控制策略可实现功率分配的均等，仿真结果表明了其正确性，稳态值与理论计算也基本吻合。在 $t=1.5s$ 时，DCMG1 功率单元发生功率扰动，此时 $P_{p,1}=0.2(20kW)$ ，仿真结果表明互联装置可即时响应该扰动，并过渡到新的稳态，重新分配功率，实现期望的目标；在 $t=2.5s$ 时 DCMG2 内的功率单元功率变化为 $P_{p,2}=-0.2(-20kW)$ ，仿真结果表明该系统能有效应对直流子网的功率扰动，满足期望的目标； $t=3.5s$ 时，交流子网内的功率单元发生功率扰动，此时 $P_{p,ac}=-0.5(-50kW)$ ，仿真结果表明此时的系统重新过渡新的稳态，响应交流子网的功率扰动，实现功率的均等分配，证明该控制策略的正确性。

从图中可看出详细电磁暂态和小信号模型仿真

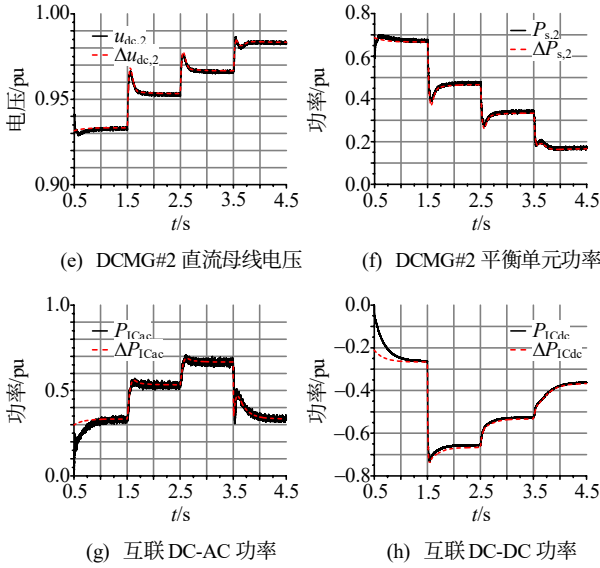
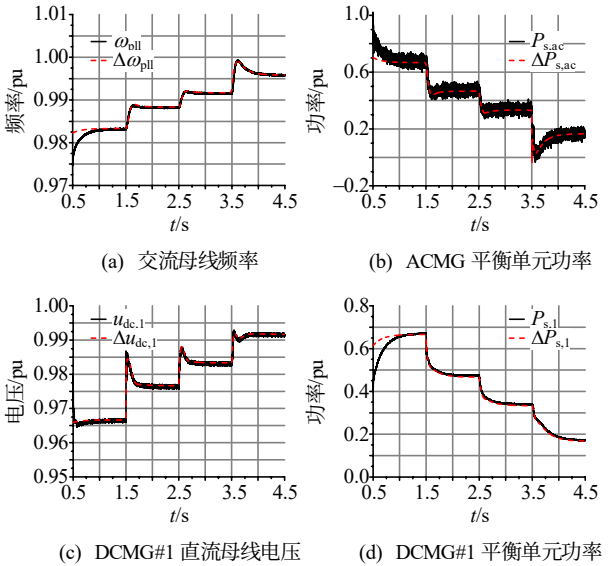


