

交直流混合微电网中电力电子变压器功率控制与模式切换方法

李俊杰¹, 吴在军¹, 杨士慧², 吕振宇¹, 刘海军², 沈宇³

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 全球能源互联网研究院有限公司, 北京 102209;

3. 国网冀北电力有限公司, 北京 100053)

摘要:提出电力电子变压器在交直流混合微电网中的功率控制与模式切换方法。在交直流混合微电网的离网模式下,提出剩余功率下垂控制方法实现交直流系统的相互支撑。为实现电力电子变压器不同运行模式下的无缝切换,将不同运行模式融合到1个功能外环中,有效地降低了模式切换时的暂态波动。仿真结果表明,所提功率控制策略既能避免交直流母线的过度耦合,又能为交直流混合微电网提供一定的相互支撑作用;所提模式切换方法在保持稳态性能不变的情况下,显著提高了电力电子变压器的暂态性能。

关键词:混合微电网;电力电子变压器;下垂控制;模式切换;功率控制

中图分类号:TM 42

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202008015

0 引言

为了尽可能多地接入可再生能源,协调其与大电网间的交互运行,国内外专家提出了微电网的概念^[1]。常见的微电网多为交流微电网,与交流微电网相比,同时具有交、直流特性的交直流混合微电网引起了国内外学者的广泛关注^[2]。由于混合微电网可直接接入直流设备,无需频率控制和相位跟踪^[3],在节省大量电力电子换流环节的同时显著提高了系统的可靠性和可控性^[4],是分布式清洁能源并网理想途径。

在混合微电网中,与配电网相连的公共连接点(PCC)是配电网、交流微电网和直流微电网三者之间能量流动的中转站^[5]。由于清洁能源发电具有间歇性和随机性,为保证PCC处母线的电能质量,其能量协调管理至关重要。电力电子变压器(PET)由电力电子变换电路与高频变压器组成,具有变压、隔离和能量传输的功能^[6],可以作为“能量路由器”将交流微电网、直流微电网和配电网有机地连接起来,实现对PCC处母线的能量协调管理和功率的精准控制^[7]。

目前对PET的研究主要集中在控制方法,如文献[8]从磁路的角度对PET进行建模并研究了其控制方法,但是没有考虑PET与微电网间的协调运行。文献[9]考虑了下垂控制在混合微电网中的使用,但是只考虑了一侧的电能质量信号,并没有研究交直流系统的相互支撑作用。文献[10]虽然考虑了交直流系统的相互支撑作用,但是其双向下垂控制环节

较为复杂,系统可靠性降低。文献[11]研究了混合微电网中交直流母线的功率平衡问题,提出了一种基于单位化处理的交直流混合下垂控制策略,该策略的控制目标为控制交流母线的频率和直流母线的电压标幺值分别相等。但没有考虑大量电力电子设备接入后直流微电网系统惯性较低的问题,并且该控制策略将交直流系统的母线耦合,即任意一条母线的功率波动都会迅速地传递到另外一条母线上。文献[12]研究了以双有源桥(DAB)为核心的PET在混合微电网不同运行模式下的控制策略。通过控制PET的输入端口使交直流混合微电网等效为“阻性负载”或“电流源”,同时控制交、直流输出端口使其等效为恒定的电压源。但该文献仅考虑了并离网模式下的控制策略,没有考虑不同模式间的切换过程。

基于此,本文提出了剩余功率下垂控制方法,以实现交直流母线间的功率分配问题。将不同模式间的切换方法融入PET的控制策略中,实现了不同运行模式下的平滑切换。

1 基于PET的混合微电网系统拓扑结构

图1为基于PET的混合微电网拓扑结构。图中, QF_{PCC} 、 QF_1 、 QF_2 分别为PCC处母线、交流母线、直流母线处的断路器; P_{hv} 、 P_{ac} 、 P_{dc} 分别为流过 QF_{PCC} 、 QF_1 、 QF_2 的有功功率,均以注入PET的方向为正;VSI为电压源型逆变器;HM为采用H桥模块的PET输入级电路。10 kV配电网为主网,混合微电网以PET为核心,PET将配电网、750 V直流母线和380 V交流母线连接为一个系统。电动汽车充电桩等典型直流负荷接入直流母线上;光伏和风机需要根据自身特性和运行成本,选择直流或交流接入形式;柴油发电机作为交流母线的主电源接入交流母线;储能作为可

收稿日期:2020-03-01;修回日期:2020-06-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0900500)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0900500)

