

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108179

孤岛模式下新型交直流混合微网互联变流器控制策略*

管东方 赵艳雷

(山东理工大学电气与电子工程学院 淄博 255000)

摘要: 为了实现孤岛模式下交直流子微网之间功率合理互助互济,提出了一种孤岛模式下的协调混合微网系统的功率分配策略。首先分析了微电网的拓扑结构得出了可表征功率传输参考值的特征量,并根据该特征量将系统方式运行方式分为 ILC 空闲控制段与 ILC 工作控制段,对运行阶段的切换条件进行了合理的设计;其次,设计了基于交流侧母线电压和直流侧电压反馈的功率反馈算法用以实现功率互济互助目标。最后,在 MATLAB 中搭建了仿真模型。仿真结果表明,利用所提的功率互助策略,交直流子微网能够根据自身条件承担系统的功率波动且保证系统整体的稳定运行,且仿真中 ILC 功率变化响应时间小于 50 ms,控制策略具有较高的动态响应。

关键词: 交直流混合微网;互联变流器;标么化;分段控制

中图分类号: TM732 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4051

Control strategy of new type AC/DC hybrid microgrid interconnected converter in island mode

Guan Dongfang Zhao Yanlei

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, china)

Abstract: In order to achieve power mutual benefit between AC and DC sub-microgrids in island mode, a power allocation method of coordinated hybrid microgrid system is proposed. Firstly, the topology of the microgrid structure is analyzed for gathering characteristic quantity which can represent the reference value of power transmission. In addition, the switching condition of the operation stage is designed reasonably according to the characteristic quantity, where the operating mode of the system is divided into the interlinking converter free control section and ILC working control section. Secondly, a power feedback algorithm based on AC side bus voltage and DC side voltage feedback is designed to achieve the power mutual benefit purpose. Finally, a simulation model is built in MATLAB Simulink. The simulation results show that the AC-DC sub-microgrid can bear the power fluctuation of the system according to its own conditions and ensure the overall stable operation of the system by using the power mutual benefit method proposed. Furthermore, the response time of ILC power change is less than 50 ms in the simulation, which indicates that the control strategy has a high dynamic response.

Keywords: AC/DC hybrid microgrid;interconnected converter;Per-Unit;segmented control

0 引言

伴随微电网技术的发展,能够有效整合和利用交直流两侧分布式能源,且同时可以实现更加灵活的功率流动和控制方式的交直流混合微网获得了广泛关注^[1-4]。其中连接交流子微网与直流子微网的双向 AC/DC 功率变换器^[5] ILC(interlinking converter)能够通过控制功率流动实现交直流两侧功率支撑,提高系统整体运行稳定性^[6]。

针对孤岛模式下的微电网,文献[7]分析了孤岛模式下

的交直流混合微网的 ILC 控制策略,通过交直流侧母线的偏差值确定 ILC 功率传输的参考值,并针对系统运行工况进行分段控制。文献[8]将交直流混合微网视为一个整合电源,通过交直流两侧功率关系确定功率传输的参考值,但功率传输过程中未设定功率传输阈值,在系统功率小范围波动时会频繁启停互联变流器,带来功率损耗。文献[9]提出一种混合微网分段协调控制策略,在可能出现的互联变流器频繁启停问题上设置了 ILC 动作阈值,但系统对 ILC 的通信带宽有较高要求。文献[10]提出基于标么化思想的

收稿日期:2021-10-25

* 基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0902800)、国家电网公司科技项目(52094017003D)资助

控制策略,将标么化交流母线频率与直流母线电压做差,并将该差值输入 PI 控制器中作为 ILC 功率传输的参考值,但并未考虑交直流两侧同时处于重载时向对侧传输功率易导致造成两侧电压剧烈波动,不利于系统的稳定运行。文献[11]提出了一种新型 ILC 控制策略,在功率控制环节采用电压偏差-功率下垂控制策略,实现子网的稳定运行,但文中未考虑在交直流两侧一侧重载,一侧轻载所导致的功率过度传输。

针对上述问题,本文提出了一种孤岛模式下的交直流混合微网分段控制策略,首先将交直流母线电压进行标么化,并建立起交流电压、直流电压与 ILC 传输功率之间的联系,并针对功率小范围波动问题,设置 ILC 启停阈值;其次,根据标么化后的交直流电压判据进行运行工作段判定,以系统整体稳定运行为首要条件,优先保证系统中功率差额或盈余量小的一侧稳定运行,实现功率分区控制,最后,通过仿真验证系统有效性。

1 交直流微网结构及子微网控制方式

1.1 交直流微网结构拓扑

交直流混合微网相较于传统的交流微网或直流微网,可以接入更多类型的分布式电源,并且其控制策略与功率流动方式也更加灵活^[12]。本文研究的交直流混合微网结构拓扑如图 1 所示,该混合微网由交流子网、直流子网和互联变流器 ILC 构成,其中交流子网由光伏、交流负荷以及储能系统构成^[13],直流子网由光伏、直流负荷以及储能构成^[14]。交流子网与直流子网通过 ILC 互联,实现功率的双向流动^[15]。

