

孤岛与并网模式下交直流混合微电网电能管理及控制策略 The Power Management and Control Strategies of AC-DC Hybrid Microgrids in Islanded and Grid-connected Modes

张霖¹ 蔡文昌^{2*}
Lin Zhang Wen-Chang Tsai

摘要

智能微电网逐渐在配电系统中占据主导地位,该系统是一个可再生能源渗透率很高的再生能源及储能系统。而具有交流和直流电能/负载的混合交直流系统,被认为是最可能的未来的配电系统结构。对于此种混合型交直流微电网,其控制模型及电力管理策略是最关键的操作技术。本文展示混合型交直流微电网系统之控制模型及电能管理策略,其中包括不同的操作模式、稳态暂态条件下的各种控制模型,以及电能管理策略的案例的研究。最后,提出了进一步研究电能管理策略的讨论和建议。

关键词: 控制模型、能源管理策略、交直流混合微电网、配电系统

Abstract

The microgrids have gradually dominated distribution systems with high penetration of renewable energy and energy storage systems. Hybrid AC-DC systems with AC and DC power/load are considered the most likely future distribution configurations. For the hybrid AC-DC microgrid, control modeling and power management strategy is one of the most critical operational aspects. This paper presents the power management strategies of hybrid AC-DC microgrid systems including different system schemes, different operating modes, control schemes under steady-state transient conditions. Also, examples of power management and control strategies are presented. Finally, suggestions and discussions for control modeling and power management strategies are reported in the paper.

Keywords: Power Management Strategies, Hybrid AC/DC Microgrid, Distribution System, Power Control Schemes

1. 简介

微电网正在被开发为下一代发电系统,特别是在配电层级上,正在越来越多地使用分布式发电。分布式发电可以将技术分为可再生能源发电如光伏、风能、微型水力发电、沼气、生物质能、地热能、潮汐和海浪能,清洁替代能源产生技术如燃料和氢电池,以及传统的基于旋转机器的技术如柴油发电机。由于这些来源的多种好处如清洁和技术简单,以及不断增长的电能需求和化石燃料的有限性,可再生能源和基于清

¹ 厦门大学嘉庚学院机电工程学院电气及其自动化专业

² 厦门大学嘉庚学院机电工程学院教授 douglas@xujc.com*通讯作者

* 本研究感谢厦门大学嘉庚学院 2020-2021 学年“省级”大学生创新创业训练计划项目:基于新工科教育之智能电网教材之先期探索与实践(编号:202013469021)经费的支持

洁替代能源的分布式发电机在微电网中起着重要作用。

微电网可以在并网或孤岛运行模式下工作。特别地，尽管孤岛运行时段可能非常有限，但是可以提高对智能电网的可靠性。由于可再生能源的间歇性，其他能源（例如柴油）和电池能源存储系统（BESS）是实现微电网孤岛运行或在并网运行期间平滑微电网功率的关键部分。存储元素可以分为两类：以容量为导向的能量存储和以存取为导向的能量存储（刘畅等，2020；丁晓通，2020；杨立滨等，2020）。以容量为导向的能量存储没有快速的响应时间，它们用于长期能量平衡，以缓冲分布式发电 s 输出功率的低频功率振荡，并补偿微电网中再生能源发电的间歇性；电池、抽水电力系统、氢气储能是以容量为导向的储能类型。以存取为导向的存储设备具有快速的响应时间，并且通过提供高频功率分量，它们负责微电网中的短时扰动，可以提供或吸收具有高功率密度的瞬变功率（王萌萌，2016）。

由于微电网中存在的直流电能如光伏发电、燃料电池等，电池能源存储系统以及现代的直流负载，因此对混合型交流/直流微电网的研究兴趣正在迅速增长。这些交流/直流微电网包含交流/直流负载和电能，具有交流和直流电能系统的优势，被认为是未来最有可能的配电和输电系统（张璐等，2020；贾利虎，2017；邱进亮，2019）。这种交流/直流混合微电网运行的一个关键方面，是控制模型和电能管理策略，这对于在并网运行模式和孤岛运行模式下，提供良好的运行状况至关重要。在微电网中，电能管理策略的目标，是朝着某些所需参数如电压、电流、功率和频率改变瞬时运行条件。电能管理策略包括电压和频率调节，以及微电网中不同功率之间的实时功率分配（詹国敏等，2019）。

由于电能管理与微电网中，功率转换器的接口和控制更加相关，因此，本文将重点研究控制模型和电能管理问题。近年来，尽管对传统交流微电网、直流微电网、或交流/直流微电网混合系统的运行和电能管理进行探讨，本论文进一步讨论混合交流/直流微电网的控制模型和电能管理策略。首先，讨论不同的交流/直流微电网混合结构，包括实际的案例；其次，讨论不同运行状况下，不同类型的交/直流微电网的控制模型和电能管理策略；最后，提出对其未来的控制模型和电能管理研究的建议。

2. 混合型交直流微电网结构

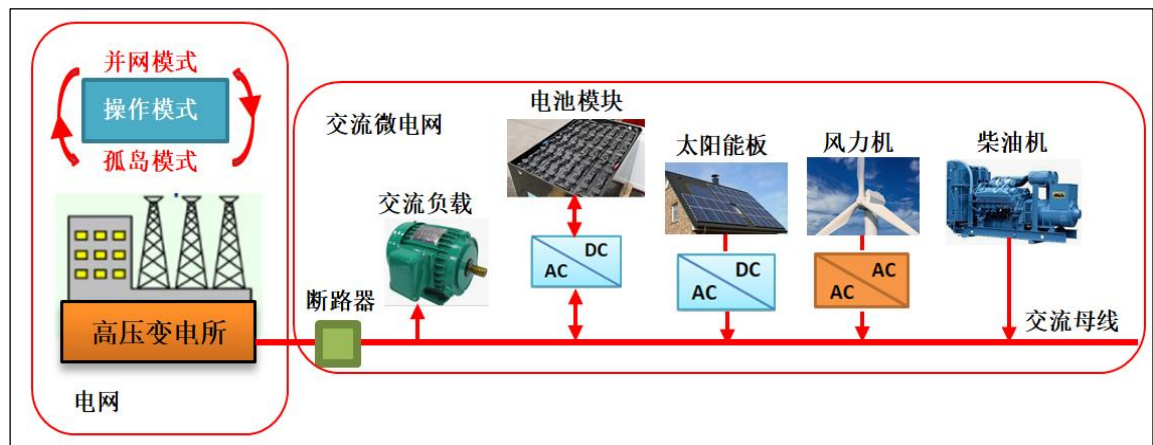
在本文中，混合型交直流微电网是指同时包含交直流电能和交直流负载的微电网。根据电能和负载与系统的连接方式以及交流和直流母线的配置方式，交流/直流混合微电网的结构可以分为交流耦合、直流耦合和交流-直流耦合微电网。在交流耦合混合微电网中，各种分布式发电和电池能源存储系统，通过它们的接口转换器连接到公共交流母线。在交流-直流耦合的混合微电网中，分布式发电和电池能源存储系统连接到直流和交流母线，这些母线通过互连转换器进行链接。在本文中，提供了这些微电网结构及其实际案例。