控的直流电源接入直流母线。

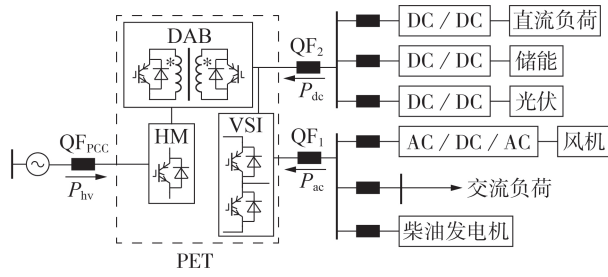


图1 混合微电网拓扑结构

Fig.1 Topology of hybrid AC/DC microgrid

若不考虑 PET 的功率损耗,则 P_{hv} 、 P_{ac} 、 P_{dc} 间的关系为:

$$P_{hv} + P_{ac} + P_{dc} = 0 \quad (1)$$

一般而言, PET 的拓扑结构可以根据实际情况进行调整, 本文选用的三端口 PET 主电路拓扑具有输入级、隔离变换级和输出级 3 级结构。输入级的基本电路采用 H 桥模块的拓扑结构, 为了适应电压等级, 可以采用级联或多电平的连接方式。隔离变换级采用 DAB 电路的拓扑结构以实现故障隔离和能量控制, 见附录图 A1。值得注意的是, 若输入级的 H 桥采用级联模式, 则 DAB 也应该采用相同数量的模块级联, 前级与 H 桥的输出电容相连, 后级并联到直流母线上。输出级采用 VSI 将 DAB 输出的低压直流逆变成交流, 通过 LC 滤波器接入交流母线。

2 PET 不同运行模式下控制策略

PET 作为混合微电网的核心, 其控制策略至关重要, 需要配合混合微电网的运行模式进行相应改变。正常情况下 QF_{PCC} 闭合, PET 运行于电压控制模式, 负责给交、直流母线提供电压参考信号, 维持母线功率平衡。一旦配电网发生故障, PET 迅速切换到功率控制模式, 从而满足负荷的安全供电需求, 此时 QF_{PCC} 断开, QF₁ 和 QF₂ 闭合, 交、直流母线间可以进行功率传输。

2.1 并网模式

正常情况下, 混合微电网运行于并网模式, 此时 PET 以配电网为功率支撑, 运行于电压控制模式, 为混合微电网提供功率补偿, 从而稳定混合微电网的电压和频率。

DAB 通过控制变压器原、副边两侧 H 桥间的移相角来控制流过变压器的功率, 即单移相 SPS (Single Phase Shift) 控制策略。采用 SPS 控制策略时, DAB 共有 6 种工作模式^[13]。在一个周期内 DAB 输入电流的平均值 I_{ave} 为:

$$I_{ave} = \frac{nV_2}{2f_s L} D(1-D) \quad (2)$$

其中, V_2 为 DAB 的输出电压; L 为变流器的等效电感; f_s 为 DAB 左右两侧的开关频率; D 为移相角; n 为变压器变比。当采用 SPS 控制策略时, DAB 输入功率为:

$$P_T = V_1 I_{ave} = \frac{nV_1 V_2}{2f_s L} D(1-D) \quad (3)$$

其中, V_1 为 DAB 的输入电压; P_T 为 DAB 的输入功率。当 DAB 的电路参数和额定工况确定时, 通过调节移相角 D 可以唯一调节其输出功率, 从而间接调节输出电压。

VSI 采用双环脉冲宽度调制 (PWM) 的恒压控制策略, 外环为电压环, 提供内环的控制信号; 内环为电流环, 提高逆变器的动态性能, 控制结构见附录图 A2。

2.2 离网模式

当配电网发生故障时, QF_{PCC} 迅速断开, 混合微电网运行于离网模式下, 交、直流母线上的可控电源为提供母线电压提供参考信号, 进而维持交、直流母线的功率平衡。此时 PET 运行于功率控制模式, HM 和 DAB 退出运行, VSI 连接交、直流母线, 负责控制交、直流母线间的功率分配。

离网模式下, 选取柴油发电机作为交流母线的主电源, 储能作为直流母线的主电源。由于直流系统中有功功率与直流电压强相关, 当直流母线的有功支撑不足时, 母线电压下降, 可以通过控制储能变流器的出口电压来控制变流器输出的有功功率, 即下垂控制策略。设计储能变流器的下垂关系为:

$$P_{DGi} = -k_i (V_N - V) \quad (4)$$

其中, V_N 和 V 分别为直流母线的额定电压和实际电压; P_{DGi} 为分布式电源 DG_i 输出的有功功率; k_i 为 DG_i 的下垂系数。下垂控制策略见附录图 A3。

值得注意的是, 下垂控制策略并不能保证母线电压一定处于参考值, 当母线电压最低时, 储能变流器的输出功率最大。当母线电压继续下降时, 由于变流器的输出功率已经达到极限, 其输出功率保持不变。 DG_i 的下垂系数为:

$$k_i = \frac{\max(P_{DGi})}{V_N - V_{min}} \quad (5)$$

其中, $\max(P_{DGi})$ 为 DG_i 输出的有功功率最大值; V_{min} 为直流母线电压允许波动的最小值。为避免交、直流母线间的过度耦合导致负荷波动影响范围扩大, 规定 VSI 只将轻载母线的剩余功率传输到重载母线上, 以满足微电网的“自治”原则。根据交、直流母线不同的负荷情况, VSI 的运行状态被划分为如下 3 种状态。各情况下 VSI 所对应的运行状态见表 1。