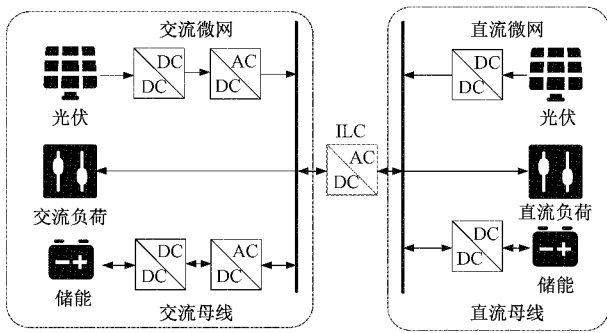


图 1 交直流混合微网结构拓扑

其中光伏通过最大功率点跟踪方式 MPPT(maximum power point tracking)控制或定电压下垂模式,充分利用微源的能量,储能系统通过荷电状态 SOC(state of charge)反应当前系统中剩余能量百分比,且储能系统还有平衡微源内电压与削峰填谷的作用,保证系统的稳定运行。交流负荷与直流负荷直接接入对应的交直流微网中,在必要情况下可对两侧非关键负荷进行投切,以确保微网的稳定运行。

1.2 交流微网下垂控制

图 1 中典型结构的交直流混合微网规模较小且电压等

级较低,线路一般呈现阻性,故传输线路与一般高压网络不同,继续使用 $P-f$ 下垂控制会产生有功与无功功率之间的强耦合,故应灵活设置交流微网中的逆变器的输出阻抗的性质,使之与线路传输阻抗特性一致该系统中的交流微网下垂控制如式(1)所示。

$$U_{ac} = m(P_{ac} - P_{ac}^*) + U_{ac_N} \quad (1)$$

式中: U_{ac} 表示交流微网母线电压, P_{ac} 表示交流微网当前功率, P_{ac}^* 表示交流微网额定功率, U_{ac_N} 表示交流微网额定电压, m 表示交流微网下垂系数,计算公式如式(2)所示。

$$m = \frac{P_{ac,max} - P_{ac,min}}{U_{ac,max} - U_{ac,min}} \quad (2)$$

式中: $U_{ac,max}$ 、 $U_{ac,min}$ 表示交流母线电压允许的最大值与最小值; $P_{ac,max}$ 、 $P_{ac,min}$ 表示交流母线功率允许的最大值与最小值。

1.3 直流子网下垂控制

相较于交流微网,直流微网无需考虑无功功率与频率问题,直流微网总体的下垂公式可表示为:

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

式中: U_{dc} 表示直流微网母线电压, P_{dc} 表示直流微网当前功率, P_{dc}^* 表示直流微网额定功率, U_{dc_N} 表示直流微网额定电压, n 表示直流微网下垂系数,计算公式如式(4)所示。

$$n = \frac{P_{dc,max} - P_{dc,min}}{U_{dc,max} - U_{dc,min}} \quad (4)$$

式中: $U_{dc,max}$ 、 $U_{dc,min}$ 为直流母线电压所允许的最大值与最小值; $P_{dc,max}$ 、 $P_{dc,min}$ 表示直流母线功率允许的最大值与最小值。

2 交直流混合微网分段控制策略

2.1 交直流微网下垂特性标么化

作为连接交、直流子网的互联变换器,ILC 本质上是一个双向 AC/DC 变换器。不同于传统双向变换器之处在于,该互联变换器两侧连接的是交、直流母线,该交直流互联变换器同时拥有孤岛模式下交直流子微网的下垂特性。由于交直流子微网的下垂特性中物理量的量纲不同,导致可以反应交直流微网中的特性参数:交直流母线电压不能放入同一坐标下进行比较,因此需要将交直流母线电压进行标么化,使得交直流微网中的特性参数为同一量纲,方便进行交直流互联变换器的控制。交直流母线电压标么化公式如式(5)、(6)所示。

$$U_{ac}^* = \frac{U_{ac} - 0.5(U_{ac,max} + U_{ac,min})}{0.5(U_{ac,max} - U_{ac,min})} \quad (5)$$

$$U_{dc}^* = \frac{U_{dc} - 0.5(U_{dc,max} + U_{dc,min})}{0.5(U_{dc,max} - U_{dc,min})} \quad (6)$$

式中: U_{ac}^* 为交流母线的标么值, U_{dc}^* 为直流母线电压的标么值。

将交直流母线电压标么化处理后量纲均变换为 1,利用式(5)、(6)将交直流母线进行标么化处理,混合微网运行区间分段如图 2 所示。

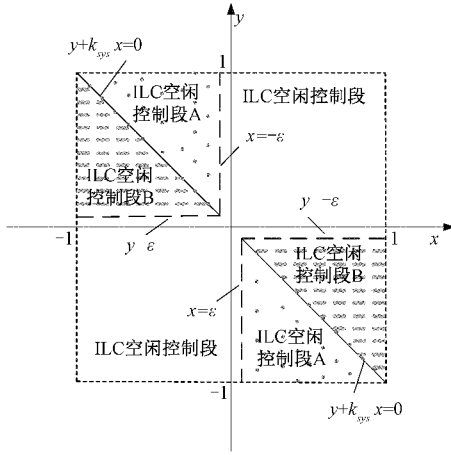


图2 ILC运行分段控制

将标么化后的交流母线电压标么值 U_{ac}^* 作为 x 轴, 标么化后的直流母线电压标么值 U_{dc}^* 作为 y 轴, 其中斜线 $y+k_{sys}x=0$ 代表交直流微网的功率互补线 $U_{ac}^* = -U_{dc}^*$, 本文为方便讨论令 $k_{sys}=1$ 。图中空白区域代表 ILC 空闲控制段, ILC 不输出功率; 图中点状和线段区域分别代表 ILC 工作控制段 A 与 ILC 工作控制段 B, 该区域中 ILC 向功率匮乏侧输出功率, 但控制段 A 与控制段 B 的控制模式有所区别, 具体区别在 2.3 节详细介绍。

