

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.01.004

基于子模块电容能量波动的 MMILC 下垂控制策略

王舒炜¹, 苏建军^{1,2}, 刘洋³

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049;

2. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001;

3. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003)

摘要:交直流混合配电网中, 孤岛模式下互联换流器(interlinking converter, ILC)具有实现配网间功率平衡、维持交流频率和直流电压稳定的作用。模块化多电平互联换流器(modular multilevel interlinking converter, MMILC)作为 ILC 的拓扑之一, 具有谐波特性好、波形质量高、开关损耗低等优势。文中提出一种适用于 MMILC 的两级式下垂控制策略, 首先基于子模块电容能量波动特性建立了适用于 MMILC 的新型交直流侧统一下垂特性; 然后推导得出了 MMILC 直流侧电压与等效子模块电容电压间的数学关系, 使 MMILC 仍可通过直流电压偏差进行功率调节, 同时设置了下垂特性曲线的死区和最低允许运行范围; 最后, 分别对 MMILC 在不同负载模式和过载情况下的控制性能进行了仿真。仿真结果表明, 所提出的 MMILC 两级式下垂控制策略可以自动平衡不同负载模式下交直流侧配网的功率偏差, 过载情况下可以瞬时闭锁, 验证了控制策略的正确性和有效性。

关键词:交直流混合配电网; 模块化多电平互联换流器(MMILC); 统一下垂特性; 下垂控制策略; 孤岛模式; 功率平衡

中图分类号: TM76

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)01-0026-09

0 引言

交直流混合配电网具有可高效接入各类分布式电源和储能系统、能够提供高可靠能源供应等优势^[1-2]。作为交直流混合配电网的主要组成部分, 双向功率流动的交直流互联换流器(interlinking converter, ILC)和其控制策略对于在不同运行模式下的交直流子网间的功率互补和稳定运行具有关键作用^[3-4]。

在孤岛运行模式下, 由于交直流混合配电网交流侧没有主电网提供频率支撑, 应考虑交直流配电网间的功率不平衡以及电压、频率稳定的问题。这种运行模式下, ILC 应对交流侧和直流侧的功率进行统一管理, 以决定 ILC 功率的注入方向, 这给 ILC 的控制策略带来了巨大挑战^[5-6]。

目前, 为了避免集中式控制中分布式电源间高速通信的可靠性问题, 孤岛模式下的各类分布式电源主要采用分布式下垂控制。结合交流子配网和直流子配网的分布式下垂控制特性, 文献[7-9]提出一种归一化下的下垂控制策略, 分别将交直流侧下垂特性进行标么化处理后生成 ILC 的功率参考值; 文献[10]提出一种基于自适应下垂控制的 ILC 控制策略, 改善了系统瞬态性能; 文献[11]采用功率量控制方法, 通过两侧下垂特性, 由实测的直流母

线电压和交流系统频率计算得到 ILC 的功率参考值。然而上述控制策略均为单级式下垂控制, 下垂特性的交流频率和直流电压基准值无法根据两侧的功率波动进行动态调整。为了解决以上问题, 文献[12]提出一种新型的直流电压-交流频率下垂特性, 结合功率量控制法建立两级式下垂控制, 实现交流频率和直流电压基准值的动态调整; 文献[13]针对中低压微网中阻抗比较大的特征, 改进了文献[12]中的下垂控制策略, 使之适用于中低压微网; 文献[14]提出一种双级式 ILC 下垂控制策略, 解决了直流微电网电压等级较低时与交流微电网的互联问题。

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)因其良好的谐波特性、较低的开关损耗和较高的波形质量而被广泛应用于高中压电网中^[15-17]。将 MMC 的结构应用到 ILC 中构成模块化多电平互联换流器(modular multilevel interlinking converter, MMILC), 而目前鲜有文献对 MMILC 在孤岛模式下的下垂控制策略进行研究。文献[12-14]均是通过计算交直流两侧功率波动对直流侧电容能量波动的影响来验证交直流侧下垂特性, 仅适用于两电平电压源换流器。而 MMILC 直流侧不需要高压电容器组, 其能量均储存在各桥臂子模块电容中, 导致孤岛模式下传统 ILC 的两级式下垂控制并不适用于 MMILC, 无法直接通过直流电压建立交直流侧的统一下垂特性。

收稿日期: 2022-08-19; 修回日期: 2022-10-22

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFE0118400)

鉴于以上原因,文中提出一种孤岛模式下适用于 MMILC 的两级式下垂控制策略。该策略基于子模块电容能量波动建立了适用于 MMILC 的新型交直流侧统一下垂特性,实现了 MMILC 交流频率和直流电压下垂特性基准值的动态调整。新型下垂特性曲线的死区和最低允许运行范围的设置使 MMILC 无论在交流侧还是直流侧过载的情况下都可以及时闭锁,维持另一侧配网的稳定运行。

1 基于 MMILC 的交直流混合配电网拓扑和子网控制

1.1 基于 MMILC 的交直流混合配电网拓扑

一种典型的交直流混合配电网拓扑如图 1 所示,包含 1 个交流配电网,1 个直流配电网和 1 个 ILC。文中研究对象为 MMILC,因此 ILC 采用 MMILC 的配置,交流配电网和直流配电网通过 MMILC 连接,以实现两侧功率的相互支撑。并网模式下,交流母线上的电压和频率由电网支撑,MMILC 控制直流母线电压稳定;而孤岛模式下,必须依靠交直流侧各分布式电源和 MMILC 协调控制维持交流电压、频率和直流电压稳定。在孤岛模式下,交直流混合配电网中母线上所连接元件可基本分为 2 类:功率节点和平衡节点。平衡节点主要包含可控分布式电源和储能装置,在实现配网内部功率平衡的同时对交流电压、频率或直流电压进行控制。功率节点主要包含各类基于可再生能源的分布式电源,如光伏、风力发电场以及各种交直流负载等。