(1) 逆变状态: 此时清洁能源出力较大, 直流母线电压高于额定值而交流母线频率低于额定值, VSI

表1 不同情况下VSI的运行模式
Table 1 Operating modes of VSI under different conditions

情况	交流负荷	直流负荷	VSI 运行状态
1	轻载	轻载	停机
2	轻载	重载	整流
3	重载	轻载	逆变
4	重载	重载	停机

将直流母线的剩余功率传输到交流母线上。

(2) 停机状态: 随着VSI将直流母线的剩余功率传输到交流母线上, 直流母线的电压会逐渐下降, 而交流母线的频率会逐渐上升。当直流母线电压下降到额定值或者交流母线的频率上升到额定值时, 为了保证本地负荷供电, 防止故障扩大化, VSI停止工作。

(3) 整流状态: 在夜晚或极端天气条件下, 清洁能源停止出力。此时储能电源容量不足, 不能长时间维持直流母线电压, 母线电压低于额定值。若此时交流母线所连接的负荷为轻载, 母线频率高于额定值, 则VSI工作于整流状态将交流母线的剩余功率传输到直流母线上。

由于交流母线的有功功率和频率强相关, 直流母线的有功功率和电压强相关, 为了方便VSI合理分配功率, 需要统一其参考变量的量纲。定义剩余功率为:

$$\begin{bmatrix} P_{ac}^s \\ P_{dc}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{ac}^s & 0 \\ 0 & k_{dc}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f - f_N \\ V - V_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, P_{ac}^s 、 P_{dc}^s 分别为交、直流母线中的剩余功率; f 和 f_N 分别为交流母线的实际频率和额定频率; k_{ac}^s 、 k_{dc}^s 分别为交、直流系统中剩余功率的下垂系数。由式(6)可知, 剩余功率系数矩阵为对角阵, 则交、直流系统中的剩余功率分别与交、直流母线的参考变量有关。剩余功率的物理意义可近似表示为母线电源的备用容量: 当 $f > f_N$ 或 $V > V_N$ 时, 剩余功率大于0, 此时母线处于轻载状态; 反之剩余功率小于0, 此时母线处于重载状态。与母线电源备用容量的不同之处在于, 当剩余功率为0时母线电源并没有处于极限运行状态。

由于作为交、直流母线离网模式下主电源的柴油发电机和储能均采用下垂控制, 交、直流母线的频率和电压幅值与母线负荷吸收的有功功率之间的关系如图2所示。图中, V_{max} 为直流母线电压允许波动的最大值; f_{max} 和 f_{min} 分别为交流母线频率允许波动的最大值和最小值; P_{amax} 、 P_{amin} 和 P_{dmax} 、 P_{dmin} 分别为交流母线和直流母线输出功率的最大值、最小值。

为了实现负荷按电源容量分配, 交、直流系统中的剩余功率的下垂系数分别为:

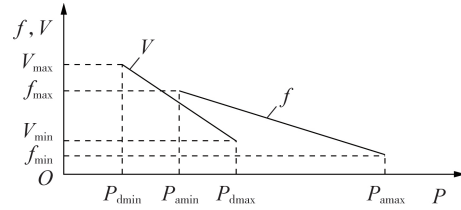


图2 交、直流母线下垂特性

Fig.2 Droop characteristics of AC and DC buses

$$\begin{cases} k_{ac}^s = \frac{P_{amax}}{P_{amax} + P_{dmax}} \frac{f_{max} - f_{min}}{P_{amax} - P_{amin}} \\ k_{dc}^s = \frac{P_{dmax}}{P_{amax} + P_{dmax}} \frac{V_{max} - V_{min}}{P_{dmax} - P_{dmin}} \end{cases} \quad (7)$$

通过调节剩余功率的下垂系数, 可以调节2条母线间的共享功率, 若控制目标为优先保证本线路负荷供电, 可以适当减小剩余功率的下垂系数, 为了实现重要负荷间的无差控制, 可以调节剩余功率的下垂系数自适应变化, 从而灵活调节交、直流母线的耦合程度。

为了便于实现VSI不同工作模式的切换, 采用双环PWM控制结构。为了提高VSI的动态性能, 避免负荷频繁波动导致VSI出力不稳定的问题, 在控制结构中引入等价于一阶低通滤波器的转子运动方程, 如图3所示。图中, ω 、 ω_0 分别为转子运动方程的角速度、初始角速度; J 为转子运动方程的转动惯量; f_{ref} 、 V_{ref} 分别为交流母线频率、直流母线电压参考值。为模拟VSI在表1中4种情况下的运行状态, 定义 P^s 为:

$$P^s = \begin{cases} P_{dc}^s - P_{ac}^s & P_{dc}^s P_{ac}^s < 0 \\ 0 & P_{dc}^s P_{ac}^s \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