2.2 ILC 空闲控制段

针对交直流混合微网, 首要的运行目标是保证微电网特征量的稳定。由于微网的运行状态变化复杂, 不能用单一的控制策略对所有运行工况进行调配。根据混合微网的特征量对运行工况进行判断, 并通过协调变流器 ILC 的控制方式使得混合微网在各个工况下稳定运行。本文通过互联变流器的工作模式将交直流混合微网的运行模式分为两段: ILC 空闲控制段与 ILC 工作控制段

ILC 空闲控制段对应两侧子网自治运行, ILC 不向两侧传输功率。在孤岛情况下空闲控制段划分如下。

1) 交直流子网特征值落在图 2 中的第 1 象限, 对应交直流子网都处于轻载工况, 基本不需要额外引入功率, ILC 处于待机状态能减少不必要的开关损耗。

2) 交直流子网特征值落在图 2 中的第 3 象限, 对应交直流子网都处在重载工况, ILC 若启动不仅会增加开关损耗, 而且势必会导致另一个子网的运行稳定性恶化。在该运行象限下, ILC 将处于空闲模式, 一方面减少了不必要的功率流动成本, 另一方面防止了重载情况较为严重的子网导致的功率不平衡, 降低系统的整体稳定性。

3) 交直流子网特征值落在图 2 中的第 2、4 象限, 对应交直流子网轻载和重载同时出现的工况。为防止交直流子网特征值的小幅波动导致的 ILC 频繁启动, 需要对轻、重载的情况进行阈值设定, 其中 ILC 启停的阈值在图 2 中表示为 ϵ , 当轻、重载情况一方的特征值低于所设定的阈值 ϵ 时,

为减小 ILC 的启动频次, ILC 仍然处于空闲控制段。只有当两侧的特征值都高于所设定的阈值 ϵ 时, ILC 启动, 进入工作控制段。

在 ILC 空闲控制段, 两侧的储能装置通过下垂控制控制交直流微网母线电压的稳定, 且储能装置采用闭环控制, 其交直流微网的下垂特性如下:

$$\begin{cases} U_{dc} = U'_{dc} - m_1 P_A \\ m_1 = \frac{U_{dc, \max} - U_{dc, \min}}{P_{A, \text{output}} - P_{A, \text{input}}} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} U_{ac} = U'_{ac} - m_2 P_B \\ m_2 = \frac{U_{ac, \max} - U_{ac, \min}}{P_{B, \text{output}} - P_{B, \text{input}}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: U_{ac} 、 U_{dc} 为交直流母线电压的实际值; U'_{ac} 、 U'_{dc} 代表交直流母线电压的额定值; m_1 、 m_2 分别表示两侧储能装置的下垂系数; P_A 、 P_B 分别表示两侧储能装置的输出功率; $U_{ac, \max}$ 、 $U_{dc, \max}$ 、 $U_{ac, \min}$ 、 $U_{dc, \min}$ 分别表示交直流微网两侧所能允许的母线电压最大最小值; $P_{A, \text{output}}$ 、 $P_{B, \text{output}}$ 、 $P_{A, \text{input}}$ 、 $P_{B, \text{input}}$ 分别表示交直流两侧储能的充电功率与放电功率。

2.3 ILC 工作控制段

ILC 工作控制段对应交直流子网一侧重载, 一侧轻载的情况, ILC 向重载侧传输功率, 实现两侧功率支撑。在孤岛模式下, 交直流微网母线电压波动较大, 为降低 ILC 频繁启动对母线电压的影响, 对 ILC 启动的阈值进行设定, 本文中设定的 ILC 阈值为 ϵ 。由于功率互助区间需要进行功率流动, 已知交直流两侧子网的端口特性方程为:

$$\begin{cases} P_{ac} = \frac{1}{m}(U_{acN} - U_{ac}) + P_{acN} \\ P_{dc} = \frac{1}{n}(U_{dcN} - U_{dc}) + P_{dcN} \end{cases} \quad (9)$$

式中: m 、 n 表示交直流微网整体的下垂系数; U_{acN} 、 U_{dcN} 表示交直流微网母线电压的额定值; P_{acN} 、 P_{dcN} 分别表示交直流子网的额定功率。

当 ILC 进行功率交换时, 交流微网根据综合功率下垂特性, 向直流子网发出功率, 交流子网的特征值下降, 直流子网的特征值升高, 交流子网增发或吸收的功率为直流子网吸收或增发的功率, 功率的平衡关系如下:

$$\Delta P_{ac} = P_{ac} - P_{acN} \quad (10)$$

$$\Delta P_{dc} = P_{dc} - P_{dcN} \quad (11)$$

$$\Delta P_{ac} = -\Delta P_{dc} \quad (12)$$

式中: ΔP_{ac} 表示交流子网增发或吸收的功率, ΔP_{dc} 表示直流子网增发或吸收的功率。

将式(5)、(6)、(9)分别代入式(10)、(11)中整理得到 ΔP_{ac} 、 ΔP_{dc} 与 U_{ac}^* 、 U_{dc}^* 的关系为:

$$\begin{cases} \Delta P_{ac} = \frac{1}{m} \left\{ 0.5(U_{ac, \max} - U_{ac, \min}) \cdot U_{ac}^* + \right. \\ \left. 0.5(U_{ac, \max} + U_{ac, \min}) - U_{acN} \right\} \\ \Delta P_{dc} = \frac{1}{n} \left\{ 0.5(U_{dc, \max} - U_{dc, \min}) \cdot U_{dc}^* + \right. \\ \left. 0.5(U_{dc, \max} + U_{dc, \min}) - U_{dcN} \right\} \end{cases} \quad (13)$$