2.1 交流耦合的混合微电网

在图 1a 所示的交流耦合混合微电网中，各种分布式发电和电池能源存储系统，通过其接口转换器连接到公共交流母线。电池能源存储系统需要双向转换器以提供双向功率流能力。在这种结构中，交流和直流负载也连接到带或不带电力电子转换器之公共母线。当微电网中的主要发电源直接如从柴油发电机产生，或通过接口电力电子变换器间接产生电网的交流电压水平时，通常使用此结构。

在这种交流耦合系统中，尤其是在孤岛运行模式下，控制策略和电源管理方案主

要集中在发电/耗电平衡和交流母线电压/频率控制上。

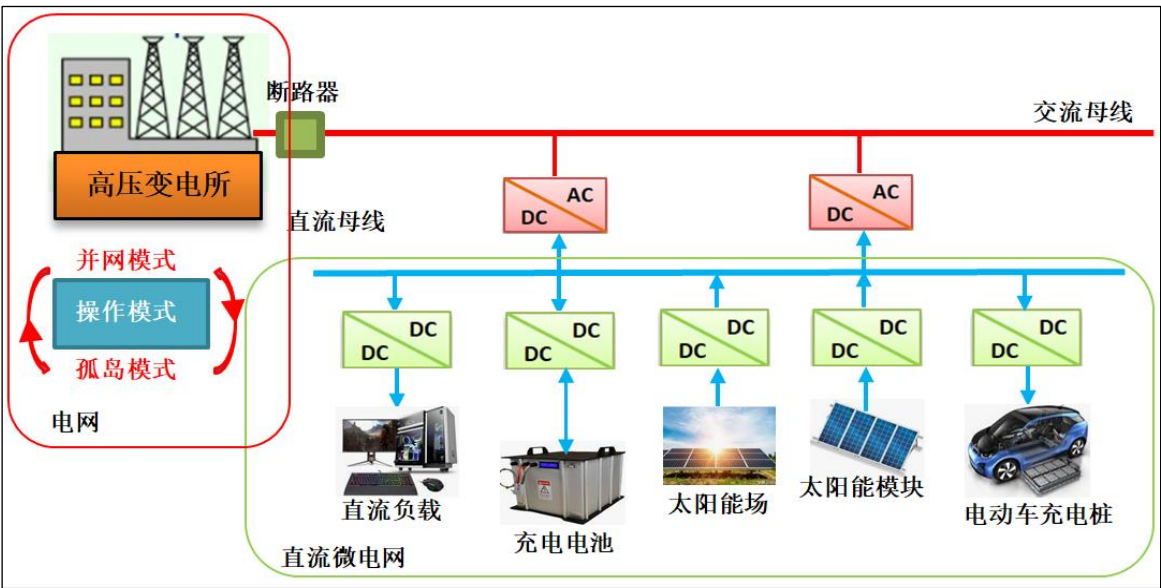


资料来源：本文自行整理

图 1a. 交流耦合微电网结构图

2.2 直流耦合混合微电网

图 1b 显示了一个直流耦合的混合微电网，其中分布式发电和电池能源存储系统连接到公共直流母线，而接口转换器用于链接直流和交流母线。当直流电源是微型计算机中的主要发电单元时，可以使用此结构。请注意，在此结构中，所有分布式发电和电池能源存储系统都连接到直流母线。如果交流母线上有分布式发电和电池能源存储系统，则这将是一个交流-直流耦合的混合微电网，稍后将进行讨论。在此直流耦合微电网中，可将变频交流负载（例如可调速电动机）通过交直流转换器连接到直流母线（以避免为直流母线连接额外的交直流转换）。在该系统中，接口转换器在交流和直流母线之间提供双向功率流。根据直流和交流母线之间的电源交换要求，通常使用并联接口转换器，以提高额定值和可靠性。