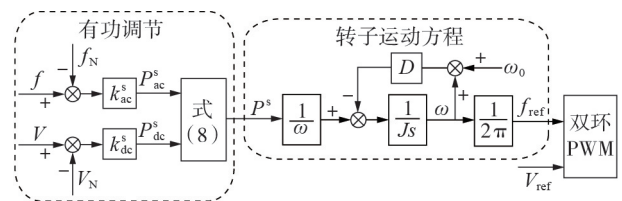


图3 离网模式下VSI控制框图

Fig.3 Control block diagram of VSI under islanded mode

3 PET运行模式切换方法

在传统的混合微电网中, 直流母线通过DC/AC变流器接入交流母线, 当研究并离网模式的切换问题时, 一般将其等效为交流微电网的并离网模式切换问题, 通过多输入、多输出的预同步单元对交流母线控制器实现预同步控制, 不仅结构复杂, 而且稳定性差。对基于PET的混合微电网而言, 交、直流母线直接接入PET, 在研究其并离网模式的切换问题时, 可以将其等效为VSI运行模式的切换问题。其难点

在于 VSI 在不同模式间进行切换时,通常存在数个周期的电压中断。

例如当微电网的运行模式由并网模式切换到离网模式时, QF_{PCC} 断开, 由于 PET 对外表现为电压源或负载, 流过 QF_{PCC} 的功率会突变至 0, 即 QF_{PCC} 断开对于母线而言可以等效为负荷的突增或突减, 而负荷的冲击会影响母线的频率或电压。当微电网由离网模式切换到并网模式时, QF_{PCC} 闭合, 即 QF_{PCC} 两端直接相连, 若两端电路的电压不相等, 闭合瞬间电压较低侧电网的电压会被拉升至电压较高侧的电网电压水平, 产生很大的冲击电流。

大量研究结果表明, 在电压不同步的情况下强行并网, 会导致电压波形畸变, 电能质量恶化, 甚至并网失败。因此在 QF_{PCC} 闭合前, 一定要保证其两侧电压差足够小。为此, 需要改进现有的控制算法, 尽量避免模式切换过程中所出现的暂态过程。

3.1 DAB 的模式切换方法

由于离网模式下 DAB 和 HM 均退出运行, 所以 DAB 和 HM 的运行模式切换方式为稳压模式与停机模式的切换。一般情况下, 小功率逆变器可以直接切出电网, 但是由于在并网模式下 DAB 作为混合微电网的主电源, 且微电网系统的容量较小, 无任何控制策略的直接切出会导致微电网直流电压的剧烈波动。图 4 为 DAB 运行模式切换方法的控制框图。图中, S_1 为运行模式切换开关。不同于 SPS 控制, 此处功率和电压参考值并不是常数, 而是一个随时间变化的量, 此时 DAB 选用 PWM。

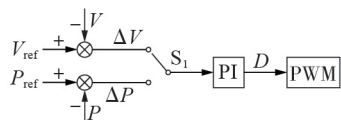


图 4 DAB 模式切换控制结构

Fig.4 Control block diagram of mode switching for DAB

当混合微电网由并网模式切换到离网模式时, 切换开关 S_1 , 将 ΔP 作为比例积分 (PI) 控制器的输入, 此时有功功率参考值 P_{ref} 会以当前时刻的传输功率为初始值, 逐渐下降, 进而导致 DAB 的移相角 D 缓慢降低, DAB 的输出端电压和传输功率逐渐下降。此时直流母线功率不足, 直流母线侧的变流器开始增加出力, 直流侧主电源由 DAB 切至储能变流器。

当混合微电网由离网模式切换到并网模式时, 由于离网模式下交流侧和直流侧相连接, 并网模式下闭合 QF_{PCC} , 切换开关 S_1 , 将 ΔV 为 PI 控制器的输入。此时 DAB 将直流母线电压作为其输出端电压的参考值, 闭合 QF_2 , DAB 几乎没有功率输出。随后 DAB 的电压参考值逐渐上升到额定值, 随着 DAB 的输出电压上升, 其向直流母线传输的功率越来越多, 进而抬高直流母线电压, 使其缓慢上升到额定值。