由于 $U_{acN} = 0.5(U_{ac,max} + U_{ac,min})$, $U_{dcN} = 0.5(U_{dc,max} + U_{dc,min})$, 故式(9)可进一步改写为:

$$\begin{cases} \Delta P_{ac} = \frac{1}{m} \{0.5(U_{ac,max} - U_{ac,min}) \cdot U_{ac}^*\} \\ \Delta P_{dc} = \frac{1}{n} \{0.5(U_{dc,max} - U_{dc,min}) \cdot U_{dc}^*\} \end{cases} \quad (14)$$

假设交直流子网具有相同的额定值,并将额定值 K 定义为:

$$K = \frac{(U_{ac,max} - U_{ac,min})}{2m} = \frac{(U_{dc,max} - U_{dc,min})}{2n} \quad (15)$$

若交直流子网的盈余量与缺额量相同时,联立式(9)、(10)、(11)可知:

$$K \cdot U_{ac}^* + K \cdot U_{dc}^* = 0 \quad (16)$$

由式(16)可知,在交直流两侧负载稳定的情况下,需要对交直流两侧的特征值进行控制,为达到 $U_{ac}^* = -U_{dc}^*$ 理想的稳定状态,交直流两侧功率流动参考值如表 1 所示。

表 1 交直流子网两侧功率参考值

工况	U_{ac}^*	U_{dc}^*	功率方向	功率盈余	功率参考值
1	$U_{ac}^* > \epsilon$	$U_{dc}^* < -\epsilon$	AC→DC	$U_{ac}^* + U_{dc}^* > 0$	$P_{ILC} = -K \cdot U_{dc}^*$
2	$U_{ac}^* < -\epsilon$	$U_{dc}^* > \epsilon$	DC→AC	$U_{ac}^* + U_{dc}^* > 0$	$P_{ILC} = K \cdot U_{ac}^*$
3	$U_{ac}^* > \epsilon$	$U_{dc}^* < -\epsilon$	AC→DC	$U_{ac}^* + U_{dc}^* < 0$	$P_{ILC} = K \cdot U_{ac}^*$
4	$U_{ac}^* < -\epsilon$	$U_{dc}^* > \epsilon$	DC→AC	$U_{ac}^* + U_{dc}^* < 0$	$P_{ILC} = -K \cdot U_{dc}^*$

1)针对工况 1, $U_{ac}^* > \epsilon$ 代表交流子网轻载且达到阈值以上,只有当直流子网重载且特征值满足 $U_{dc}^* < -\epsilon$ 时 ILC 才进入工作控制段,此时若有 $U_{ac}^* + U_{dc}^* > 0$,表明直流子网达到额定运行情况下的功率缺额比交流子网达到对应的额定运行条件的功率盈余小,为避免交流侧过多的向对侧传输功率导致直流侧的功率越界,功率参考值应选取为 $P_{ILC} = -K \cdot U_{dc}^*$,保证直流侧子网运行在额定状态,对应坐标轴右侧 ILC 工作控制段 B。

2)当 $U_{ac}^* < -\epsilon, U_{dc}^* > \epsilon, U_{ac}^* + U_{dc}^* > 0$ 时,系统进入工况 2 运行状态,表明交流子网达到额定运行情况下的功率缺额比交流子网达到对应的额定运行条件下的功率盈余小,此时的功率参考值应选取为 $P_{ILC} = K \cdot U_{ac}^*$,保证交流子网侧运行在额定状态下,对应坐标轴左侧 ILC 工作控制段 A。

3)针对工况 3, $U_{ac}^* > \epsilon$ 交流侧轻载, $U_{dc}^* < -\epsilon$ 直流侧重载,由于 $U_{ac}^* + U_{dc}^* < 0$ 表明直流子网所要达到的额定运行条件下所需要的功率缺额比交流子网达到对应的额定运行条件的功率盈余高,为降低交流侧过度传输功率导致的交直流子网两侧运行工况恶化,功率参考值应选取为 $P_{ILC} = K \cdot U_{ac}^*$,即选取功率盈余或缺额较小的一方进行补偿,优先保证交流侧子网的稳定运行,对应坐标轴右侧 ILC 工作控制段 A。

4)当 $U_{ac}^* < -\epsilon, U_{dc}^* > \epsilon, U_{ac}^* + U_{dc}^* < 0$ 时,系统进入工况 4 运行状态,表明交流子网达到额定运行情况下的功率缺额比直流子网所要达到的额定运行条件下所需要的功率盈余高,此时应优先满足直流侧的子网的稳定运行,功率参考值应选取为 $P_{ILC} = -K \cdot U_{dc}^*$,对应坐标轴左侧 ILC

工作控制段 B。

综合以上 4 种工况以及 ILC 工作在空闲状态的工作条件,定义事件 A: $|U_{ac}^*| > \epsilon$, 事件 B: $|U_{dc}^*| > \epsilon$, 事件 C: $U_{ac}^* \cdot U_{dc}^* < 0$ 。最终的 ILC 的有功功率参考值选取流程如图 3 所示。

根据计算得到的有功功率参考值 P_{ILC} ,不仅可以通过该参考值的符号确定 ILC 的工作模式,当 $P_{ILC} > 0$ 时 ILC 工作在整流模式,反之则 ILC 工作在逆变模式,而且功率参考值在经过 PI 控制器后,不断改变互联变流器的功率流动方向与大小,当某一侧子网率先达到功率额定值时,不再额外向对侧传输功率,直至达到系统稳定。本文侧重于交直流子网的功率互助,且直流子网不需要对无功功率进行调节,为降低 ILC 控制的成本,本文功率互助目标仅为交直流侧母线的有功功率,ILC 控制原理如图 4 所示。