资料来源：本文自行整理

图 1b. 直流耦合微电网结构图

3. 混合型交直流微电网的控制方案和电能管理策略

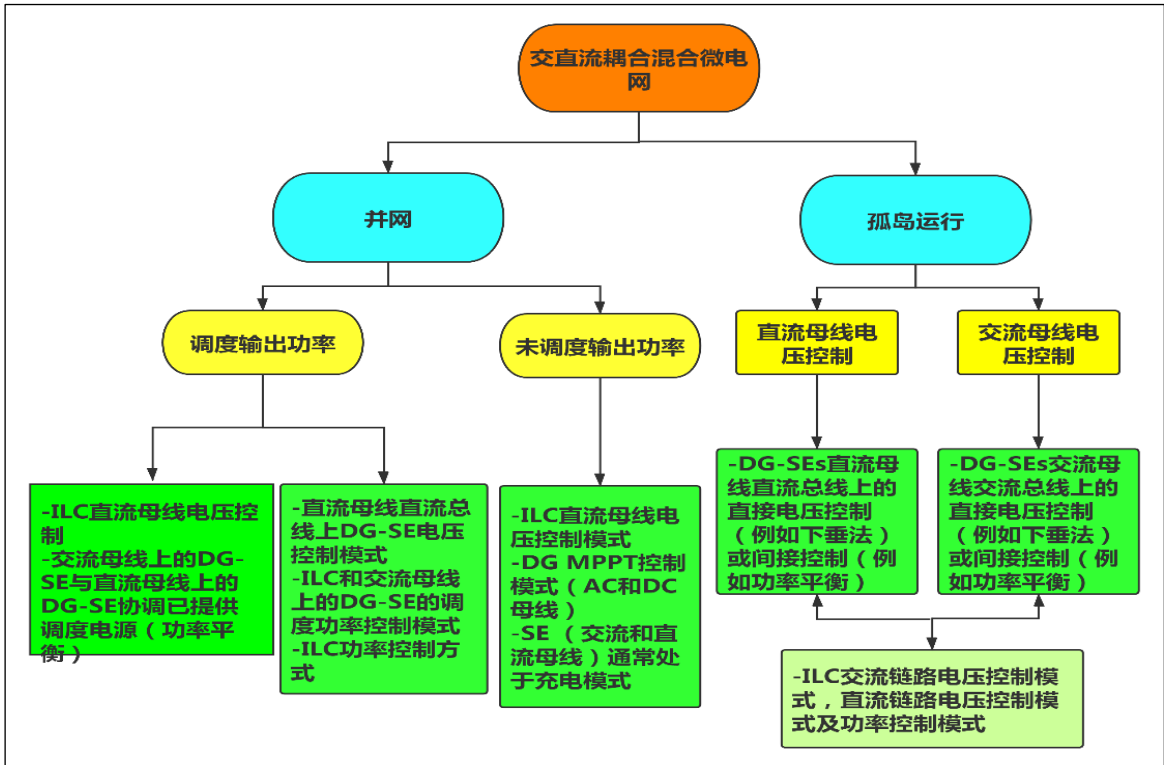
对于交直流混合微电网的运行，控制策略和电能管理方案是最重要的方面。电能管理策略确定分布式发电和电池能源存储系统的输出有功功率和无功功率，并同时控制电压和频率。本节介绍了针对不同类型的交/直流混合微电网的策略。

3.1 交直流混合微电网

在交流-直流混合微电网中，多个分布式发电和电池能源存储系统连接到交流和直流母线。因此，直流子系统和交流子系统之间需要更多的协调。在这些系统中，控制和电能管理策略需要考虑直流子系统和交流子系统之间的功率平衡和电压控制。交流-直流耦合混合微电网的电能管理与控制策略如图 3 所示。

与直流耦合微电网的接口转换器相似，交流直流耦合微电网中的互连转换器，可以处于双向功率控制模式，直流电压控制模式或交流电压控制模式。但是，电能和交流母线控制模式，需要互连转换器与交流母线分布式发电和电池能源存储系统之间的协调。

在具有调度的微电网输出功率的并网运行模式中，可以使用两种方法进行直流链路电压控制和调度的发电。在第一种方法中，互连转换器在直流链路电压调节模式下工作，以将直流母线电压设置为其所需的值。在这种模式下，必须产生直流母线的分布式发电-电池能源存储系统，和交流母线的分布式发电-电池能源存储系统之间的协调，才能产生分配的输出功率。在第二种操作模式下，直流母线上的分布式发电-电池能源存储系统调节，参考电压的直流链路电压，而交流母线上的互连转换器和分布式发电-电池能源存储系统，共同提供分配的功率(贾利虎, 2017; 邱进亮, 2019)。在此操作模式下，互连转换器在电能控制模式下工作。



资料来源：本文自行整理

图 3. 交直流混合微电网的电源管理与控制策略架构图

在并网的未分配输出功率运行模式下，直流和交流母线中的分布式发电都在MPP上工作；此外，必要时对电池能源存储系统进行充电或放电，以平滑注入电网的输出功率。在这种模式下，互连转换器将直流链路电压调节到所需的值，并将直流母线中分布式发电-电池能源存储系统产生的所有功率注入负载/电网。与混合微电网的其他结构类似，可以控制交流母线上的分布式发电和互连转换器，以实现电网支持功能。

在孤岛操作模式下，交流母线上的互连转换器，分布式发电-电池能源存储系统和直流母线上的分布式发电-电池能源存储系统之间的协调，对于调节直流母线电压，交流母线电压和频率，同时平衡微电网的总发电量和需求功率。在此操作模式下，交流耦合混合微电网在孤岛操作模式下的电能管理策略，例如下垂控制（Chen & Xu, 2012），从可用于交流子系统的电压和频率调节以及需求功率共享（He等, 2013）。对于直流子系统控制，类似于孤岛运行中的直流耦合混合微电网，直流母线电压可以直接由直流母线上的分布式发电-电池能源存储系统控制（贾利虎, 2017；邱进亮, 2019），例如利用下垂控制（詹国敏等, 2019）。

要重点注意，在孤岛运行模式下，互连转换器在电能管理和控制中起着重要的作用（贾利虎, 2017；邱进亮, 2019）。根据交流和直流母线中使用的控制策略类型的不同，该转换器可用于直流母线控制模式、交流母线控制模式或输出功率控制模式。但是，最重要的目标是在交流母线、直流母线和互连转换器控制策略之间进行协调。例如，在直流母线电压由连接到直流母线的分布式发电-电池能源存储系统控制，而交流母线电压由连接到交流母线的分布式发电-电池能源存储系统控制的情况下，互连转换器负责管理交流和直流侧之间的功率流为了使需求和发电量相等；同样，在并联互连转换器的情况下，这些互连转换器可以在不同的工作模式下工作：其中一些可以在直流链路电压控制模式下工作，而其他的则可以在交流链路电压控制模式，或电能控制模式下工作。