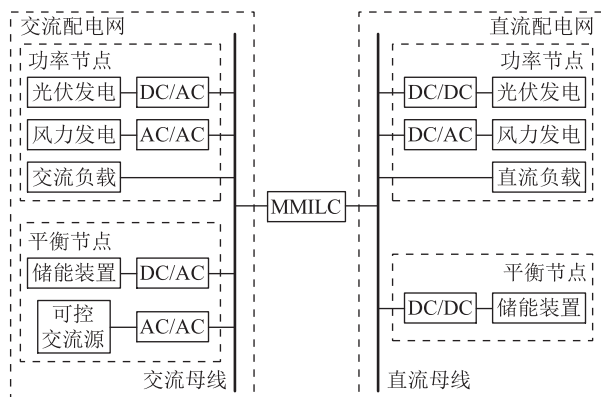


图 1 典型交直流混合配电网拓扑

Fig.1 A typical topology of hybrid AC/DC microgrid

1.2 交流配电网下垂控制

交流配电网内元件的控制可分为 2 类。对于功率节点,可采用定有功功率和定无功功率的控制方式;对于平衡节点,可采用传统下垂控制策略,实现有功功率与电网频率、无功功率与电网电压间按下

垂系数成比例分配,其下垂特性如图 2 所示,表达式如式(1)和式(2)所示。

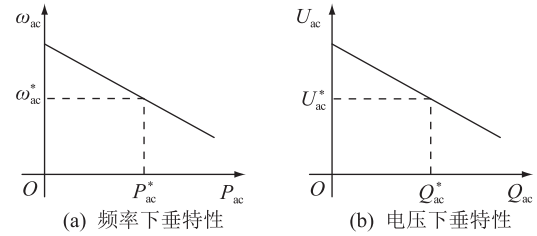


图 2 交流配电网频率和电压下垂特性

Fig.2 Frequency and voltage droop characteristics of AC microgrid

$$\omega_{ac} = \omega_{ac}^* + k_{pac}(P_{ac}^* - P_{ac}) \quad (1)$$

$$U_{ac} = U_{ac}^* + k_{qac}(Q_{ac}^* - Q_{ac}) \quad (2)$$

式中: ω_{ac} 为电网测量角频率; ω_{ac}^* 为电网额定角频率; P_{ac}^* 为额定频率下有功基准; P_{ac} 为向电网输出有功; U_{ac} 为电网测量电压; U_{ac}^* 为电网额定电压; Q_{ac}^* 为额定电压下输出无功基准; Q_{ac} 为电网输出无功; k_{pac} 、 k_{qac} 分别为有功-频率下垂系数和无功-电压下垂系数。

1.3 直流配电网下垂控制

直流配电网内元件的控制也可分为 2 类。由于不存在无功功率的传输,对于功率节点,可采用定有功功率的控制方式;对于平衡节点,可采用直流电压与有功功率间的下垂控制,其下垂特性如图 3 所示,表达式如式(3)所示。

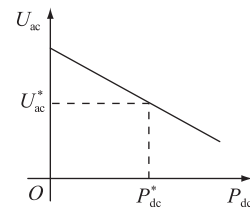


图 3 直流配电网电压下垂特性

Fig.3 Voltage droop characteristics of DC microgrid

$$U_{dc} = U_{dc}^* + k_{dc}(P_{dc}^* - P_{dc}) \quad (3)$$

式中: U_{dc} 为直流电网测量电压; U_{dc}^* 为直流电网额定电压; P_{dc}^* 为额定直流电压下输出有功基准; P_{dc} 为向直流电网输出有功; k_{dc} 为有功-直流电压下垂系数。

2 MMILC 平均值模型及其两级式下垂控制策略

2.1 MMILC 平均值模型

图 4 为连接交流配网与直流配网的 MMILC 一个相单元的拓扑。与传统三相 AC/DC 换流器相比,MMILC 每个相单元包括 2 个桥臂,每个桥臂包含 N 个子模块 SM、桥臂电阻 R_a 和桥臂电感 L_a, L_l 为

变压器等效电感。直流侧直接连接直流母线,没有并联电容器组。其中, i_{vx} 为交流侧电流; i_{Px} 为上桥臂电流; i_{Nx} 为下桥臂电流; u_{Px} 、 u_{Nx} 分别为上桥臂、下桥臂等效可控电压源; i_{CPx} 、 i_{CNx} 分别为上桥臂、下桥臂可控电流源; C_{eq} 为等效电容; u_{CPx} 、 u_{CNx} 分别为上桥臂、下桥臂串联子模块 C_{eq} 的电压; U_{dc} 、 U_{ac} 分别为直流侧和交流侧电压; i_{difx} 为桥臂内部环流电流; $x = a, b, c$,分别代表 A、B、C 三相。

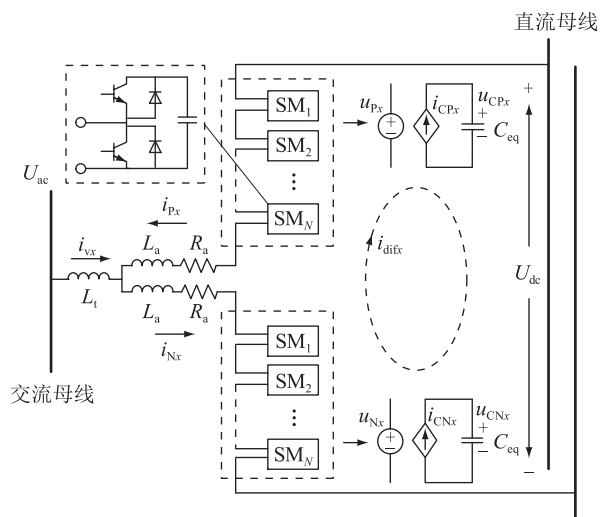


图4 MMILC 相单元拓扑

Fig.4 Phase unit topology of MMILC

为了描述交直流两侧功率波动与子模块电容能量的关系,建立 MMILC 桥臂的平均值模型。以上桥臂为例,串联子模块可等效为 u_{Px} ;串联子模块的电容的投入切除可等效为 i_{CPx} 与 C_{eq} 的充放电回路^[18],各变量的关系为:

$$u_{Px} = m_{Px} u_{CPx} \quad (4)$$

$$C_{eq} \frac{du_{CPx}}{dt} = m_{Px} i_{Px} \quad (5)$$

式中: m_{Px} 为上桥臂 x 相参考信号的调制比; $C_{eq} = C/N$, C 为单个子模块电容。

下桥臂各变量的关系与式(4)和式(5)类似。

以 A 相为例,忽略二倍频及更高次谐波,串联子模块电容电压可表示为:

$$u_{CPa} = u_{CP0} + u_{CP1} \cos(\omega_0 t + \theta_{CP}) \quad (6)$$

$$u_{CNa} = u_{CP0} - u_{CP1} \cos(\omega_0 t + \theta_{CP}) \quad (7)$$

式中: u_{CP0} 、 u_{CP1} 分别为上桥臂串联子模块电容电压直流分量和基频分量幅值; ω_0 为额定角频率; θ_{CP} 为基频分量初相位。

MMILC 内部环流数学模型如式(8)所示:

$$L_a \frac{di_{difx}}{dt} = -R_a i_{difx} + \frac{1}{2}(m_P v_{CP} + m_N v_{CN}) - \frac{U_{dc}}{2} \quad (8)$$

MMILC 交流侧电流数学模型如式(9)所示:

$$L_a \frac{di_{vx}}{dt} = 2v_x - R_a i_{vx} + m_P v_{CP} - m_N v_{CN} \quad (9)$$

式中: m_P 、 m_N 分别为上桥臂、下桥臂调制信号; v_{CP} 、 v_{CN} 分别为上桥臂、下桥臂串联子模块等效电容电压; v_x 为交流母线电压; R_a 为桥臂电阻。

式(4)一式(9)构成了三相坐标系下 MMILC 的平均值模型。由于控制器设计简单,电流响应迅速且不会造成阀过流,MMILC 的控制系统一般采用同步 dq 坐标系下的闭环比例积分 (proportional integral, PI) 控制,这里须要将三相坐标系下的 MMILC 的平均值模型变换至同步 dq 坐标系中,具体变换过程可参照文献[19],变换后的 MMILC 内部环流直流分量和串联子模块等效电容电压直流分量的微分动态方程如式(10)和式(11)所示。由于其他状态变量的微分动态方程与交直流侧间的下垂特性的推导无关,故不在此列出。

$$L_a \frac{di_{dif0}}{dt} = \frac{u_{CP0}}{2} - \frac{m_d u_{CPd}}{4} - \frac{m_q u_{CPq}}{4} - R_a i_{dif0} - \frac{U_{dc}}{2} \quad (10)$$

$$C_{eq} \frac{du_{CP0}}{dt} = -\frac{i_{dif0}}{2} + \frac{m_{d2} i_{difd2}}{4} + \frac{m_{q2} i_{difq2}}{4} + \frac{m_d i_{vd}}{8} + \frac{m_q i_{vq}}{8} \quad (11)$$

式中: i_{dif0} 、 i_{difd2} 、 i_{difq2} 分别为桥臂内部环流的直流分量、二倍频 d 轴分量、二倍频 q 轴分量,且满足直流侧电流 $i_{dc} = 3i_{dif0}$; u_{CP0} 、 u_{CPd} 、 u_{CPq} 分别为上桥臂串联子模块电容电压直流分量、基频 d 轴分量、基频 q 轴分量; m_d 、 m_q 、 m_{d2} 、 m_{q2} 分别为基频调制信号 d 、 q 轴分量和二倍频调制信号 d 、 q 轴分量; i_{vd} 、 i_{vq} 分别为交流侧电流 d 、 q 轴分量。

考虑到 MMILC 稳态运行情况下,桥臂二倍频环流由桥臂环流控制器进行抑制,可认为 $i_{difd2} = 0$, $i_{difq2} = 0$,则式(11)可简化为:

$$C_{eq} \frac{du_{CP0}}{dt} = -\frac{i_{dif0}}{2} + \frac{m_d i_{vd}}{8} + \frac{m_q i_{vq}}{8} \quad (12)$$

值得注意的是,MMILC 平均值模型是基于半桥子模块结构建立的^[20],但在交直流互联的正常运行工况下,子模块无须输出负电压,模型同样适用于全桥子模块结构的 MMILC。因此,文中提出的下垂控制策略适用于半桥和全桥子模块结构 MMILC。

2.2 MMILC 两级式下垂控制策略

由于没有直流侧并联电容组,交直流侧功率波动会直接影响桥臂子模块电容的能量波动。首先考虑 MMILC 的 A 相相单元上下桥臂子模块电容储存的能量为:

$$W_{\varphi a} = \frac{1}{2} C_{eq} (u_{CPa}^2 + u_{CNa}^2) \quad (13)$$

将式(6)和式(7)代入式(13)可得:

$$W_{\varphi a} = C_{eq} u_{CP0}^2 + 0.5 C_{eq} u_{CP1}^2 [1 + \cos(2(\omega_0 t + \theta_{CP}))] \quad (14)$$

类似地可以列写出 B 相和 C 相相单元的桥臂子模块电容储存能量,则 MMILC 三相桥臂子模块电容总储存能量为:

$$W_{\varphi abc} = 1.5 C_{eq} (2u_{CP0}^2 + u_{CP1}^2) \quad (15)$$

注意到稳态运行状况下 u_{CP1}^2 远小于 u_{CP0}^2 ,同时为了简化下垂特性设计,式(15)可以简化为:

$$W_{\varphi abc} = 3 C_{eq} u_{CP0}^2 \quad (16)$$

当交直流侧发生功率波动时,两侧功率差 ΔP 即为三相桥臂子模块电容总能量的波动,有:

$$\frac{dW_{\varphi abc}}{dt} = 3 C_{eq} \frac{du_{CP0}^2}{dt} = \Delta P \quad (17)$$