图 4 中,将采集到的交直流母线的电压经过式(5)、(6)计算得到交直流母线电压的标么值,将标么值送入 ILC 有功功率参考值计算模块与 ILC 运行状态计算模块,计算出 ILC 的有功功率参考值,此时需要注意若 ILC 运行检测模块判断 ILC 为空闲控制段则输出 0,否则输出 1。计算得到的最终的有功功率参考值送入电压电流双闭环控制中,最终 SPWM(sine pulse-width modulation)驱动 ILC 开启或关断功率传输。

3 仿真实验

为了验证本文所提控制策略的有效性,在 MATLAB/Simulink 中搭建了如图 5 所示的仿真模型。其中直流子网电力电子变换器环节拓扑结构均为四开关 Buck-Boost

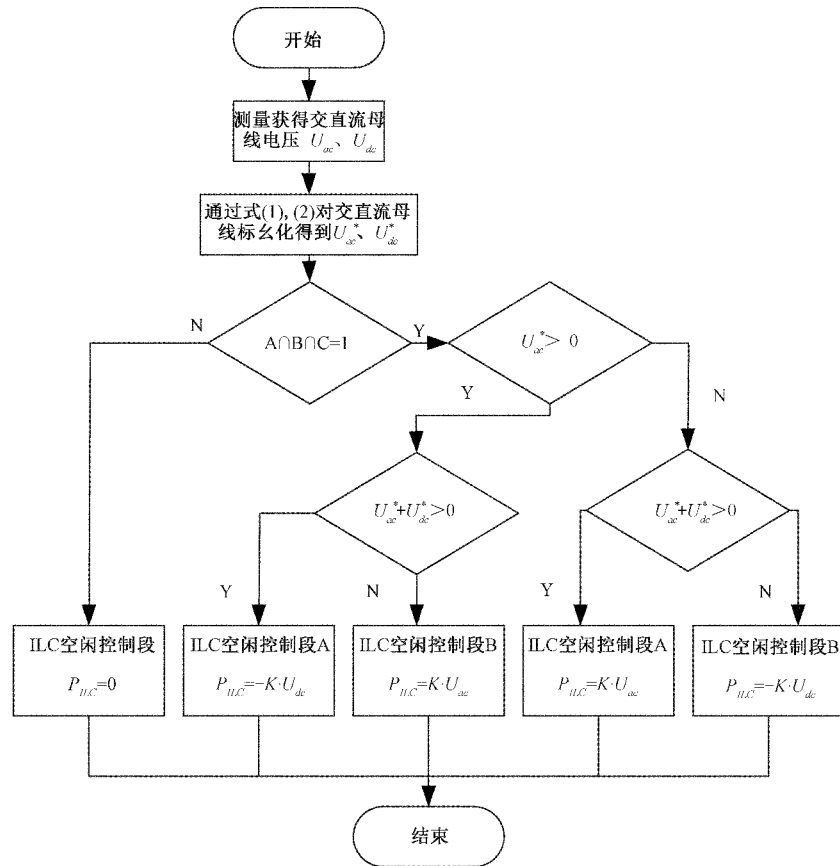


图3 ILC有功功率参考值选取流程

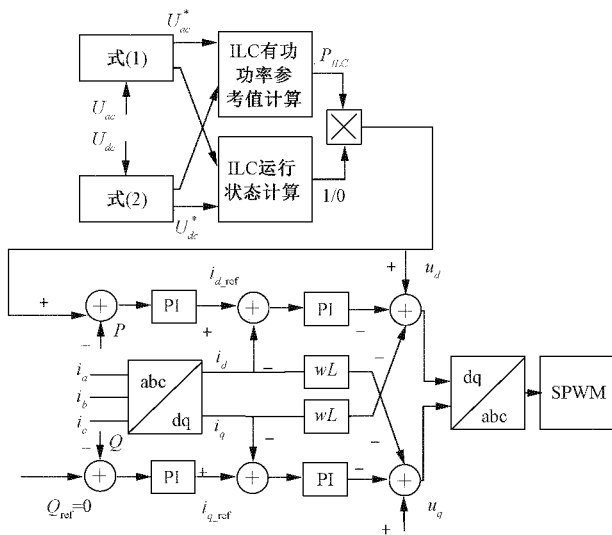


图4 ILC控制原理

DC-DC 变换器,交流子微网电力电子变换环节均由 DC-AC 构成。通过仿真模型验证在“交足直亏”、“直足交亏”与“交亏直亏”3 种工况反复切换模式下,ILC 是否能够按照既定的控制策略分别工作在相应的工作区间内。具体的仿真参数如表 2 所示。

3.1 ILC 空闲段与工作控制段间切换

仿真开始时,交直流侧都处于额定功率运行状态,且交直流侧负载均为 30 kW,两侧子网稳定运行。1 s 时交流侧增大负荷至 35 kW,直流侧降低负荷至 10 kW。2 s 时交流侧负荷降低至 20 kW,直流侧负荷增加至 45 kW。3 s 时增加交流负荷至 25 kW,直流侧负荷降低至 25 kW,仿真结果如图 6 所示。