4. 瞬态和不同负载条件下的电能管理策略

混合微电网功率管理策略，主要集中在稳态功率平衡和电压/电流控制上。本节讨论了微电网运行模式转换期间，以及不同负载条件下的电能管理策略。

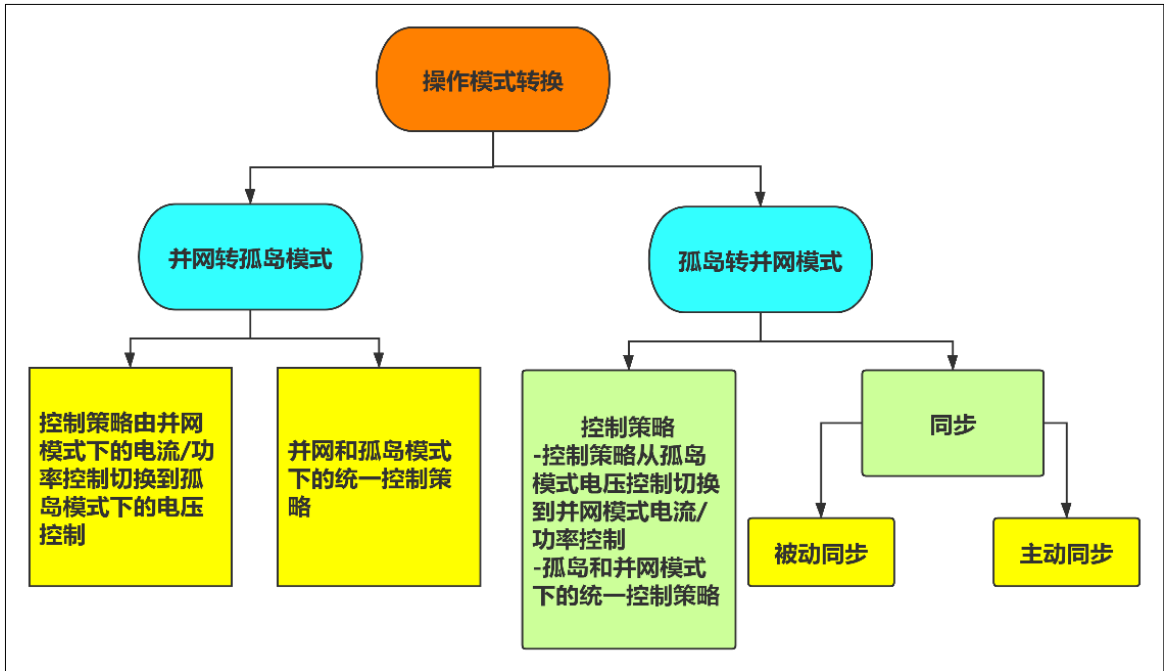
4.1 并网和孤岛运行模式之间转换期间的电能管理

并网和孤岛运行模式之间的过渡应无缝顺畅，以最大程度地减小电压和频率干扰和偏差，并确保均衡的电流流动以防止分布式发电过载和循环功率。连接到孤岛运行以及从孤岛运行到并网运行的过渡将分别讨论。这些转换的概述如图4所示。

从并网运行到孤岛运行模式的转变：微电网从并网运行到孤岛运行的转变主要有两组控制方案：1) 控制策略从电流/功率的切换并网运行中的控制模式转换为孤岛运行中的电压控制模式；2) 并网和孤岛模式下的统一控制。

首先，在并网和孤岛运行模式下，使用不同的控制策略，并且在这两个控制器之间切换控制策略（Jelani & Molinas, 2013；Alaboudy等, 2012；Kim等, 2011；Kim等, 2010；Karimi-Ghartemani, 2014）。尤其是分布式发电在并网运行模式下，以电流控制模式（MPPT控制或调度的功率控制）工作，以向主电网注入功率，而电压控制（下降法或常规电压控制）在孤岛运行模式下使用确保为敏感负载提供连续电力，并在压控分布式发电之间共享负载需求。该控制切换可以应用于与DC/DC转换器接口的分布式发电或能量存储单元，与DC/AC转换器接口的分布式发电或能量存储单

元，以及接口或互连转换器。为了无缝过渡，有许多最近提出的方法。例如，在切换到孤岛的电压控制模式之前，可以将分布式发电的线路电流减小到零（Jelani & Molinas，2013；Alaboudy 等，2012），也可以在不将分布式发电线路电流减小到零的情况下，进行更快的过渡。为了实现这一点，可以仔细协调电流控制器（在并网模式下）和电压控制器（在孤岛模式下）的控制状态，以避免在过渡过程中出现瞬态电流或电压尖峰（Kim 等，2010；Kim 等，2011；Karimi-Ghartemani，2014）。



资料来源：本文自行整理

图 4. 并网和孤岛运行模式转换期间的电能管理与控制架构图

其次，电能管理和控制策略在并网和孤岛运行模式下都是相同的，并且在过渡期间无需修改控制策略（Chen & Xu，2012；Liu 等，2011；Liutanakul 等，2010；Lenz & Pagano，2014；Lenz & Pagano，2014；Majumder 等，2010；Marx 等，2012；Mohamed & Radwan，2011）。因此，设计和实施鲁棒的控制策略以在并网、孤岛和瞬态模式下工作具有挑战性。对于这组控制方法，孤岛检测算法在理论上不是必需的，但由于实用性要求以及为了获得更好的控制性能，通常需要使用孤岛检测算法。该组可能包括在并网和孤岛运行中，均以 MPPT 或电流控制模式工作的较小分布式发电单元。对于主要微电网电能的较大分布式发电和能量存储单元，在操作模式中实施电压控制模式以避免控制方案瞬变；但是，应该对电压控制进行一些修改，以便在并网、孤岛和暂态运行模式下使用它们（Chen & Xu，2012；Liu 等，2011）。例如，使用虚拟阻抗的概念对常规的下垂方法进行了修改，并将 PI 控制器与下垂控制相结合，可在并网和孤岛运行模式下使用（Liu 等，2011；Liutanakul 等，2010；Lenz & Pagano，2014）。作为另一个示例，Majumder 等（2010）对常规的分级控制进行了修改，以提高在微电网的两种运行模式下，使用的常规电压和功率共享控制器的弱干扰抑制性能。