同时,考虑式(1)所示交流侧配电网的下垂特性,可以得到:

$$\omega_{ac}^* - \omega_{ac} = k_{pac} \Delta P \quad (18)$$

其中, $\Delta P = P_{ac} - P_{ac}^*$ 。

根据式(17)和式(18),使用前向欧拉逼近法^[21]可以得到新型的 MMILC 桥臂等效子模块电容电压与交流侧频率间的下垂特性,如式(19)所示。

$$\omega_{ac}^* - \omega_{ac} = k_H [(u_{CP0}^*)^2 - u_{CP0}^2] \quad (19)$$

式中: $k_H = 3 C_{eq} k_{pac} / T_s$; T_s 为采样时间。式(19)所示交直流侧下垂特性曲线如图 5 所示。 δ_{UCP0} 、 $\delta_{\omega ac}$ 分别为桥臂等效子模块电容电压和角频率的死区边界,设置死区是为了防止 MMILC 在轻载状态下频繁切换运行方式造成额外的功率损耗; U_{shed} 、 ω_{shed} 分别为允许运行的最低桥臂等效子模块电容电压和交流配电网角频率。当 $u_{CP0} < U_{shed}$ 时,说明直流配电网处于过载状态,MMILC 不能再向交流配电网输送有功功率;当 $\omega_{ac} < \omega_{shed}$ 时,说明交流配电网处于过载状态,MMILC 不能再向直流配电网输送有功功率;当 $u_{CP0} < U_{shed}$ 且 $\omega_{ac} < \omega_{shed}$ 时,说明交直流配网同时过载,此时 MMILC 应该闭锁,不传输任何有功功率。

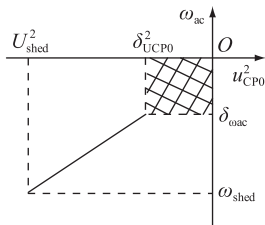


图 5 MMILC 交直流侧下垂特性

Fig.5 AC-DC droop characteristic of MMILC

这里要注意的是,式(19)所得到的为串联等效

子模块电容电压与交流侧频率间的下垂特性,实际上,串联等效子模块电容电压与直流电压并不完全相等,为了描述直流侧电压与桥臂等效子模块电容电压的关系,稳态运行情况下将式(10)微分项置零,可得:

$$u_{CP0} = \frac{m_d u_{CPd}}{2} + \frac{m_q u_{CPq}}{2} + 2R_a i_{di0} + U_{dc} \quad (20)$$

将式(20)代入式(19)可得直流电压与交流侧频率的下垂特性。

由于 MMILC 不是使用简单的频率或直流电压控制,而是有功/无功功率控制,为了将式(19)所表示下垂特性应用至 MMILC 的功率控制中,MMILC 交直流侧下垂特性的输出应馈入式(1)所示的有功功率-频率的交流侧下垂特性中和式(3)所示的有功功率-直流电压的直流侧下垂特性中。式(19)所输出的交流侧频率参考值 ω_{acref} 作为有功功率-频率的下垂特性的频率基准值,所输出的等效串联子模块电容电压的参考值 u_{CP0ref} 经过式(20)变换可得直流侧电压的参考值 U_{dcref} ,可作为有功功率-直流电压的下垂特性的直流电压基准值。综上,可以得到 MMILC 的下垂控制原理如图 6 所示,其中, θ_{pll} 为锁相角; P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功功率参考值和无功功率参考值; U_{acref} 为交流电压参考值; I_{dref} 、 I_{qref} 分别为内环电流 d 、 q 分量参考值; U_d 、 U_q 分别为交流母线电压 d 、 q 分量。

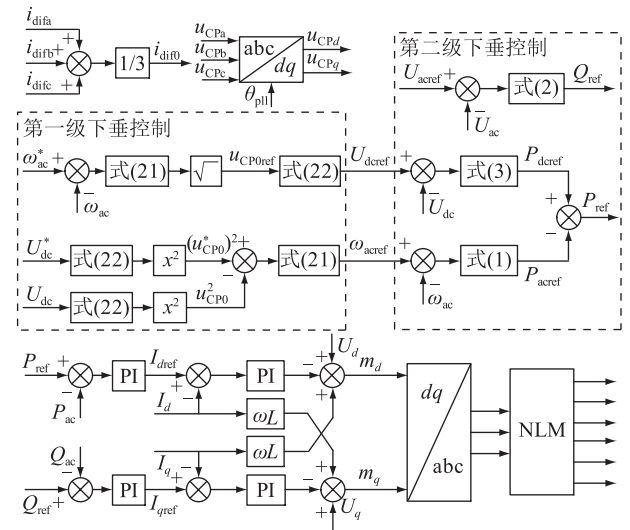


图 6 MMILC 两级式下垂控制原理

Fig.6 Principle of two-stage droop control for MMILC

由图 6 可见,MMILC 应用了两级下垂控制策略,第一级为文中所提出的 MMILC 交直流侧下垂特性,该特性可根据交流侧频率偏差或直流侧电压偏差得到相应的直流侧电压或交流侧频率的参考值;

第二级为传统的有功功率与电网频率或直流电压间的下垂特性,将上一级下垂控制输出的频率和直流电压的参考值作为新的基准值,可分别得到交流侧和直流侧的功率参考值,二者作差即可得到 MMILC 的有功功率参考值。对于无功功率,由无功功率与电网测量电压间下垂特性即可得到其参考值。在得到有功和无功参考值后,采用功率和电流闭环 PI 控制即可得到 MMILC 输出参考电压,经过调制环节后可得每个相单元上下桥臂各子模块的开关信号,触发环节采用最近电平逼近调制 (nearest level modulation, NLM) [22]。

须注意的是,在交流侧或直流侧发生暂态接地故障时,故障点会出现极大的功率缺额,受交流侧和直流侧平衡节点下垂特性影响,交流侧频率或直流侧电压会大幅降低甚至崩溃。为了防止频率或直流电压崩溃,交流侧平衡节点应转换为定频率控制或限制电流控制方式;直流侧平衡节点应转换为定电压控制方式;MMILC 应视故障位置切换至定频率或定直流电压控制方式,在故障切除后,恢复下垂控制。单纯的 MMILC 下垂控制不能限制故障的发展,难以提升系统的暂态稳定性,具有一定的局限性。对于 MMILC 故障情况下控制模式的切换仍待进一步研究。