仿真开始时,由图 6 可以看出,直流侧与交流侧无功率交换,交直流子微网工作于 ILC 空闲工作段,交流侧电压 380 V,直流侧电压为 800 V,均为额定值,交直流子网均能够稳定运行,在 1 s 时由于投切交流侧负荷至 35 kW 导致交流子网重载,投切直流侧负荷至 20 kW 直流子网轻载,达到 ILC 开启条件,系统工况切换至工作控制段,此时交直流子网运行于工作控制段 A。由于直流侧功率盈余量大于交流侧功率缺额,将交流侧电压特征量设为功率传输参考值,最终 ILC 向交流侧传输 5 kW 功率如图 6(c) 所示,且投切过程中交直流两侧电压无较大波动。在仿真 2 s 时直流侧负荷增加至 45 kW,交流侧负荷降低至 20 kW。此时 ILC 由工作控制段 A 切换至工作控制段 B,ILC 工作于整流模式,由于直流侧的功率缺额量大于交流侧功率盈余量,根据控制器控制逻辑,将交流侧电压特征量设为功率传输参考值,最终交流侧向直流侧传输的功率

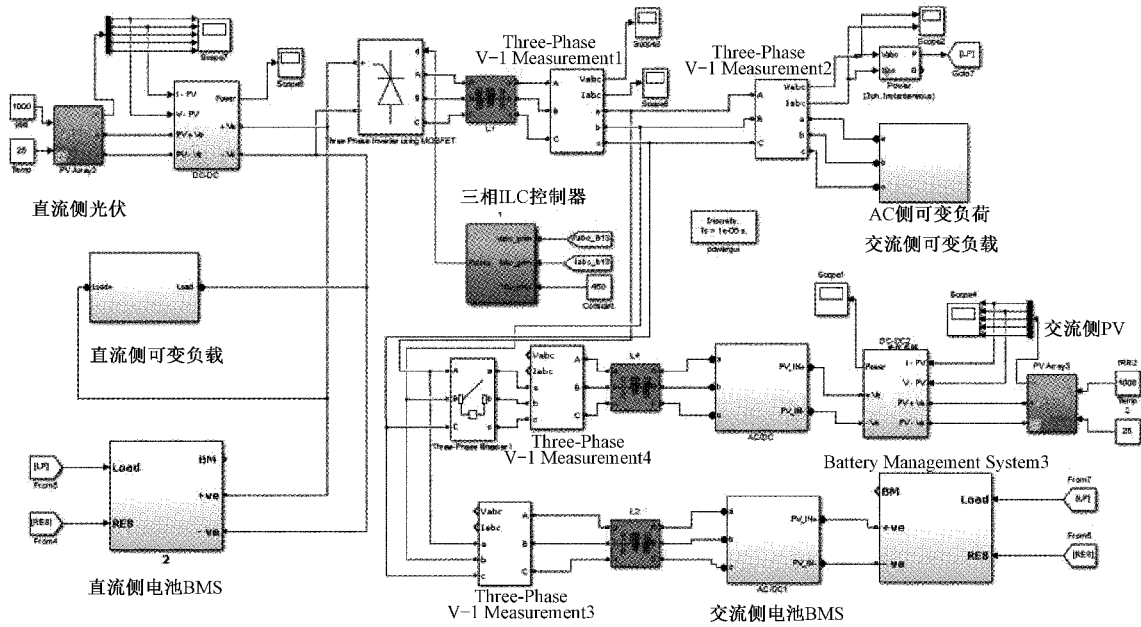


图 5 孤岛模式下交直流混合微网仿真模型

表 2 交直流混合微网仿真参数

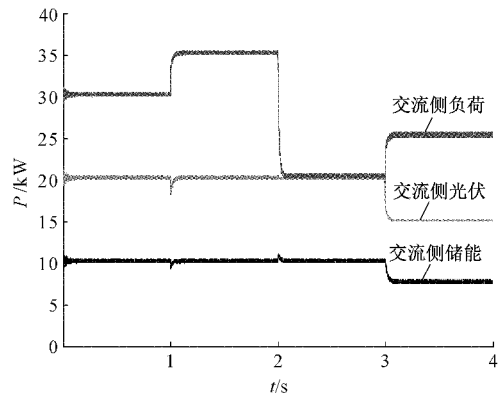
类型	参数类型	数值	单位
交流子网	交流微网母线电压 U_{ac}	380	V
	阈值 $U_{ac,max}$	405	V
	阈值 $U_{ac,min}$	355	V
	交流侧光伏额定有功功率	20	kW
	交流侧储能额定有功功率	10	kW
	交流侧光伏下垂系数	5×10^{-3}	V/W
	交流侧储能下垂系数	2.5×10^{-3}	V/W
直流子网	直流微网母线电压 U_{dc}	800	V
	阈值 $U_{dc,max}$	825	V
	阈值 $U_{dc,min}$	775	V
	直流侧光伏额定有功功率	20	kW
	直流侧储能额定有功功率	10	kW
	直流侧光伏下垂系数	5×10^{-3}	V/W
	直流侧储能下垂系数	2.5×10^{-3}	V/W
其他	ILC 开通关断阈值 ϵ	0.01	
其他	综合下垂系数 K	6×10^2	

参考值为 10 kW,防止交流侧向对侧过多传输功率导致系统整体稳定性恶化。3 s 时投切负荷导致交直流子网两侧轻载,此时交直流两侧的特征量差值满足 ILC 运行于空闲工作段条件,由工作控制段切换至空闲控制段,ILC 不传输功率。

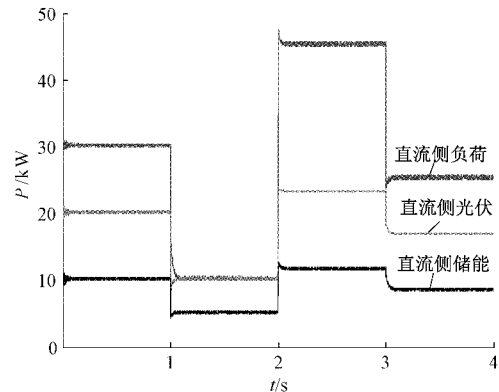
在该仿真过程中直流母线电压如图 6(d)所示,交流侧母线电压有效值如图 6(e)所示均能快速稳定且无较大过欠冲,ILC 功率变化曲线如图 6(c)所示无波动,且能够快速平稳的向对侧传输能量,证明系统有较好的控制稳定性。