在从并网运行到孤岛运行模式的过渡中，可以包含同步单元的控制策略应在微电网中提供固定频率的稳定电压。此外，它应在分布式发电之间共享电力需求，以继

续向微电网内的负载供电。分布式发电或能量存储单元之间的瞬态功率共享,对于两组控制策略都很重要,并且在孤岛运行期间,电力电子接口的分布式发电,首先会占据所有负载阶跃的大部分,在某些情况下,存在瞬态负载共享不佳的情况分布式发电和传统同步发电机的存在。为了改善瞬态功率共享,分布式发电和常规同步发电机之间的协调是必要的,并且分布式发电必须以增加的电压和频率骤降为代价,允许电压和频率摆动。例如,Matas 等(2011)针对下垂控制已修改了控制策略,以通过在过渡过程中改变下垂斜率,并将其恢复到稳态时的正常状态,来改善暂态负载分配。

从孤岛运行到并网控制模式的转换:在从孤岛运行到并网控制模式的转换中,除了控制方案(从电压年龄控制转换为电流/功率控制或通过控制模式)统一控制方案(如前所述),一项重要任务是在重新连接之前,微电网电压应与电网电压同步。

为了使微电网与主电网同步,主要有两种类型:被动同步和主动同步。对于无源同步,监视微电网电压和主电网电压,并且当两个电网具有相同的相角时将其连接起来。此方法基于以下假设:微电网和主电网的电压幅值非常接近且略有不同频率(通常是这种情况)。到目前为止,被动同步是最简单且可能是最实用的方法;但是,此方法在重新连接两个电网时,导致一些瞬变(由于电压大小不完全匹配),并且不能保证快速且可控制的同步过程。

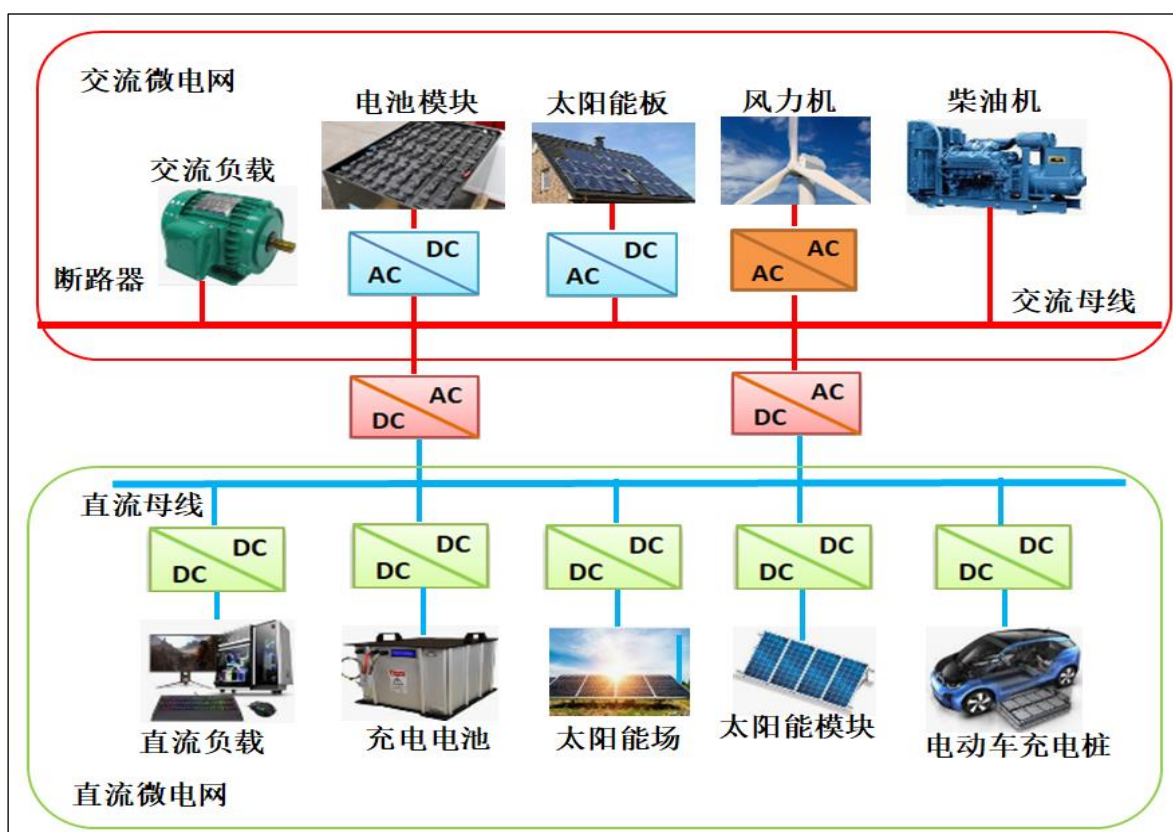
另一方面,主动同步可以实现微电网与主电网的快速同步和无缝连接,并吸引了相当多的研究工作;但是,由于微电网是由不同的再生能源和清洁替代能源的分布式发电、骤变的电负载以及存储设备所组成,因此与单个传统机器相比,微电网的同步是完全不同的。为了实现主动同步,需要协调多个分布式发电和能量存储。在某些情况下,单独的同步单元提供同步信号,以提供与电网的微电网重新连接。

如第三节前面所述,在孤岛操作模式下,所有在电压控制模式下工作的分布式发电(如对所有分布式发电应用的下垂控制或常规电压控制模式),或者某些在电流控制模式下,基于再生能源的分布式发电在 MPPT 上运行,将所有分布式发电同时导入参与同步如下:

第一方案同步策略主要用于微电网,其中一些分布式发电在电流控制模式下工作,而其他分布式发电在电压控制模式下工作(Mohamed & Radwan, 2011; Nejabatkah & Li, 2015; Paquette & Divan, 2014)。例如,在 Nejabatkah 与 Li(2015)中,当基于再生能源的分布式发电处于其 MPP 模式时,主动同步应用于可控分布式发电,以控制微电网的频率和电压;在 Paquette 与 Divan(2014)中,主从控制中使用的同步方案讨论策略,其中主分布式发电主导同步过程。第二方案同步策略主要用于所有电网都在电压控制模式下工作的微电网(Karimi-Ghartemani, 2014; Liu 等, 2011; Rahimi & Emadi, 2009)。例如,在 Liu 等(2011)和 Rahimi 与 Emadi(2009)中,讨论下垂控制方法中的同步策略,其中通过下垂特征等值线调整,所有分布式发电的虚拟阻抗概念利用来实现同步;同步后,微电网将在零电压交叉点处重新连接到电网。