3 仿真案例

3.1 仿真模型拓扑和参数

为了验证所提 MMILC 的下垂控制策略的有效性,文中在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中建立了孤岛模式下以 MMILC 互联的交直流混合配电网的控制模型,如图 7 所示。为了简化分析,交流配电网内的平衡节点采用一个下垂控制的交流微源进行简化,功率节点采用纯电阻进行等效,其中 U_s 为交流源电压; L_s 、 R_s 分别为平衡节点交流微源等效电感和电阻; P_{acs}^* 、 Q_{acs}^* 分别为交流侧平衡节点输出有功和无功功率; P_{acs}^* 、 Q_{acs}^* 分别为交流侧平衡节点输出有功和无功参考值; R_p 为可变电阻; P_{acp} 为交流侧功率节点输出有功功率。直流配电网内的平衡节点采用一个下垂控制的直流微源进行简化,功率节点采用一个双闭环 PI 控制的直流微源进行等效。其中, L_{dcs} 为直流侧平衡节点等效电感; P_{dcs} 、 P_{dcs}^* 分别为直流侧平衡节点输出有功测量值及其参考值; L_{dep} 为直流侧功率节点等效电感; P_{dep} 、 P_{dep}^* 分别为直流侧功率节点输出有功测量值及其参考值; P_{llc} 为 MMILC 向交流侧供给有功功率。各微源以及 MMILC 具体电路和控制参数分别如表 1 和表 2 所示。

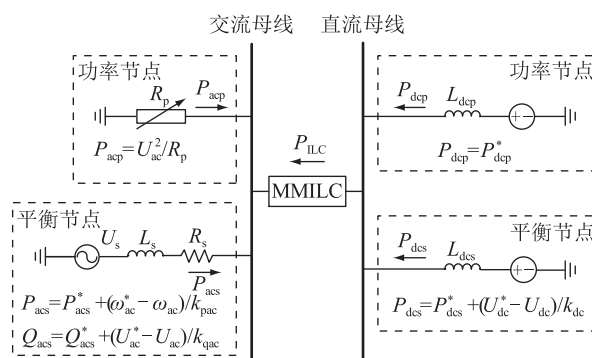


图 7 孤岛模式下以 MMILC 互联的交直流混合配电网简化拓扑

Fig.7 Simplified topology of hybrid AC/DC microgrid with MMILC in islanding mode

表 1 交直流混合配电网电路和控制参数
Table 1 Circuit and control parameters of hybrid AC/DC microgrid

节点	参数	数值
交流侧 平衡节点	交流额定电压/V	380
	交流额定角频率/(rad·s ⁻¹)	314.16
	额定容量/(kV·A)	400
	有功参考值 P_{acs}^* /kW	0
	无功参考值 Q_{acs}^* /kvar	0
	下垂系数 k_{pac}	0.02
	下垂系数 k_{qac}	0.02
交流侧 功率节点	额定容量/(kV·A)	200
	可变电阻 R_p/Ω	722
直流侧 平衡节点	直流额定电压/V	700
	额定容量/(kV·A)	400
	有功参考值 P_{dcs}^* /kW	0
	等效电感 L_{dcs} /mH	20
	下垂系数 k_{dc}	0.05
直流侧 功率节点	额定容量/(kV·A)	200
	等效电感 L_{dep} /mH	20
	功率外环比例(积分)参数	1(0.02)
	电流内环比例(积分)参数	1(0.01)

表 2 MMILC 电路和控制参数

Table 2 Circuit and control parameters of MMILC

参数	数值
额定容量/(MV·A)	400
换流变压器等效漏抗 L_l /mH	10
桥臂电感 L_a /mH	24
桥臂电阻 R_a/Ω	0.5
桥臂子模块数量	140
桥臂子模块电容/ μ F	20 000
功率外环比例(积分)参数	1(0.02)
电流内环比例(积分)参数	4.4(0.01)
环流抑制比例(积分)参数	4.8(0.01)
锁相环比例(积分)参数	200(1 000)

3.2 不同负载模式下 MMILC 控制性能

为了验证所提出的 MMILC 下垂控制策略在不同负载模式下的控制性能,分别测试了 4 种负载模式下 MMILC 对两侧配电网的功率支持情况,如图 8 所示。

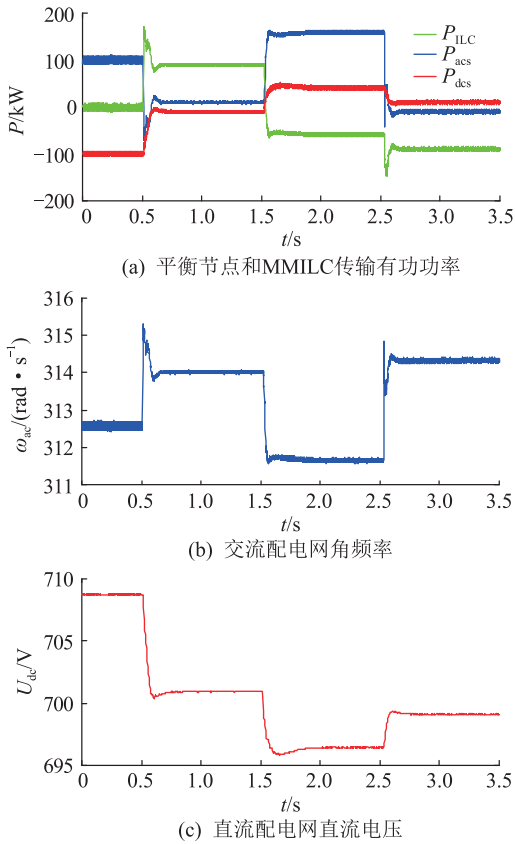


图 8 不同负载模式下交直流混合配电网的动态响应

Fig.8 Dynamic response of the hybrid AC/DC microgrid under different load profiles

当 $t < 0.5$ s 时,直流侧功率节点输出功率设定为 $P_{dep} = 100$ kW,交流侧功率节点输出功率设定为 $P_{acp} = -100$ kW,MMILC 处于待机状态, $P_{ILC} = 0$ 。此时,为了分别平衡交直流配电网内的功率差额,直流侧平衡节点输出功率为 $P_{dcs} = -100$ kW,交流侧平衡节点输出功率为 $P_{acs} = 100$ kW。结合交直流侧平衡节点的输出功率,根据式(1)和式(3)计算得到交流侧角频率为 $\omega_{ac} = 0.995\omega_{ac}^*$,直流侧电压为 $U_{dc} = 1.0125U_{dc}^*$ 。图 8 所示交流侧频率和直流侧电压与理论计算值一致,验证了交直流两侧平衡节点下垂特性的正确性。