此时储能变流器检测到直流母线电压上升, 根据其下垂系数缓慢减少输出功率, 直流母线主电源从储能变流器切换到 DAB, 使其从离网模式切换到并网模式。

3.2 VSI 的模式切换方法

由上述分析可知, VSI 的运行模式分别为并网运行下的恒压恒频控制、离网运行下的功率控制和闭锁模式。为了能够使 VSI 实现不同外环控制间的无缝切换, 将 3 个不同的运行模式融合到 1 个功能外环中, 如图 5 所示。图中, P_{dro} 、 Q_{dro} 分别为需要闭锁时的有功和无功参考值; P_0 、 Q_0 分别为 VSI 实际输出的有功和无功; f^s 为离网运行模式下转子运动方程的输出频率; θ_{ac} 为交流母线电压相位; θ 为 VSI 出口电压相位; $\Delta\theta$ 为 θ_{ac} 与 θ 的相位偏差量; i_{dref} 、 i_{qref} 为电流内环参考值; Q_{ref} 为无功参考值。

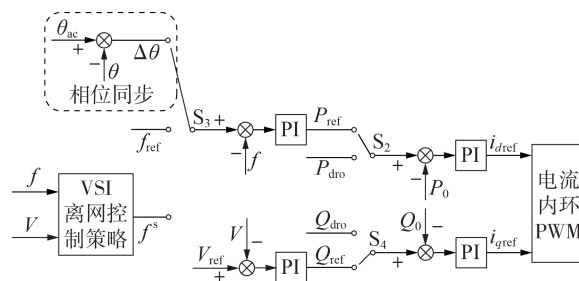


图 5 VSI 模式切换控制结构

Fig.5 Control block diagram of mode switching for VSI

并网模式下, 切换开关 S_3 和 S_2 、 S_4 , 将 f_{ref} 和 P_{ref} 、 Q_{ref} 作为输入信号, 此时 VSI 与交流母线保持相位一致。假如 DAB 切出, 混合微电网转入离网模式, 即切换 S_3 , 将 f^s 作为输入信号。由于切换前 VSI 处于恒压恒频控制, 此时交流母线频率 $f = f_{ref} = f^s$, 即 VSI 可以平滑切换到功率控制模式。同理可得, 当切换 S_2 、 S_4 , 将 P_{dro} 、 Q_{dro} 作为输入信号时, VSI 可以由功率控制模式平滑切出。

离网模式下, 由于 VSI 并没有退出运行, 当 PET 需要重新并网时, 只需切换 S_3 , 将 f_{ref} 作为输入信号, 此时 VSI 会根据交流母线状况调整出力, 平滑切换到恒压恒频控制。

但在解列状态下, 假如 PET 需要重新并网, 则设置 VSI 预同步单元实现 VSI 与交流母线处的相位一致。此时切换开关 S_3 , 将 $\Delta\theta$ 作为输入信号, 若交流母线处由于负荷扰动使得频率发生变化, 则交流母线的电压相位与 VSI 出口端电压相位不再一致, 从而 $\Delta\theta$ 不为 0, 使得 P_{ref} 发生相应变化, 直到 VSI 与交流母线的电压相位再次一致, 闭合 QF_1 , 将交流母线接入 PET。完成预同步后, 即可切换 S_3 , 将 f_{ref} 作为输入信号, 此时 VSI 运行于稳压模式, 其出口频率逐渐上升, 直至稳定于额定频率。

4 仿真分析

为了验证所提出的控制算法的准确性和有效性,考虑图1所示的拓扑结构,在MATLAB/Simulink中搭建了相应的仿真电路。电路参数设置如下:线路电阻为 $0.1\ \Omega$;线路电感为 $0.2\ \text{mH}$;直流系统中母线额定电压为 $750\ \text{V}$,额定容量为 $220\ \text{kV}\cdot\text{A}$,光伏功率为 $220\ \text{kW}$,储能的额定功率为 $40\ \text{kW}$,额定容量为 $80\ \text{kW}\cdot\text{h}$;交流系统中母线额定电压为 $380\ \text{V}$,母线额定容量为 $100\ \text{kV}\cdot\text{A}$,风机、柴油发电机额定功率均为 $50\ \text{kW}$ 。

4.1 PET交直流功率协调控制仿真分析

设交流负荷的初始值为 $60\ \text{kW}$,直流负荷的初始值为 $200\ \text{kW}$,直流母线处功率的下垂系数为 $10\ \text{kW}/\text{V}$, k_{ac}^s 、 k_{dc}^s 分别为 $110\ \text{kW}/\text{Hz}$ 、 $50\ \text{kW}/\text{V}$ 。交、直流母线负荷情况如下:当 $t\in[0,10)\ \text{s}$ 时,交、直流母线负荷分别为 60 、 $200\ \text{kW}$;当 $t\in[10,14)\ \text{s}$ 时,交、直流母线负荷分别为 110 、 $200\ \text{kW}$;当 $t\in[14,20]\ \text{s}$ 时,交、直流母线负荷分别为 110 、 $230\ \text{kW}$ 。