图 14 工况 1 下的仿真波形

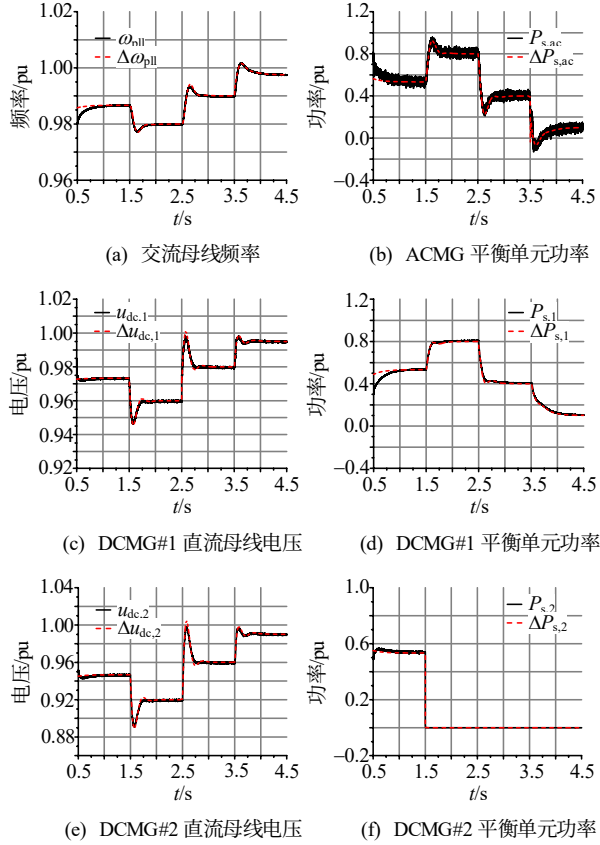
Fig. 14 Simulation results of case 1

结果基本吻合，有效验证了小信号模型的准确性。

2) 工况 2：直流微电网支撑模式。

该工况下的仿真结果如图 15 所示，具体分析如下：

$t < 1.5s$ 时，系统正常运行，处于正常工作模式，此时各功率单元 $P_{p,1}=-0.3(-30kW)$ 、 $P_{p,2}=-0.5(-50kW)$ 、 $P_{p,ac}=-0.8(-80kW)$ 。在 $t=1.5s$ 时刻，DCMG2 内的平衡单元由于故障退出运行；由仿真



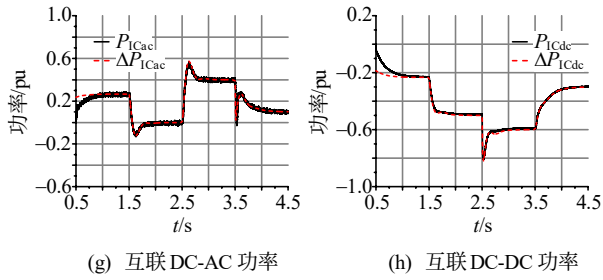


图 15 工况 2 下的仿真波形

Fig. 15 Simulation results of case 2

结果可以看出,该系统能通过 DC-DC 和 DC-AC 支撑 DCMG2 运行,平滑切换到直流微电网支撑模式。 $t=2.5\text{s}$ 时,2 个直流子网功率单元发生功率扰动, $P_{p,1}=0.2(20\text{kW})$, $P_{p,2}=-0.2(-20\text{kW})$;在 $t=3.5\text{s}$ 时刻,交流侧功率单元发生变化,此时 $P_{p,ac}=-0.2(-20\text{kW})$ 。

3) 工况 3: 交流微电网支撑模式。

该工况下的仿真结果如图 16 所示,具体分析如下:

$t < 1.5\text{s}$ 时,整个系统正常运行,此时各功率单元 $P_{p,1}=-0.5(-50\text{kW})$, $P_{p,2}=-0.5(-50\text{kW})$, $P_{p,ac}=-0.9(-90\text{kW})$ 。