4.2 不同负载条件下的功率管理策略

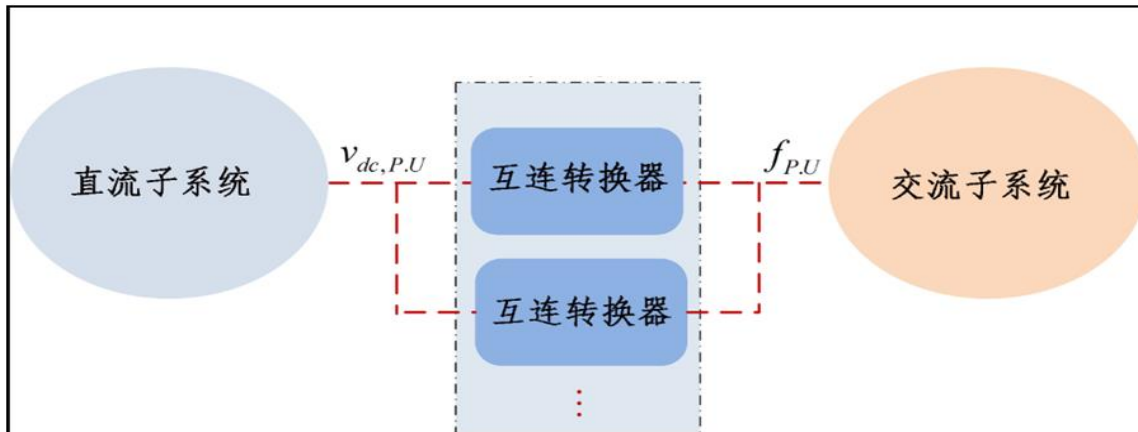
在交直流混合微电网孤岛运行模式中如图 5(a)所示,负载和(或)电网状况可能会对微电网的性能产生重大影响。结果,在这些条件下需要鲁棒的电流或电压控制。在存在非线性/不平衡负载的情况下,这会导致 PCC 处的电压不平衡,因此已使用了各种控制策略。



资料来源：本文自行整理

图 5(a). 孤岛运行模式之交直流混合微电网

另一方面，主要通过有源整流器连接到交流电网，或将 DC/DC 转换器连接到直流电网的恒定功率负载，会由于其负阻抗特性而导致微电网不稳定的问题。这些问题已在不同的研究中，使用小信号方法和大信号方法进行了研究（Paquette & Divan，2014；Rahimi & Emadi，2009），并提出了各种解决方案以确保系统的稳定性。其中包括用于增加稳定性裕度的振荡补偿技术（Tan 等，2013），用于克服负阻抗不稳定性问题的有源阻尼技术（Tan 等，2012），交流/直流转换器的非线性控制等（Vandoorn 等，2013）。另外，在某些情况下，恒定功率负载被控制为微电网提供辅助服务，例如由电力电子非线性负载，并联有源滤波器等引起的谐波最小化（Wai 等，2013）。除了会影响微电网稳定性的恒定功率负载之外，依赖于频率和电压的负载还会影响微电网的稳定性。已经证明，在孤岛操作中，频率和电压偏差彼此相关，因此，由于负载的电压和频率依赖性，可能会导致微电网不稳定运行（Yao 等，2010）。例如，感应电动机是微电网中与频率和电压相关的负载，而传统的 P/Q 控制策略无法保证微电网在这些负载下的稳定性（Tao & Francois，2011）。在存在依赖于频率和电压的负载的情况下，精确的负载模型对于控制系统设计至关重要，以增强稳定性和瞬态性能（Li 等，2011；Zhou 等，2011；Zhong & Weiss，2011）。提供了一个孤岛运行模式下之直流和交流母线电压调节的下垂控制案例（贾利虎，2017）。重要的是要注意，直流和交流母线中的功率共享在很大程度上取决于互连转换器控制策略如图 5(b)。



资料来源：Zeineldin 等，2009

图 5(b). 在孤岛运行模式下，采用自主互连转换器控制之交直流混合微电网

5. 讨论

考虑到基于直流电压的可再生能源，储能和直流负载以及现有的广泛交流系统的普及率不断提高；交流/直流混合微电网是未来电力系统中必不可少的部分。本文对不同的混合微电网结构，在不同操作和负载条件下，进行了电能管理方案以及实施案例之回顾和讨论。在本文中，提供了有关交流/直流混合微电网未来趋势的一些讨论和建议如下：

5.1 交流/直流混合微电网的结构

在交流/直流混合微电网的不同结构中，由于其结构和控制方案简单，迄今为止，交流耦合混合微电网一直是主要结构；但是随着现代直流负载的增加以及并网连接更多可再生能源和必要性储能系统，交直流耦合混合微电网是电力系统的未来趋势。交流-直流耦合混合微电网可以减少电能转换过程的数量，从而提高了整体效率并降低了成本。然而，在这些系统中，控制方案和电能管理策略是主要的关注和挑战。由于分布式发电和电池能源存储系统同时连接到交流和直流母线，因此在直流和交流子系统之间需要更多的协调。未来的交流-直流耦合微电网将在不同的电压水平（如果有高频链路，则可能是频率）中，具有多个直流和交流母线。因此，交直流母线电压和频率控制，以及直流母线、交流母线和电网/负载内的功率平衡，是主要的电能管理挑战和目标；此外，连接不同电压水平的不同直流和交流母线的互连转换器的操作，可能会成为将来有趣的研究课题。