当 $t = 0.5$ s 时,MMILC 启动运行,文中所提出的 MMILC 下垂控制策略自动将直流侧盈余功率向交流侧补偿,以维持交流频率和电压稳定。此时,直流侧有功充足,直流电压高于额定值,交流侧缺少有功,交流频率低于额定值,MMILC 依据交直流侧下垂特性重新生成新的交流频率和直流电压参考

值以平衡两侧功率差额,进而计算出 MMILC 的功率参考值。由图 8 分析可知, $P_{ILC} = 90$ kW,直流侧多余有功通过 MMILC 向交流侧补充,交流侧频率恢复至 $\omega_{ac} = 0.9995\omega_{ac}^*$,直流侧电压降低为 $U_{dc} = 1.00125U_{dc}^*$ 。

当 $t = 1.5$ s 时,直流侧功率节点输出功率降低至 $P_{dep} = -100$ kW,交流侧功率节点输出功率保持不变,为 $P_{acp} = -100$ kW。此时,直流侧和交流侧有功均出现功率差额,但两侧网络并未过载,受交直流侧下垂特性的影响,交流侧仍可供给少部分有功至直流侧,以补偿直流侧的有功缺失。由于整个系统的功率差额升高,交流侧和直流侧平衡节点输出功率均增加,交流侧频率和直流侧电压均降低。由图 8 可见,MMILC 调整功率为 $P_{ILC} = -60$ kW,交流侧频率下降至 $\omega_{ac} = 0.992\omega_{ac}^*$,直流侧电压降低至 $U_{dc} = 0.995U_{dc}^*$ 。

当 $t = 2.5$ s 时,交流侧功率节点输出功率升高至 $P_{acp} = 100$ kW,直流侧功率节点输出功率保持不变,为 $P_{dep} = -100$ kW。此时,交流侧有功盈余,大部分有功通过 MMILC 馈入直流侧,交流侧和直流侧平衡节点有功功率输出降低,交流侧频率和直流侧电压均有所恢复并保持稳定。由图 8 可见,MMILC 调整功率为 $P_{ILC} = -90$ kW,交流侧频率升高至 $\omega_{ac} = 1.0005\omega_{ac}^*$,直流侧电压升高为 $U_{dc} = 0.99875U_{dc}^*$ 。

综上,MMILC 在所提下垂控制策略中可以自动平衡不同负载模式下交直流侧配网的功率偏差,维持交流侧频率和直流侧电压的稳定,验证了不同负载模式下 MMILC 良好的稳态和暂态控制性能。

3.3 过载情况下 MMILC 控制性能

为了验证交流、直流配网分别处于过载情况下 MMILC 的控制性能,分别测试了交流配电网过载、直流配电网过载情况下 MMILC 的功率支持情况。这里设定允许运行的最低桥臂等效子模块电容电压 $U_{shed} = 0.97U_{dc}^*$,最低交流频率 $\omega_{shed} = 0.99\omega_{ac}^*$ 。

3.3.1 交流侧过载情况下 MMILC 控制性能

当 $t < 1$ s 时,直流侧功率节点输出功率设定为 $P_{dep} = 200$ kW,交流侧功率节点输出功率设定为 $P_{acp} = -300$ kW,处于过载状态,MMILC 启动运行。此时,由于直流侧功率盈余,根据下垂特性盈余功率通过 MMILC 向交流侧供给,交流侧频率并未跌落至最低频率以下,直流侧电压也在额定值附近,如图 9 所示。MMILC 处于正常运行状态。

当 $t = 1$ s 时,直流侧功率节点输出功率由 $P_{dep} = 200$ kW 阶跃至 $P_{dep} = 0$,交流侧功率节点输出功率保持 $P_{acp} = -300$ kW 不变。如图 9 所示,此时,交流

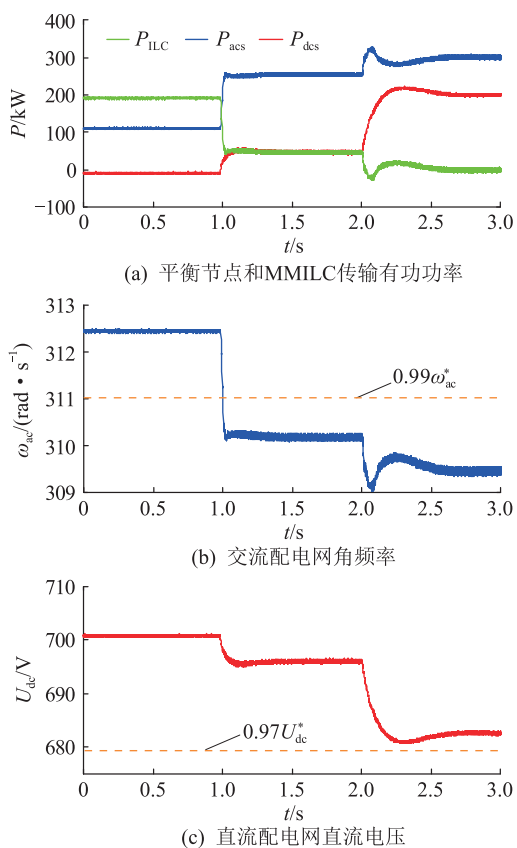


图9 交流过载情况下交直流混合配电网的动态响应
Fig.9 Dynamic response of the hybrid AC/DC microgrid under overload in AC grid

侧配电网已有较大的功率缺额,导致交流频率跌落至允许最低值以下,直流侧没有盈余功率,但根据MMILC下垂特性,系统仍允许小部分有功向交流侧供给, $P_{ILC} > 0$,MMILC仍正常运行,并未闭锁。