3.2 ILC 工作控制段 A 与工作控制段 B 切换

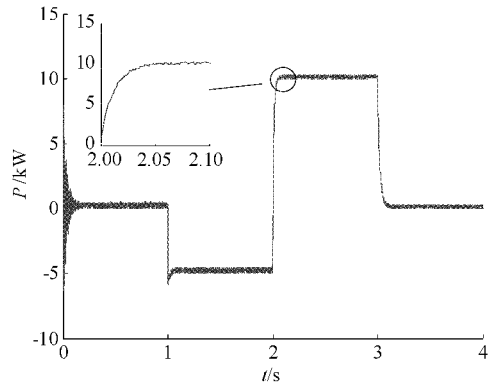
仿真开始时,交直流侧都处于额定功率运行状态,且交直流侧负载均为 30 kW,两侧子网稳定运行。1 s 时交流侧降低负荷至 15 kW,直流侧增大负荷至 35 kW。2 s 时交流侧负荷不变,直流侧负荷增加至 50 kW。3 s 时增加交流



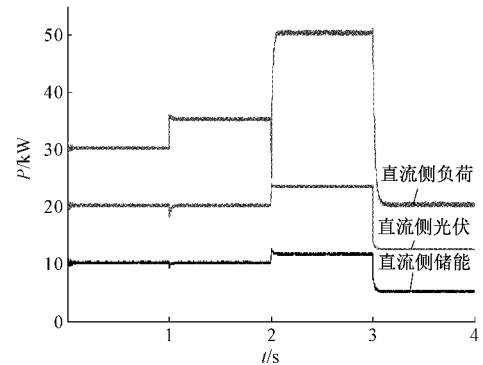
(a) 交流子网功率变化曲线



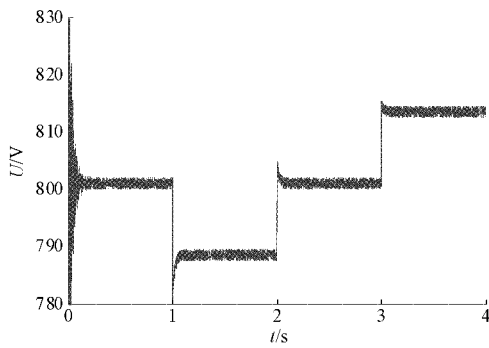
(b) 直流子网功率变化曲线



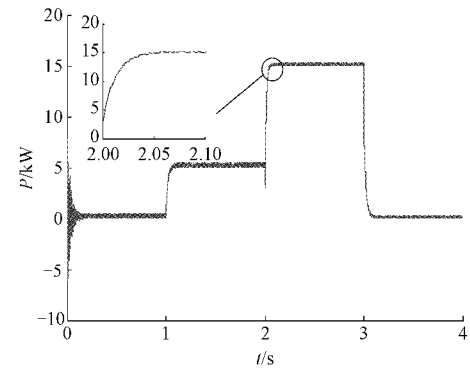
(c) ILC功率变化曲线



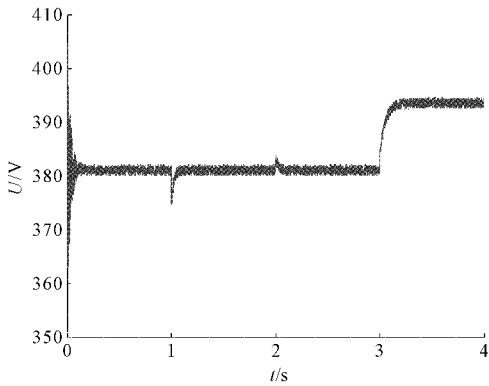
(b) 直流子网功率变化曲线



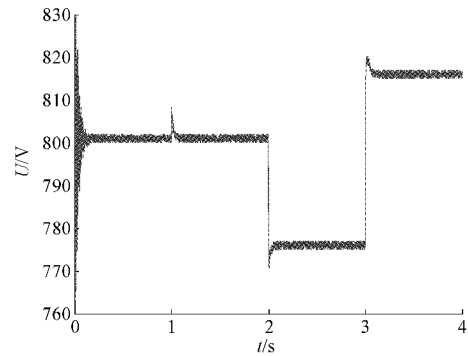
(d) 直流母线电压变化曲线



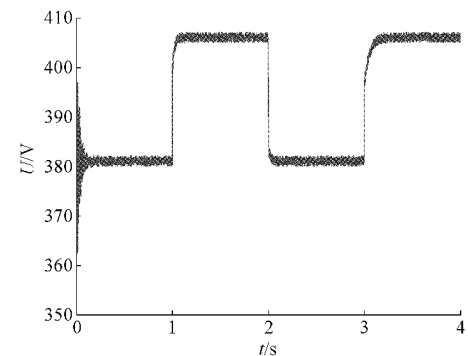
(c) ILC功率变化曲线



(e) 交流母线电压有效值变化曲线



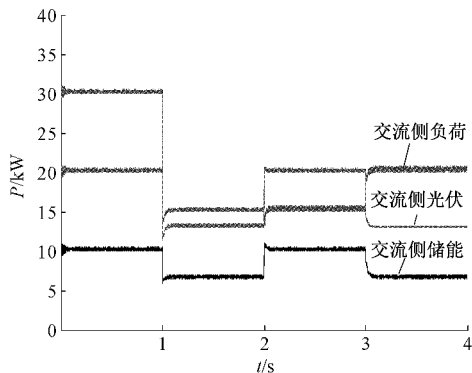
(d) 直流母线电压变化曲线



(e) 交流母线电压有效值变化曲线

图6 空闲控制段与工作控制段切换仿真结果

负荷至 20 kW, 直流侧负荷降低至 20 kW, 仿真结果如图 7 所示。



(a) 交流子网功率变化曲线

图7 工作控制段 A 与工作控制段 B 间切换仿真结果

仿真开始时, 由图 7 可知, 在 1 s 时由于投切交直流两侧负荷导致交流子网轻载, 直流子网重载, 导致交流子网电压升高, 直流子网的电压降低, 满足 ILC 工作条件, 由于

直流侧功率缺额小于交流侧功率盈余量,系统工况切换至工作控制段 A。将直流侧电压特征量设为功率传输参考值,最终 ILC 向交流侧传输 5 kW 功率。2 s 时投切负荷导致直流侧负荷继续增加,直流侧运行工况恶化,通过计算交直流两侧特征量可知,直流侧的功率缺额量大于交流侧功率盈余量,将交流侧电压特征量设为功率传输参考值,最终交流侧向直流侧传输 15 kW 功率。3 s 时投切负荷导致交直流子网两侧轻载,ILC 由工作控制段切换至空闲控制段,ILC 不传输功率。

在该仿真过程中直流母线电压如图 7(d)所示,交流侧母线电压有效值如图 7(e)所示,在 1 s 以及 3 s 的负荷大幅度投切瞬间均能快速稳定且无较大过欠冲,ILC 功率变化曲线如图 7(c)所示,无功率震荡现象,且能够快速平稳的向对侧传输能量,证明系统在该工作模式下有较好的控制稳定性。

3.3 控制效果分析

本文所提的控制策略针对可能出现的交直流子微网间 ILC 运行工作区间频繁切换问题以及单侧工况恶化进而渗透整个微网的情况,额外设置空闲工作控制段,在空闲工作控制段内对交直流子微网小范围的功率盈余做了补偿,在仿真图 6、7 中可以看出,在添加空闲工作控制段后,交直流侧电压波动与 ILC 功率传输波动较传统控制策略有所降低。

为实现分布式微源两侧子微网功率盈余情况下的稳定运行,交直流两侧无论盈余量为何种情况都不向对侧传输能量,若此时采样传统方法,交直流两侧仍存在功率传输情况,在较短时间内便会达到功率接收侧的储能上限而退出运行,功率接收侧的功率全部由 ILC 供给,增加了 ILC 功率运行的负荷。采用本文所述方法,有利于实现系统运行的经济性,且控制系统稳定性较好,即使出现较大投切负荷情况仍能保证系统稳定。