在 $t=1.5\text{s}$ 时刻,交流子网内的平衡单元由于故障退出运行,频率由互联 DC-AC 支撑,由仿真结

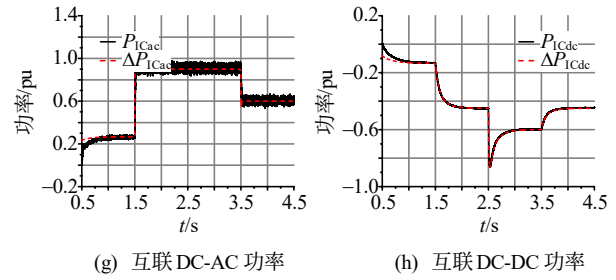


图 16 工况 3 下的仿真波形

Fig. 16 Simulation results of case 3

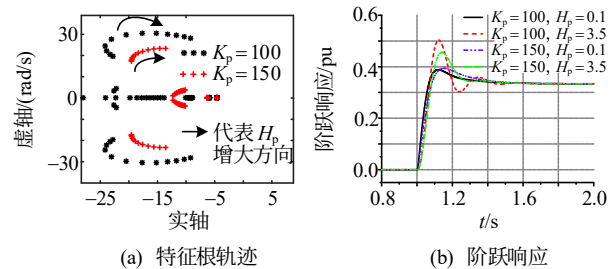
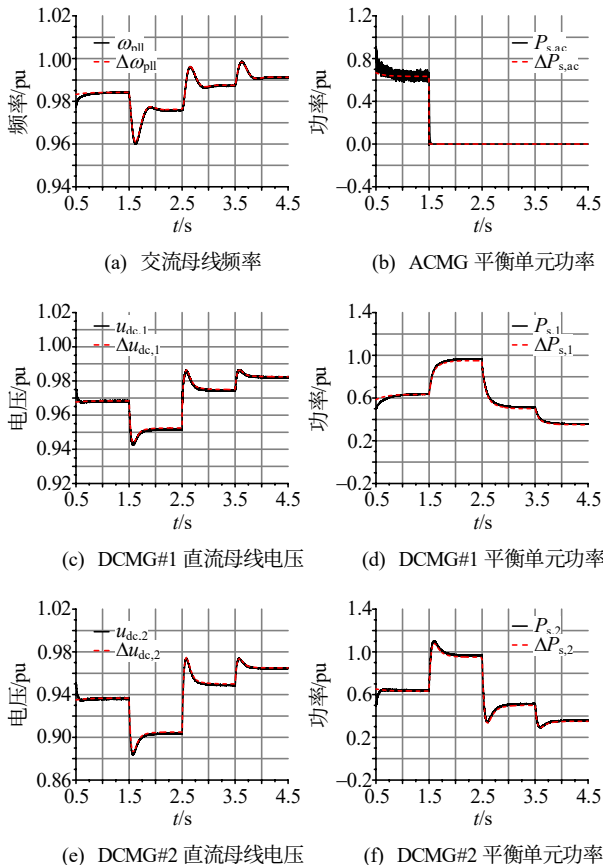
果可以看出,DC-AC 互联装置应用本文所提柔性控制方法平滑切换到交流微电网支撑模式,频率与功率过渡到新的稳态,证明控制策略的正确性。在 $t=2.5\text{s}$ 时刻,两个直流子网功率单元发生功率扰动, $P_{p,1}=0.1(10\text{kW})$, $P_{p,2}=-0.2(-20\text{kW})$;在 $t=3.5\text{s}$ 时刻,交流侧功率单元发生变化,此时 $P_{p,ac}=-0.6(-60\text{kW})$ 。

4.3 稳定性分析

为分析一些重要的参数对系统的影响,本节将依据小信号模型对系统进行稳定性分析,不同工况的稳定性分析方法基本类似,此处主要分析交直流微电网正常运行模式下的稳定性。

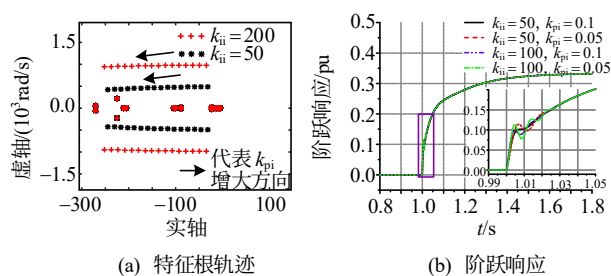
1) 互联 DC-AC 内环 K_p 与 H_p 对系统稳定性的影响。

系统在正常运行模式下的特征根轨迹和时域的动态响应如图 17 所示, H_p 以 0.3 的步长由 0.1 变化到 3.5,由根轨迹可以看出,当 K_p 恒定时,随着 H_p 的增加,系统的根靠近虚轴,阻尼逐渐减少,阶跃响应可能会出现振荡;当 H_p 一定时, K_p 的增加会增大系统的阻尼,在出现振荡时降低振荡的频率。

图 17 参数 K_p 与 H_p 对系统稳定性的影响Fig. 17 The impact of K_p & H_p parameters on system stability

2) 互联 DC-DC 内环 k_{pi} 与 k_{ii} 对系统稳定性的影响。

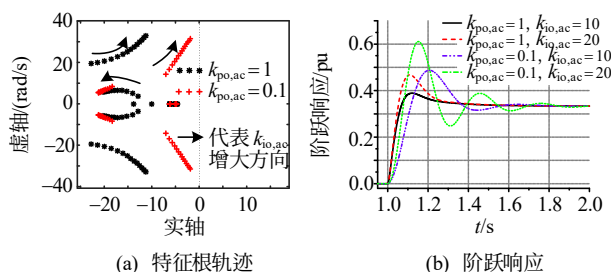
互联 DC-DC 内环 PI 参数对系统的影响如图 18 所示。 k_{pi} 以 0.006 的步长从 0.01 增加到 0.1。由根轨迹与阶跃响应图可以看出,当 k_{ii} 恒定时,随着