当 $t = 2\text{ s}$ 时,直流侧功率节点输出功率由 $P_{dep} = 0$ 阶跃至 $P_{dep} = -200\text{ kW}$,交流侧功率节点输出功率保持 $P_{acp} = -300\text{ kW}$ 不变。如图9所示,此时直流侧配电网也有了较大的功率缺额,直流电压大幅下降,但仍在允许运行范围内,导致无法继续向交流侧供给有功,交流频率进一步下跌,系统触发了交流侧过载条件,MMILC传输功率降为0,MMILC转换为闭锁状态。

3.3.2 直流侧过载情况下MMILC控制性能

当 $t < 1\text{ s}$ 时,直流侧功率节点输出功率设定为 $P_{dep} = -300\text{ kW}$,处于过载状态,交流侧功率节点输出功率设定为 $P_{acp} = 0$,MMILC启动运行。如图10所示,此时交流侧无负载,根据下垂特性部分功率由交流侧平衡节点通过MMILC向直流侧供给, $P_{acs} = 160\text{ kW}$,部分功率由直流侧平衡节点向直流负载供给, $P_{dcs} = 140\text{ kW}$ 。交流频率和直流电压都低于额定值,但均在允许运行范围内。

当 $t = 1\text{ s}$ 时,直流侧功率节点输出功率保持

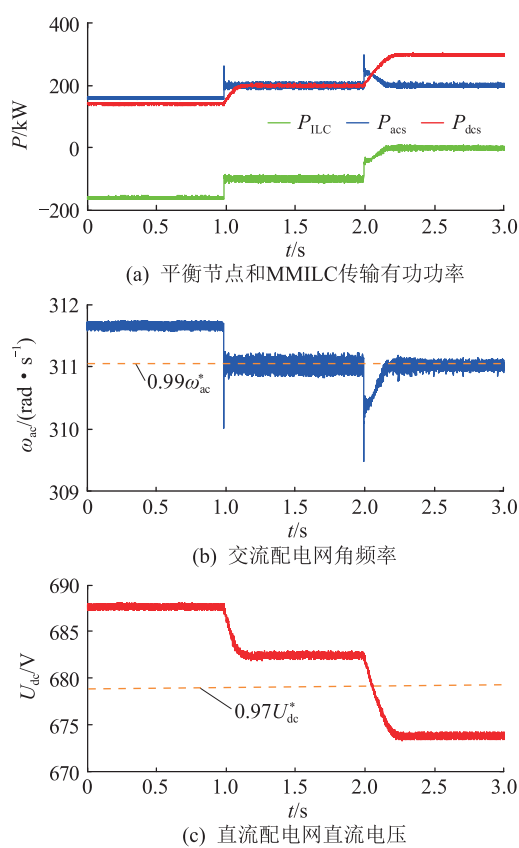


图10 直流过载情况下交直流混合配电网的动态响应
Fig.10 Dynamic response of the hybrid AC/DC microgrid under overload in DC grid

$P_{dep} = -300\text{ kW}$ 不变,交流侧功率节点输出功率由 $P_{acp} = 0$ 阶跃至 $P_{acp} = -100\text{ kW}$ 。如图10所示,交流侧平衡节点输出功率升高至 $P_{acs} = 200\text{ kW}$,而由于交流侧负载升高影响,MMILC向直流侧输送有功降低至 $P_{ILC} = -100\text{ kW}$,进而使得直流侧平衡节点输出功率升高至 $P_{dcs} = 200\text{ kW}$ 。整个交直流网络功率缺额加重,交流频率和直流电压下降,但仍在允许运行范围内。

当 $t = 2\text{ s}$ 时,直流侧功率节点输出功率保持 $P_{dep} = -300\text{ kW}$ 不变,交流侧功率节点输出功率由 $P_{acp} = -100\text{ kW}$ 阶跃至 $P_{acp} = -200\text{ kW}$ 。如图10所示,此时交流侧功率缺额进一步加重,交流频率也接近允许运行范围的下限,已无法继续向直流侧补偿有功,而直流侧负载由于没有足够的功率供给,导致直流电压进一步下跌,系统触发了直流侧过载条件,MMILC传输功率降为0,MMILC转换为闭锁状态。

综上,在交流侧过载和直流侧过载的情况下,当交流侧频率或直流侧电压跌落至最小允许值以下时,所提下垂控制策略均能正确触发过载条件使得MMILC闭锁,从而将两侧网络隔离运行。

4 结语

针对孤岛情况下传统两级式下垂控制不能适用于 MMILC 的问题,文中通过构建交直流两侧功率波动和桥臂子模块电容能量波动的关系,推导得出一种适用于 MMILC 的新型统一下垂特性,建立了完整的两级式下垂控制策略。文中完善了孤岛模式下 MMILC 的控制策略,有助于推动 MMILC 在交直流混合配网中的应用,同时也为孤岛模式下其他具有子模块结构的 ILC 下垂控制设计提供了参考。

(1) 该控制策略给出了 MMILC 直流侧电压与等效子模块电容电压间的数学关系,结合新型统一下垂特性使 MMILC 仍可通过直流电压偏差进行功率调节,同时设置了下垂特性曲线的死区和最低允许运行范围,使 MMILC 在系统过载情况下可瞬时闭锁功率传输,维持整个混合配电网的稳定运行。

(2) 仿真结果表明所提出的 MMILC 两级式下垂控制策略可以自动平衡不同负载模式下交直流侧配网的功率偏差;当交流侧频率或直流侧电压下降超过运行允许最低值时,MMILC 可以瞬时闭锁功率传输,维持了交流频率和直流电压的稳定性,验证了 MMILC 两级式下垂控制策略的正确性和有效性。

(3) 暂态故障情况下所提出的 MMILC 下垂控制策略不能有效限制故障的发展,难以提升系统的暂态稳定性,具有一定的局限性,因此须切换至其他控制模式来维持故障状态下的频率或电压稳定。MMILC 暂态故障情况下的控制方式及其切换问题仍有待进一步研究。

参考文献:

- [1] EAJAL A A, ABDELWAHED M A, EL-SAADANY E F, et al. A unified approach to the power flow analysis of AC/DC hybrid microgrids [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1145-1158.
- [2] NEJABATKHAH F, LI Y W. Overview of power management strategies of hybrid AC/DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 7072-7089.
- [3] DRAGICEVIC T, LU X N, VASQUEZ J C, et al. DC microgrids—part II: a review of power architectures, applications, and standardization issues [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3528-3549.
- [4] 丁明, 史盛亮, 刘新宇, 等. 交直流混合微网优化配置研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 17-25.
DING Ming, SHI Shengliang, LIU Xinyu, et al. Study of optimal configuration of a hybrid AC/DC microgrid [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 17-25.
- [5] 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.
- [6] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—a general approach toward standardization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [7] LOH P C, LI D, CHAI Y K, et al. Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2214-2223.
- [8] LOH P C, LI D, CHAI Y K, et al. Autonomous control of interlinking converter with energy storage in hybrid AC-DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(3): 1374-1382.
- [9] 谢文超, 朱永强, 杜少飞, 等. 交直流混合微电网中互联变流器功率控制 [J]. 电力建设, 2016, 37(10): 9-15.
XIE Wenchao, ZHU Yongqiang, DU Shaofei, et al. Power control of interlinking converter in AC/DC hybrid microgrid [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(10): 9-15.
- [10] 张国荣, 丁晓通, 彭勃, 等. 交直流混合微电网互联变流器改进控制策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 50-58.
ZHANG Guorong, DING Xiaotong, PENG Bo, et al. Improved control strategy for an AC/DC hybrid microgrid interlinking converter [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 50-58.
- [11] 刘佳易. 交直流混合微电网中双向 AC/DC 功率变换器控制策略研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
LIU Jiayi. Research on the control method of interlink-converter in hybrid microgrid [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.
- [12] EGHTEADARPOUR N, FARJAH E. Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1494-1505.
- [13] 贾利虎, 朱永强, 杜少飞, 等. 交直流微电网互联变流器控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 98-104.
JIA Lihu, ZHU Yongqiang, DU Shaofei, et al. Control strategy of interlinked converter for AC/DC microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 98-104.
- [14] 朱永强, 张泉, 刘康, 等. 交直流混合微电网互联变流器新型控制策略 [J]. 电力建设, 2019, 40(11): 48-54.
ZHU Yongqiang, ZHANG Quan, LIU Kang, et al. A new control strategy of interlinking converter in hybrid AC/DC microgrid [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(11): 48-54.
- [15] PEREZ M A, BERNET S, RODRIGUEZ J, et al. Circuit topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 4-17.
- [16] 张怀天, 荆龙, 吴学智, 等. 用于交直流配电网的模块化多电平换流器分序补偿控制策略 [J]. 电网技术, 2018, 42(1): 254-261.
ZHANG Huaitian, JING Long, WU Xuezhi, et al. Sequence de-

- composition and compensation control strategy of MMC for AC and DC distribution network [J]. Power System Technology, 2018, 42(1):254-261.
- [17] 黄春霞, 李晓英. 基于 MMC 互连的交直流混合微电网中 MSI 与 MMC 环流分析[J]. 电子设计工程, 2017, 25(10): 114-119.
HUANG Chunxia, LI Xiaoying. Circulating Current analysis of micro source inverter and MMC of a hybrid AC/DC micro-grid connected by MMC[J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(10):114-119.
- [18] JAMSHIDIFAR A, JOVCIC D. Small-signal dynamic DQ model of modular multilevel converter for system studies [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1):191-199.
- [19] 李正, 郝全睿, 尹晓东, 等. 模块化多电平换流器的降阶小信号模型研究 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3638-3650, 24.
LI Zheng, HAO Quanrui, YIN Xiaodong, et al. Research on reduced-order small-signal model of modular multilevel converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12):3638-3650, 24.
- [20] LUDOIS D C, VENKATARAMANAN G. Simplified terminal behavioral model for a modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4):1622-1631.
- [21] DU C, AGNEHOLM E, OLSSON G. Comparison of different frequency controllers for a VSC-HVDC supplied system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4):2224-2232.
- [22] 管敏渊, 徐政, 屠卿瑞, 等. 模块化多电平换流器型直流输电的调制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2):48-52.
GUAN Minyuan, XU Zheng, TU Qingrui, et al. Nearest level modulation for modular multilevel converters in HVDC transmission [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2):48-52.

作者简介:



王舒炜

王舒炜(1997),女,硕士在读,研究方向为新能源并网技术(E-mail: 826639499@qq.com);

苏建军(1962),男,学士,研究员级高级工程师,从事电力系统运行与控制相关工作;

刘洋(1988),男,博士,高级工程师,从事配电网运行控制与仿真技术相关工作。

Droop control strategy of MMILC based on energy fluctuation in sub-module capacitor

WANG Shuwei¹, SU Jianjun^{1,2}, LIU Yang³

(1. School of Electric and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China;

3. State Grid Shandong Electric Power Company Research Institute, Jinan 250003, China)

Abstract: In hybrid AC/DC microgrid, interlinking converter (ILC) can balance power flow between AC and DC microgrid, thus stabilizing AC frequency and DC voltage in islanding mode. As a topology of ILC, modular multilevel interlinking converter (MMILC) has advantages of good harmonic characteristics, high quality waveforms and low switching loss. A two-stage droop control strategy for MMILC is proposed. Firstly, based on the energy fluctuation characteristics of the sub-module capacitance, a new unified droop characteristic of AC and DC side for MMILC is established. Then, a mathematical relation between DC voltage and equivalent sub-module capacitor voltage is given to adjust power reference according to deviation of dc voltage. Also the dead zone and an allowable minimum operation range of the droop characteristic are set. Finally, the control performance of MMILC in different load profiles and overload conditions are simulated. The simulation results show that the proposed two-stage droop control strategy of MMILC can automatically compensate the power to both AC/DC sides in different load profiles. Under overload conditions, MMILC can instantaneous block the active power transmission, which validates the correctness and availability of the control strategy.

Keywords: hybrid AC/DC microgrid; modular multilevel interlinking converter (MMILC); unified droop characteristics; droop control strategy; islanding mode; power balance

(编辑 钱悦)