为了验证本文所提策略的有效性,对比传统功率下垂控制和本文所提剩余功率下垂控制策略,仿真结果如图6所示。

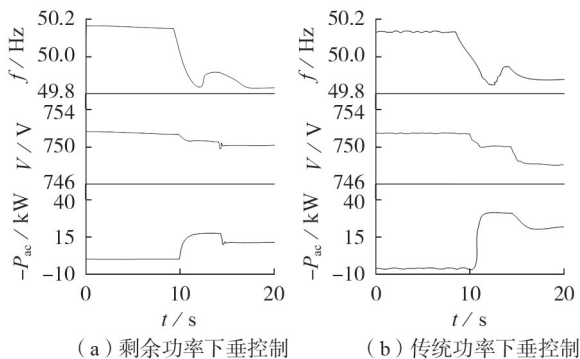


图6 混合微电网离网模式下仿真结果对比

Fig.6 Simulative results comparison of hybrid microgrid under islanded mode

由图6可知,当采用传统功率下垂控制策略时,由于负荷按照母线电源容量进行功率分配,10 s之前VSI运行于整流模式,向直流母线输送 $5\ \text{kW}$ 功率。但是由于清洁能源具有一定的波动性,导致VSI的输出功率并不稳定,交流母线频率在 $50.12\ \text{Hz}$ 附近波动。在10 s时,由于交流负荷突增 $50\ \text{kW}$,VSI从直流侧吸收 $30\ \text{kW}$ 的有功功率传输至交流母线,导致储能工作于放电模式而柴油发电机的容量没有被充分利用,直流母线电压在14 s直流负荷突增时跌至 $748\ \text{V}$ 。

当采用剩余功率下垂控制策略时,10 s之前由于交直流母线均为轻载,根据式(8)可得 $P^*=0$,VSI处于停机模式。10 s时,由于交流负荷突增 $50\ \text{kW}$,

此时交流频率下降到额定频率以下,导致VSI工作于逆变模式,从直流侧吸收 $15\ \text{kW}$ 功率并传输至交流母线,使得交流母线频率维持在 $49.9\ \text{Hz}$ 。由于此时直流母线的剩余功率较为充足,即使在14 s时直流母线负荷突增 $30\ \text{kW}$,直流母线的电压也能维持在 $750\ \text{V}$ 左右。

由上述分析可得,由于在离网模式中引入了剩余功率下垂控制策略,交、直流母线既能避免过度耦合,也能提供一定的交、直流系统间相互支撑作用。进一步地,由于加入图3所示的转子运动方程,VSI不仅能够较好地平衡混合微电网中的功率平衡,还能够提供一定的惯性支撑,使得VSI输出功率的变化较为平缓,从而提高了微电网的电能质量。

4.2 PET模式切换仿真分析

4.2.1 DAB模式切换

分别在直接切出和本文所提模式切换方案下,对比分析并网模式下DAB的模式切换控制策略,仿真结果见图7。光伏采用最大功率点跟踪(MPPT)控制,在仿真时间断面出力为 $100\ \text{kW}$ 。未切出时DAB作为主电源运行于稳压模式,补足剩余功率差额,储能不出力。0.3 s时DAB由并网模式切换到离网模式,若直接切换,由于直流母线功率突然损失导致其电压骤降至 $741\ \text{V}$,而后储能变流器检测到电压下降提高功率输出,将电压抬升至 $746\ \text{V}$ 。

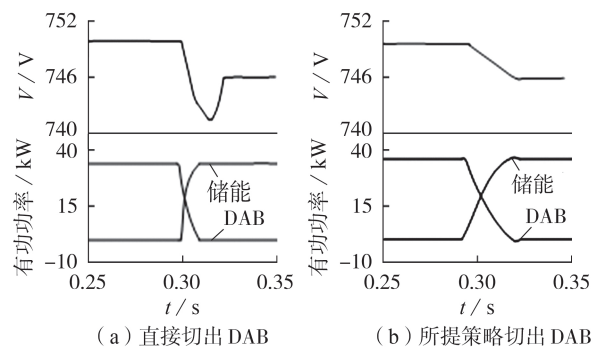


图7 不同模式切换方法下DAB仿真结果

Fig.7 Simulative results of DAB with different mode switching methods

为了改善由于PET运行模式直接切换导致的直流母线电压骤降问题,加入图4所示的功率控制模块。当DAB由并网模式切换到离网模式时,由于功率模块控制DAB输出功率逐渐下降,直流母线电压也逐渐下降,储能变流器的输出功率逐渐提升,直流母线电压始终维持在波动允许范围内。对比2种方式的仿真波形可知,加入功率控制模块后,系统的稳态性能保持不变,较大地提高了切换过程的动态性能。