图 18 参数 k_{ii} 与 k_{pi} 对系统稳定性的影响Fig. 18 The impact of k_{ii} & k_{pi} parameters on system stability

k_{pi} 的增加, 高频特征根逐渐远离虚轴, 阻尼增大, 振荡削弱, 而当 k_{pi} 恒定时, k_{ii} 越大, 高频特征根越靠近实轴, 系统阻尼越大, 高频振荡越弱, 同时在出现振荡时, 振荡频率与峰值会更小。

3) 互联 DC-AC 外环 $k_{po,ac}$ 与 $k_{io,ac}$ 对系统稳定性的影响。

互联 DC-AC 外环 PI 参数对系统的影响如图 19 所示。 $k_{io,ac}$ 以 3 的步长从 10 增加到 50。当 $k_{po,ac}$ 恒定时, 随着 $k_{io,ac}$ 的增加, 系统的主导特征根向虚轴靠拢, 阻尼越来越小, 阶跃响应中振荡逐渐体现出来; 当 $k_{io,ac}$ 恒定时, 当 $k_{po,ac}$ 增加时, 主导特征根远离虚轴, 阻尼增大, 峰值降低, 振荡频率减小。

图 19 参数 $k_{io,ac}$ 与 $k_{po,ac}$ 对系统稳定性的影响Fig. 19 The impact of $k_{io,ac}$ & $k_{po,ac}$ parameters on system stability

5 结论

本文提出了针对交直流微电网集群结构系统的控制策略, 理论分析与仿真结果均表明该策略能够实现所期望的控制目标, 满足多种运行模式的平滑切换, 在保持控制策略不变的情况下维持多种工况下的稳定运行, 并且能够自适应系统的功率变化等。在各种工况下的小信号模型也都能够基本吻合系统电磁暂态仿真的结果, 并通过该小信号模型对系统的稳定性分析能够指导系统的参数优化, 故在接下来的工作中将会以上述小信号模型为参考优化系统的控制参数, 并将建立相应的实验系统进一

步验证所提控制方法的正确性。

参考文献

- [1] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
Wang Chengshan, Wu Zhen, Li Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12(in Chinese).
- [2] 王浩, 何晋伟, 贾宏杰. 面向微网群的多端口电流源变流器共模电压抑制仿真[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 74-79, 110.
Wang Hao, He Jinwei, Jia Hongjie. Common-mode voltage suppression simulation for multi-port current source converter of microgrid clusters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 74-79, 110(in Chinese).
- [3] 高扬, 艾芊, 王靖. 多智能体系统的交直流混合微网群一致性协同控制[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2372-2377.
Gao Yang, Ai Qian, Wang Jing. Consensus cooperative control of ac/dc hybrid Microgrids based on multi-agent system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2372-2377(in Chinese).
- [4] Han Yang, Zhang Ke, Li Hong, et al. MAS-based distributed coordinated control and optimization in microgrid and microgrid clusters: a comprehensive overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 6488-6508.
- [5] Zhou Jianguo, Zhang Huaguang, Sun Qiuye, et al. Event-based distributed active power sharing control for interconnected AC and DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6815-6828.
- [6] Che Liang, Shahidehpour M, Alabdulwahab A, et al. Hierarchical coordination of a community microgrid with AC and DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 3042-3051.
- [7] Xia Yanghong, Wei Wei, Yu Miao, et al. Decentralized multi-time scale power control for a hybrid AC/DC microgrid with multiple subgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 4061-4072.
- [8] 张释中, 裴玮, 杨艳红, 等. 基于柔性直流互联的多微网集成聚合运行优化及分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 1025-1037.
Zhang Shizhong, Pei Wei, Yang Yanhong, et al. Optimization and analysis of multi-microgrids integration and aggregation operation based on flexible DC interconnection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1025-1037(in Chinese).
- [9] 周小平, 陈燕东, 周乐明, 等. 一种微网群架构及其自主协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10):