5.2 电能质量问题

在未来的交流/直流微电网中，随着来自分布式发电，电池能源存储系统和负载的更多电力电子设备的连接，以及越来越多的非线性负载，电能质量将成为重要的话题。目前，谐波、不平衡和电压骤降/骤升已经引起当今配电系统的担忧；但是，随着分布式发电/电池能源存储系统接口转换器利用率的提高，可以对其进行适当控制以帮助解决电能质量问题。因为混合微电网中的大多数分布式发电，电池能源存储系统和互连或接口转换器都不会一直以全额定值运行，尤其是考虑到再生能源的间歇性时；可用的转换器额定值可以以一种聪明的方式使用，以帮助改善电能质量。因此，未来微电网系统诸如不平衡电压补偿、减轻闪烁、功率因数校正以及谐波补偿等辅助的开发，可以是良好的研究方向。

5.3 互连转换器和接口转换器的并行操作

接口转换器和互连转换器，是混合微电网系统中交流和直流母线之间的关键链接，它们的控制是直流和交流子系统之间功率平衡的关键。由于与其他分布式发电或电池能源存储系统的接口相比，要求更高的额定值，这些接口转换器和互连转换器通常将具有并行运行的并行转换器。因此，这些转换器的平行操作是值得进一步研究的课题。

对于并行转换器，可以使用控制策略和瞬时电流共享方法，这在并行接口转换器和互连转换器时很重要；此外，如前所述，接口转换器和互连转换器可以处于电能控制模式，直流电压控制模式或交流电压控制模式，但并非所有并行接口转换器或互连转换器都可以在同一控制模式下一起工作。例如，对于交流-直流耦合的微电网，可能有一些互连转换器控制直流链路电压，一些互连转换器控制交流链路电压，有些互连转换器控制平衡功率。这些组合控制策略需要进一步的研究。因此，在未来的研究中需要考虑并连接口转换器或互连转换器，在并网和孤岛运行模式之间微电网过渡期间的性能。

5.4 不同负载/电网条件下的暂态电能管理

混合微电网的电能管理和控制策略在并网、孤岛和过渡运行模式下应具有良好的性能；此外，并网运行模式和孤岛运行模式之间的过渡应该是平滑且顺畅的。另一方面，负载和/或电网状况可能会对微电网的性能产生重大影响。尽管在不同的研究中已经分别考虑了这些挑战，但考虑到真正的混合微电网，在未来的研究中仍需要进一步研究不同负载/电网条件下的暂态功率管理。

6. 结论

本文综述了交流/直流混合微电网的结构和控制模型，讨论了交流/直流混合微电网的各种结构，并给出了不同类型的混合微电网的实际案例。本文在不同的运行和负载条件下，对不同类型的微电网的不同控制模型和电能管理策略进行了全面的回顾和讨论；另外，以一些控制模型的案例，更好地展示电能管理策略；最后，对交流/直流混合微电网的控制模型和电能管理策略未来研究方向；进行了讨论和提出建议。

参考文献

1. 刘畅、卓建坤、赵东明、李水清、陈景硕、王金星、姚强（2020）。利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述。中国电机工程学报，40(1)，1-18+369。
2. 丁晓通（2020）。交直流混合微电网中互联变流器的控制策略研究（未出版之硕士论文）。安徽省：合肥工业大学。
3. 杨立滨、宗鸣、李春来（2020）。考虑直流侧电容存储能量的风电机组虚拟惯性控制策略。可再生能源，38(6)，798-803。
4. 王萌萌（2016）。交直流混合微电网运行控制策略研究（未出版之硕士论文）。江苏省：东南大学。
5. 张璐、唐巍、卢莹、张博、张筱慧、赵春雪（2020）。面向新型源荷接入的交直流混合配电网关键技术研究综述。供用电，37(10)，3-9+21。
6. 贾利虎（2017）。交直流混合微电网拓扑与控制策略研究（未出版之博士论文）。北京：华北电力大学。

7. 邱进亮(2019)。交直流混合微电网的运行及控制策略研究(未出版之硕士论文)。甘肃省：兰州理工大学。
8. 詹国敏、肖遥、张弘、赵兴国(2019)。风光柴储智能微电网能量管理控制策略设计。《电器与能效管理技术》，19，83-90。
9. Alaboudy, A. K., Zeineldin, H. H., & Kirtley, J. L. (2012). Microgrid stability characterization subsequent to fault-triggered islanding incidents. *IEEE Trans. Power Del.*, 27(2), 658-669
10. Amelian, S. M., & Hooshmand, R. (2013). Small signal stability analysis of microgrids considering comprehensive load models-A sensitivity-based approach. in *Proc. IEEE Smart Grid Conf.*, 143-149.
11. Balaguer, I. J., Qin, L., Yang, S., Supatti, U., & Peng, F. Z. (2011). Control for grid-connected and intentional islanding operations of distributed power generation. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 58(1), 147-157.
12. Chen, D., & Xu, L. (2012). Autonomous DC voltage control of a DC microgrid with multiple slack terminals. *IEEE Trans. Power Syst.*, 27(4), 1897-1905.
13. Du, W., Zhang, J., Zhang, Y., & Qian, Z. (2013). Stability criterion for cascaded system with constant power load. *IEEE Trans. Power Electron.*, 28(4), 1843-1851.
14. Etemadi, A., Davison, E., & Iravani, R. (2012). A decentralized control strategy for multi-DER microgrids part I-fundamental concept. *IEEE Trans. Power Del.*, 27(4), 1843-1853.
15. Fairley, P. (2013). Germany jump-starts the supergrid. *IEEE Spectrum.*, 50(5), 36-41.
16. Gordon, S. (2006). Supergrid to the rescue. *Power Eng.*, 20(5), 30-33.
17. Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., Castilla, M., & De Vicuna, L. G. (2009). Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 56(3), 726-736.
18. Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., De Vicuna, L. G., & Castilla, M. (2011). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids-A general approach toward standardization. *IEEE Trans. Ind. Electronics.* 58(1), 158-172.
19. Gupta, A., Doolla, S., & Chatterjee, K. (2017). Hybrid AC-DC microgrid: Systematic evaluation of control strategies. in *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1-1.
20. He, J., Yun, W. L., Guerrero, J. M., Blaabjerg, F., & Vasquez, J. C. (2013). An islanding microgrid power sharing approach using enhanced virtual impedance control scheme. *IEEE Trans. Power Electron.*, 28(11), 5272-5282.
21. Hertem, D. V., Ghandhari, M., & Delimar, M. (2011). Technical limitations towards a Supergrid-A European prospective. in *Proc. IEEE Energy Conf. Exhib.*, 302-309.
22. Jelani, N., & Molinas, M. (2013). Shunt active filtering by constant power load in microgrid based on IRP P-Q and CPC reference signal generation schemes. in *Proc. IEEE Power Syst. Technol. Conf.*, 1-6.
23. Jiang, Z., & Yu, X. (2009). Hybrid DC- and AC-linked microgrids: Towards integration of distributed energy resources. in *Proc. IEEE Energy 2030 Conf.*, 1-8.
24. Karimi-Ghartemani, M. (2014). Universal integrated synchronization and control for single-phase DC/AC converters. *IEEE Trans. Power Electron.*, 30(3), 1544-1557.
25. Kim, J., Guerrero, M. J., Rodriguez, P., Teodorescu, R., & Nam, K. (2011). Mode adaptive droop control with virtual output impedances for an inverter-based flexible AC microgrid. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 26(3), 689-702.
26. Kim, J. Y., Jeon, J. H., Kim, S. K., Cho, C., Park, J. H., Kim, H. M., & Nam, K. Y. (2010). Cooperative control strategy of energy storage system and microsources for stabilizing the microgrid during islanded operation. *IEEE Trans. Power Electron.*, 25(12), 3037-