4.2.2 VSI模式切换

在极端切换条件下对VSI进行仿真,仿真过程

中VSI由解列模式直接并网。首先切换 S_3 ,将 $\Delta\theta$ 作为输入信号,此时VSI的出口瞬时电压与交流母线瞬时电压的差值 ΔU 不断下降,如图8(a)所示。0.5 s时达到并网条件,此时闭合 QF_2 ,切换 S_3 ,将 f_{ref} 作为输入信号,此时交流母线频率变化如图8(b)所示。起初交流母线的频率稳定在49.88 Hz左右,并网后由于VSI作为主电源提供功率支撑,母线频率快速上升。由于VSI采用双环PWM控制策略,其频率很快稳定于额定频率50 Hz。

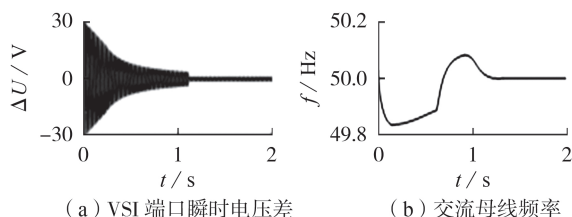


图8 VSI采用所提策略仿真结果

Fig.8 Simulative results of VSI with proposed strategy

5 结论

针对基于DAB和VSI的三端口PET,分别研究了其不同运行模式下的控制方法,并且设计了VSI模式切换方法。对于DAB,主要采用SPS控制,使其能够稳定出口电压。对于VSI,并网模式下采用的双环PWM控制,针对混合微电网运行于离网模式情况,提出剩余功率下垂控制方法以表征交、直流母线的负荷状态,为避免交、直流母线功率的频繁波动,在控制环节中加入一阶低通滤波器的转子运动方程。仿真结果证明,所提交、直流协调控制方法能够有效避免VSI输出功率的频繁波动。

对于PET不同运行模式下的切换方法,分析了VSI模式切换时的暂态过程,将不同运行模式通过功能外环进行融合控制。仿真结果证明,所提模式切换方法能够有效降低对系统的暂态冲击影响。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

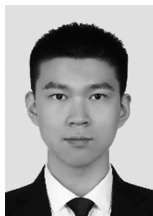
参考文献:

- [1] 吴雄,王秀丽,刘世民,等. 微电网能量管理系统研究综述[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):7-14.
WU Xiong, WANG Xiuli, LIU Shimin, et al. Summary of research on microgrid energy management system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 7-14.
- [2] 施静容,李勇,王姿雅,等. 交直流混合微电网互联变换器功率流动的柔性控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):107-113.
SHI Jingrong, LI Yong, WANG Ziya, et al. Flexible power flow control strategy for interlinking converter in AC/DC hybrid microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 107-113.
- [3] 徐殿国,张书鑫,李彬彬. 电力系统柔性一次设备及其关键技术:应用与展望[J]. 电力系统自动化,2018,42(7):2-22.
XU Dianguo, ZHANG Shuxin, LI Binbin. Flexible primary equipment in power system and their key technologies: applications

and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 2-22.

- [4] 何红玉,韩蓓,徐晨博,等. 交直流混合微电网一致性协调优化管理系统[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):138-146.
HE Hongyu, HAN Bei, XU Chenbo, et al. Optimal management system of hybrid AC/DC microgrid based on consensus protocols[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 138-146.
- [5] 王萌萌. 交直流混合微电网运行控制策略研究[D]. 南京:东南大学,2016.
WANG Mengmeng. Research on hybrid microgrid operation control strategy[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [6] 李子欣,高范强,赵聪,等. 电力电子变压器技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2018,38(5):1274-1289.
LI Zixin, GAO Fanqiang, ZHAO Cong, et al. Research review of power electronic transformer technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1274-1289.
- [7] 季振东. 级联型电力电子变压器关键技术研究[D]. 南京:东南大学,2015.
JI Zhendong. Research on key techniques of cascaded power electronic transformer[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [8] GU Chunyang, ZHENG Zedong, XU Lie, et al. Modeling and control of a multiport power electronic transformer for electric traction applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 915-927.
- [9] 王旭斌,李鹏,窦鹏冲,等. 用于微网孤岛运行的新型功率控制方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):122-128.
WANG Xubin, LI Peng, DOU Pengchong, et al. Power control method for autonomous microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 122-128.
- [10] JIANG Zhenhua, YU Xunwei. Power electronics interfaces for hybrid DC and AC-linked microgrids[C]//IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference. Wuhan, China: IEEE, 2009: 730-736.
- [11] 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.
- [12] 兰征,涂春鸣,肖凡,等. 电力电子变压器对交直流混合微电网功率控制的研究[J]. 电工技术学报,2015,30(23):50-57.
LAN Zheng, TU Chunming, XIAO Fan, et al. The power control of power electronic transformer in hybrid AC-DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 50-57.
- [13] 黄佳佳. 用于电力电子变压器的双向全桥DC-DC变换器研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
HUANG Jiajia. Research on the bidirectional full-bridge DC-DC converter for power electronic transformer[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.