- 123-134.
- Zhou Xiaoping, Chen Yandong, Zhou Leming, et al. A microgrid cluster structure and its autonomous coordination control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 123-134(in Chinese).
- [10] 裴玮, 杜妍, 李洪涛, 等. 应对微网群大规模接入的互联和互动新方案及关键技术[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3193-3203.
- Pei Wei, Du Yan, Li Hongtao, et al. Novel solution and key technology of interconnection and interaction for large scale microgrid cluster integration[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3193-3203(in Chinese).
- [11] Xia Yanghong, Wei Wei, Yu Miao, et al. Power management for a hybrid AC/DC microgrid with multiple subgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(4): 3520-3533.
- [12] Lee M, Choi W, Kim H, et al. Operation schemes of interconnected DC microgrids through an isolated bi-directional DC-DC converter[C]//Proceedings of 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Charlotte, NC, USA: IEEE, 2015: 2940-2945.
- [13] Li Xialin, Guo Li, Li Yunwei, et al. Flexible interlinking and coordinated power control of multiple DC microgrids clusters[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 904-915.
- [14] Li Xialin, Guo Li, Li Yunwei, et al. A Unified control for the DC-AC interlinking converters in hybrid AC/DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6540-6553.
- [15] Guerrero JM, Vázquez JC, Matas J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids: a general approach toward standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [16] Shafiee Q, Dragičević T, Vasquez JC, et al. Hierarchical control for multiple DC-microgrids clusters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 922-933.
- [17] Moayedi S, Davoudi A. Distributed tertiary control of DC microgrid clusters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1717-1733.
- [18] 支娜, 肖曦, 田培根, 等. 微网群控制技术研究现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 107-115.
- Zhi Na, Xiao Xi, Tian Peigen, et al. Research and prospect of multi-microgrid control strategies[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 107-115(in Chinese).
- [19] 杨捷, 金新民, 杨晓亮, 等. 交直流混合微网功率控制技术综述[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 29-39.
- Yang Jie, Jin Xinmin, Yang Xiaoliang, et al. Overview on power control technologies in hybrid AC-DC microgrid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 29-39(in Chinese).
- [20] Meng Lexuan, Shafiee Q, Trecate GF, et al. Review on control of DC microgrids and multiple microgrid clusters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(3): 928-948.
- [21] Xu Qianwen, Xiao Jianfang, Wang Peng, et al. A decentralized control strategy for economic operation of autonomous AC, DC, and hybrid AC/DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(4): 1345-1355.
- [22] Loh PC, Li Ding, Chai Yikang, et al. Hybrid AC-DC microgrids with energy storages and progressive energy flow tuning[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1533-1543.
- [23] 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.
- [24] Nejbatkhah F, Li Yunwei. Overview of power management strategies of hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 7072-7089.
- [25] Chen Feixiong, Chen Minyou, Li Qiang, et al. Cost-based droop schemes for economic dispatch in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 63-74.



李霞林

收稿日期：2018-09-20。

作者简介：

李霞林(1986), 男, 博士, 副教授, 研究方向为变流器控制、分布式电源及微网控制技术等, xialinlee@tju.edu.cn;

李志旺(1995), 男, 硕士研究生, 研究方向为交直流微电网的控制与建模, lizhiwang@tju.edu.cn;

郭力(1981), 男, 博士, 教授, 研究方向为电压稳定与优化控制、分布式发电系统等, liguo@tju.edu.cn;

黄迪(1994), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电建模与控制, huangdi06@tju.edu.cn;

李鹏飞(1990), 男, 博士研究生, 研究方向为柔性直流输电、电力系统分析与稳定控制, pengfeilee@tju.edu.cn;

王成山(1962), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统安全性分析、配电系统规划及分析、分布式发电与微电网等, cswang@tju.edu.cn。

(责任编辑 乔宝榆)

Flexible Control and Stability Analysis of AC/DC Microgrids Clusters

LI Xialin, LI Zhiwang, GUO Li, HUANG Di, LI Pengfei, ZHU Jiebei, WANG Chengshan

(Tianjin University)

KEY WORDS: AC/DC MGs clusters; flexible interlinking; flexible control; small signal model; stability analysis

The operation of microgrids clusters can give full play to the mutual support of distributed slack units in the system, so that the system can disperse the power disturbance or impact of large-scale distributed power supply or load on a single microgrid. However, the existing methods have the following two problems in solving the coordinated operation of microgrid. One is to rely on communication, the other is that it is impossible to achieve smooth transition of the operation mode. In order to solve the above problems, a flexible control method is proposed in this paper.

The system structure considered in this paper is shown in Fig. 1, where interlinking DC-DC and DC-AC are applied in the flexible control proposed in this paper.