- 3048.
27. Lenz, E., & Pagano, D. J. (2014). Nonlinear control of a three-phase power converter with constant power load in a microgrid. in Proc. IEEE Power Electronics Conf., 27, 368-373.
 28. Li, Z., Wu, T., Yan, X., Kai, S., & Gurrero, J. M. (2011). Power control of DC microgrid using DC bus signaling. in Proc. 26th Annu. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo., 1926-1932.
 29. Liu, X., Wang, P., & Loh, P. C. (2011). A Hybrid AC/DC microgrid and its coordination control. IEEE Trans. Smart Grid, 2(2), 278-286.
 30. Liutanakul, P., Awan, A. B., Pierfederici, S., Nahid-Mobarakkeh, B., & Meibody-Tabar, F. (2010). Linear stabilization of a DC bus supplying a constant power load: A general design approach. IEEE Trans. Power Electron., 25(2), 475-488.
 31. Majumder, R., Chaudhuri, B., Ghosh, A., Ledwich, G., & Zare, F. (2010). Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop. IEEE Trans. Power Del., 25(2), 796-808.
 32. Marx, D., Magne, P., Nahid-Mobarakkeh, B., Pierfederici, S., & Davat, B. (2012). Large signal stability analysis tools in DC power systems with constant power loads and variable power loads-A review. IEEE Trans. Power Electron., 27(4), 1773-1787.
 33. Matas, J., Castilla, M., Vicuna, A. L. G., Miret, J., & Vasquez, J. C. (2011). Virtual impedance loop for droop-controlled single-phase parallel inverters using a second-order general-integrator scheme. IEEE Trans. Power Electron., 25(12), 2993-3002.
 34. Mohamed, A. R. I., & Radwan, A. A. (2011). Hierarchical control system for robust microgrid operation and seamless mode transfer in active distribution systems. IEEE Trans. Smart Grid, 2(2), 352-362.
 35. Nejbatkhah, F., & Li, Y. W. (2015). Overview of power management strategies of hybrid AC/DC microgrid. in IEEE Transactions on Power Electronics, 30(12), 7072-7089, 10.1109/TPEL.2014.2384999.
 36. Paquette, A., & Divan, D. (2014). Transient droop for improved transient load sharing in microgrids. in Proc. IEEE Energy Conver. Congr. Expo. Conf., 84-91.
 37. Rahimi, A. M., & Emadi, A. (2009). Active damping in DC/DC power electronic converters: A novel method to overcome the problems of constant power loads. IEEE Trans. Ind. Electron., 56(5), 1428-1439.
 38. Tan, K. T., Peng, X. Y., So, P. L., Chu, Y. C., & Chen, M. Z. Q. (2012). Centralized control for parallel operation of distributed generation inverters in microgrids. IEEE Trans. Smart Grid, 3(4), 1977-1987.
 39. Tan, K. T., So, P. L., Chu, Y. C., & Chen, M. Z. Q. (2013). Coordinated control and energy management of distributed generation inverters in a microgrid. IEEE Trans. Power Delivery, 28(2), 704-713.
 40. Tao, Z., & Francois, B. (2011). Energy management and power control of a hybrid active wind generator for distributed power generation and grid integration. IEEE Trans. Ind. Electron., 58(1), 95-104.
 41. Vandoorn, T. L., Meersman, B., De Kooning, J. D. M., & Vandevelde, L. (2013). Transition from islanded to grid-connected mode of microgrids with voltage-based droop control. IEEE Trans. Power Syst., 28(3), 2545-2553.
 42. Wai, R. J., Lin, C. Y., Huang, Y. C., & Chang, Y. R. (2013). Design of high-performance stand-alone and grid-connected inverter for distributed generation applications, IEEE Trans. Ind. Electron., 60(4), 1542-1555.
 43. Yao, Z., Lan, X., & Yan, Y. (2010). Seamless transfer of single-phase grid-interactive inverters between grid-connected and stand-alone modes. IEEE Trans. Power Electron.,

- 25(6), 1597-1603.
44. Zeineldin, H. H., & Kirtley, J. L. (2009). Micro-grid operation of inverter based distributed generation with voltage and frequency dependent loads. in Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting, 1-6.
 45. Zhong, Q. C., & Weiss, G. (2011). Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators. IEEE Trans. Ind. Electron., 58(4), 1259-1267.
 46. Zhou, H., Bhattacharya, T., Tran, D., Siew, T., & Khambadkone, A. M. (2011). Composite energy storage system involving battery and ultracapacitor with dynamic energy management in microgrid applications. IEEE Trans. Power Electron., 26(3), 923-930.

收稿日期：2021-08-21
责任编辑、校对：秦依漫、林嘉盈