4 结 论

本文针对孤岛模式下的交直流混合微网的运行特性,提出了 ILC 空闲控制段与 ILC 工作控制段的概念,并利用交流母线电压值与直流母线电压值建立交直流两侧的数学关系,以标幺化后的交直流母线电压为特征量设计孤岛模式下交直流子微网的分段控制策略,其中 ILC 控制器根据交直流两侧子网特征量计算出满足功率传输的 SPWM 信号。仿真结果表明,交直流子微网两侧进行大功率负荷投切时系统能快速计算出功率缺额所需功率阈值,在各微源在充放电功率发生变化时能够快速平抑波动,且系统不会由于交直流子网某侧出现负荷剧烈变化导致整个微

网稳定性剧烈变化,各个变流器可以迅速做出响应,保证系统的稳定运行。考虑到不同系统对交直流子微网的电能质量要求可能并不相同,本文所提的划分不同工作控制段的 ILC 控制策略还有待进一步的研究。

参考文献

- [1] 付子义,王艺龙.基于主从结构微网控制策略运行分析[J].电子测量技术,2016,39(10):6-10.
- [2] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等.微电网技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
- [3] 席晓林,吴杰,王宁,等.交直流混合微电网中关于纹波的研究[J].电力科学与技术学报,2020,35(6):76-82.
- [4] 朱永强,王福源,赵娜,等.主从控制混合微电网中互联变流器控制策略[J].电力建设,2018,39(8):102-110.
- [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.
- [6] 曹珏瑞.交直流混合微网双向 AC/DC 互联变流器控制策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [7] 王植,马振,胡鹏涛,等.孤岛交直流混合微电网功率互助策略[J].电力建设,2021,42(1):76-84.
- [8] 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.
- [9] 朱永强,张泉,刘康,等.交直流混合微电网分段协调控制策略[J].电力系统自动化,2020,44(6):52-58.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 宫娅宁,秦红,付洪斌,等.考虑源荷不确定性的光伏发电系统优化调度策略[J].电力科学与技术学报,2019,34(2):112-118.
- [13] 杨海柱,徐锦举.微电网并网逆变器的改进下垂控制策略研究[J].电子测量技术,2016,39(5):36-40.
- [14] 刘喜梅,贺瑞,张鹏.直流微电网电压平衡器的控制策略[J].电子测量技术,2015,38(10):32-35,40.
- [15] 李梅,张茜,郑晓亮.含微电网的配电网分区综合保护[J].中国科技论文,2019,14(4):417-421.

作者简介

管东方,硕士研究生,主要研究方向为电力电子及其仿真技术。

E-mail:dongfangsdut@163.com

赵艳雷(通信作者),工学博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力电子与新能源发电技术、电力系统分析等。

E-mail:zhaoyanlei01@163.com