The desired objectives are:

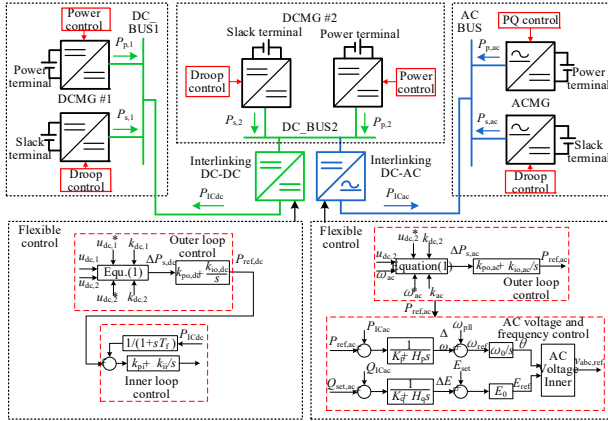


Fig. 1 Considered AC/DC MGs clusters and flexible control

1) Assuming that the rated capacity ratio of slack terminals in DCMG#1, DCMG#2 and ACMG satisfy $P_{dc,1} : P_{dc,2} : P_{ac} = \alpha : 1 : \beta$. Through the flexible control, the actual output power $P_{s,1}$, $P_{s,2}$ and $P_{s,ac}$ of the three slack terminals can be run according to their capacity ratio ($\alpha : 1 : \beta$).

2) Only relying on the electrical information measured locally, the smooth transition of the operation mode can be realized.

Based on the droop control of the slack terminals, the interlinking power increments $\Delta P_{s,dc}$ and $\Delta P_{s,ac}$ are defined in this paper, which are expressed as follows:

$$\begin{cases} \Delta P_{s,dc} = k_{dc,1}(u_{dc,1}^* - u_{dc,1}) - \alpha[k_{dc,2}(u_{dc,2}^* - u_{dc,2})] \\ \Delta P_{s,ac} = k_{ac}(\omega_{ac}^* - \omega_{ac}) - \beta[k_{dc,2}(u_{dc,2}^* - u_{dc,2})] \end{cases} \quad (1)$$

The power reference value of the inner loop can be

obtained from (1) and the proposed flexible control in Fig. 1, which are expressed as follows:

$$\begin{cases} P_{ref,dc} = \Delta P_{s,dc}(k_{po,dc} + k_{io,dc}/s) \\ P_{ref,ac} = \Delta P_{s,ac}(k_{po,ac} + k_{io,ac}/s) \end{cases} \quad (2)$$

Then the power reference can be tracked by the inner loop, which can realize the power coordination control of the multi-terminal microgrid, and can realize the smooth transition of the operation mode, including normal operation mode, DCMG support mode (slack terminal of DCMG fails) and ACMG support mode (slack terminal of ACMG fails). Moreover, any mode can achieve power coordinated operation according to the rated capacity ratio of slack units which are in operation.

In this paper, the effectiveness of the proposed flexible control method is discussed from two aspects: 1) steady-state theoretical analysis; 2) small-signal modeling and stability analysis. Finally, the simulation of flexible interlinking multi-terminal microgrids cluster shown in Fig. 1 is built in PSCAD/EMTDC, and the method proposed in this paper is effectively verified.

Fig. 2 shows some simulation results of the power of slack terminals when their rated capacity ratio is 1 : 1 : 1 (the waveform with Δ represents the simulation results of the math model), where (a) represents the normal operation mode, (b) represents DCMG support mode (slack terminal of DCMG#2 fails) and ACMG support mode (slack terminal of ACMG fails).

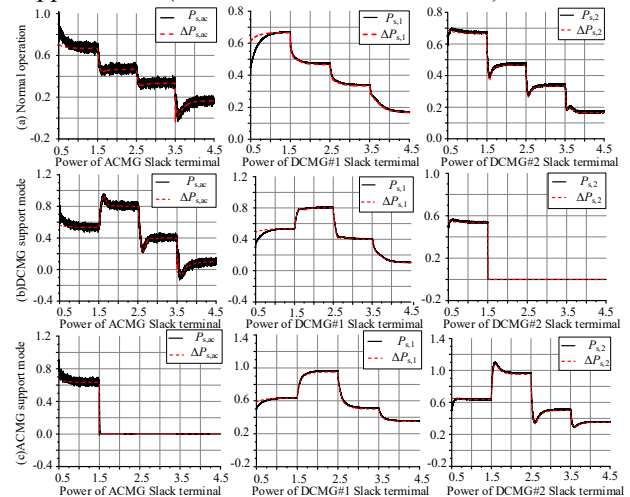


Fig. 2 Some simulation results of different mode