作者简介:



李俊杰

李俊杰(1995—),男,湖北黄冈人,硕士研究生,主要研究方向为分布式发电与微电网(E-mail: junjie.seu@outlook.com);

吴在军(1975—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为变电站自动化、分布式发电与微网、电能质量分析与控制(E-mail: zjwu@seu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

(下转第110页 continued on page 110)

[J]. 电力电子技术, 2012, 46(11): 90-92.

ZHANG Jingnan, ZHANG Junwei. Bi-directional DC/DC converter unit based on digital control[J]. Power Electronics, 2012, 46(11): 90-92.

[19] 王成山, 李霞林, 郭力. 基于功率平衡及时滞补偿相结合的双级式变流器协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 109-117.

WANG Chengshan, LI Xialin, GUO Li. Coordinated control of two-stage power converters based on power balancing and time-delay compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 109-117.

作者简介:



朱晓荣

朱晓荣(1972—),女,河北保定人,副教授,博士,主要研究方向为新能源并网技术、直流微网(E-mail: xiaorongzhu@ncepu.edu.cn);

陈朝迁(1994—),男,山东济南人,硕士研究生,主要研究方向为新能源发电及并网技术、直流微网(E-mail: chen225460@163.com)。

(编辑 李莉)

Voltage fluctuation suppression of DC distribution network based on controllable load and battery energy storage

ZHU Xiaorong, CHEN Chaoqian

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to suppress the voltage fluctuation in DC distribution network, a comprehensive control strategy based on controllable load and BESS (Battery Energy Storage System) is proposed. The factors influencing the DC voltage fluctuation are analyzed specifically, including the variation of distributed power output, load, line parameter and distributed power access location. When the voltage fluctuation is small, the controllable load can be used to suppress the DC voltage fluctuation, which can reduce the capacity of the battery and its charging and discharging times so as to improve the economy of BESS. When the voltage fluctuation is big, due to the limited capacity of the controllable load, the comprehensive control is required with BESS and their parameters are designed. The feedforward control based on disturbance observer is applied to reduce the DC voltage transient fluctuation. The model of DC distribution network is built with MATLAB/Simulink, and the time-domain simulative results show that the proposed comprehensive control strategy can suppress the DC voltage fluctuation caused by the above factors and improve the power quality of each node in DC distribution network.

Key words: DC distribution network; power quality; voltage fluctuation; controllable load; battery energy storage; parameter design; disturbance observer

(上接第87页 continued from page 87)

Power control and mode switching method of power electronic transformer in AC/DC hybrid microgrid

LI Junjie¹, WU Zaijun¹, YANG Shihui², LÜ Zhenyu¹, LIU Haijun², SHEN Yu³

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

3. State Grid Jibei Electric Power Company, Beijing 100053, China)

Abstract: The power control and mode switching method of power electronic transformer in AC/DC hybrid microgrid are proposed. For the islanded mode of AC/DC hybrid microgrid, a droop control method of surplus power is presented to guarantee the mutual support of AC/DC system. In order to realize seamless switching of power electronic transformer under different operation modes, the different operation modes are integrated into one function loop, so as to reduce the transient impact efficiently during the mode switching process. The simulative results show that the proposed power control strategy can not only avoid the over coupling of AC and DC buses, but also provide some mutual support for AC/DC hybrid microgrid. Moreover, the proposed mode switching method can improve the transient characteristics while maintaining the stability performance unchanged.

Key words: hybrid microgrid; power electronic transformer; droop control; mode switching; power control

附录

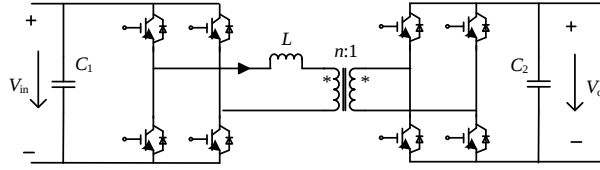


图 A1 DAB 电路拓扑结构

Fig.A1 Topology structure of DAB circuit

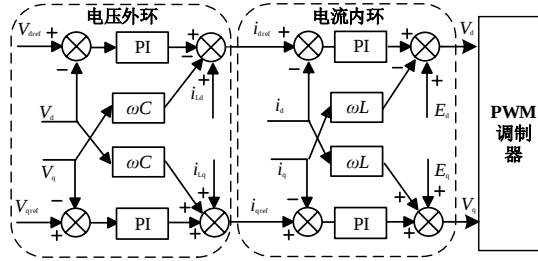


图 A2 VSI 恒压控制框图

Fig.A2 Constant voltage control block diagram of VSI

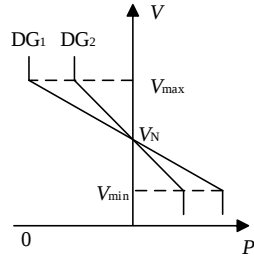


图 A3 储能系统的下垂特性

Fig.A3 Droop characteristics of battery system