

交直流混合微电网并联接口变换器的 VSG 控制策略 *

范广胜¹, 朱琳², 封洋燚³, 王鹏¹, 徐海瑞¹

(1. 东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室, 吉林 吉林 132012;

2. 国家能源投资集团有限责任公司邯郸热电厂, 河北 邯郸 056000;

3. 河北华电石家庄热电有限公司, 河北 石家庄 050000)

摘要: 针对传统的并联接口变换器控制策略存在功率分配精度低、惯性小以及循环功率等问题, 提出了交直流混合微电网并联接口变换器的虚拟同步发电机(VSG)控制策略。将小交流电压信号源注入到直流子网的 DC/DC 转换器中, 使直流子网的功率-电压下垂控制变为功率-频率下垂控制。将原本采集的局部母线直流电压变为全局直流叠加频率, 从而将直流子网的叠加频率与虚拟同步机的虚拟频率差值作为 VSG 的机械力矩。通过与传统控制策略的仿真结果对比分析, 验证了所提方法的有效性和优越性。

关键词: 虚拟同步发电机; 分配精度; 混合微电网; 接口变换器; 信号源; 叠加频率

中图分类号: TM 46; TM 715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2021)03-0068-07

doi: 10.12177/emca.2020.217

VSG Control Strategy of AC/DC Hybrid Microgrid Parallel Interfacing Converter *

FAN Guangsheng¹, ZHU Lin², FENG Yangyi³, WANG Peng¹, XU Hairui¹

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology,

Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Handan Power Plant of China Energy Investment Corporation, Handan 056000, China;

3. Hebei Huadian Shijiazhuang Thermal Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Aiming at the problems of low power distribution accuracy, small inertia and circulating power in the traditional control strategy of parallel interfacing converter, a virtual synchronous generator (VSG) control strategy for AC/DC hybrid microgrid parallel interfacing converter is proposed. A small AC voltage signal source is injected into the DC/DC converter of the DC subgrid, and the power-voltage droop control is changed into the power-frequency droop control. Then, the local bus DC voltage collected originally is changed into global DC superimposed frequency, and the difference between the superimposed frequency of DC subgrid and the virtual frequency of VSG is taken as the mechanical torque of VSG. By comparing the simulation results with the traditional control strategy, the effectiveness and superiority of the proposed method are verified.

Key words: virtual synchronous generator (VSG); distribution accuracy; hybrid microgrid; interfacing converter; signal source; superimposed frequency

收稿日期: 2020-12-07; 收到修改稿日期: 2021-01-15

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51607031)

作者简介: 范广胜(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交直流混合微电网接口变换器控制策略。

0 引言

随着微电网的大力发展,分布式电源(DG)在微电网中的渗透率逐渐增大^[1-3]。现有 DG 大多数属于直流型电源,同时越来越多的负载是需要直流供电而不是交流供电,通过直流微电网连接直流负载,可以减少电力电子元件的变换过程的能量损耗^[4-6]。然而,交流配电目前占主导地位,并且将持续数十年。因此,更可能的情况是同时存在直流子电网和交流子电网,以及电源、储能和负载之间的适当分布。可通过接口变换器将子电网连接在一起,形成交直流混合微电网^[7-9]。

由于交直流混合微电网的接口变换器能够实现整流模式、逆变模式、切换模式 3 大功能,相对于传统的交流微电网或者直流微电网来说,其控制方法比较复杂。目前常用的交直流混合微电网接口变换器的控制策略主要包括归一化下垂控制策略、双向下垂控制策略、虚拟同步发电机(VSG)控制策略等。

文献[10-12]提出归一化控制策略,分别从直流子网、交流子网中提取具有代表性的物理量即直流母线电压与交流母线频率,将两者输送到归一化公式中,进行量纲统一处理,并将两者归一化之后的差值输入到比例积分控制器,从而获得接口变换器传输有功功率的参考值,但是该控制策略应用在台并联的接口变换器时,各接口变换器之间会产生循环功率问题。文献[13]提出一种双向下垂控制策略,接口变换器采用有功-直流电压与有功-交流频率下垂控制策略,通过控制直流母线电压与交流母线频率的变化来功率的双向流动,然而,该控制策略应用在台并联的接口变换器时,各接口变换器之间的功率分配精度较低。文献[14]提出一种新型下垂控制策略,对交流频率、直流电压进行归一化处理,然后将处理的结果与功率-电压下垂控制、功率-频率下垂控制相结合,实现接口变换器之间的功率分配。但是,该控制策略仅适用于控制从直流侧到交流侧的功率流,并且没有任何机制可通过交流电源支持直流电网。文献[15]在文献[13]的基础上,提出了小交流信号注入接口变换器的控制方法。在该方法中,小交流信号的频率与接口变换器输出基波

电压的下垂偏置成下垂关系,可使变换器输出的电压和频率恢复到额定值附近,但是,并联接口变换器之间的功率分配精度较低,且在投切负荷的瞬间,直流母线电压与交流母线频率波动较大,不利于系统的稳定性。以上所采用的算法可归纳为:下垂控制策略为基础,几乎不能为交直流混合系统提供惯性。为此,文献[16]提出了交直流微电网中具有同步发电机特性的接口变换器的控制策略,该方法将同步发电机技术应用于接口变换器控制系统,通过模仿同步发电机来改善不良的动态直流电压与频率稳定性。但是,该控制策略应用在台并联的接口变换器时,各接口变换器之间同样会产生循环功率问题,以及并联接口变换器功率分配精度较低问题。

为了克服文献[10-12]的缺陷,在文献[15-16]的基础上,本文提出了交直流混合微电网并联接口变换器的 VSG 控制策略。该控制策略可以解决并联接口变换器循环功率问题,提高系统的惯性,实现了并联接口变换器按照各自容量比进行功率分配。最后,通过仿真,对比了所提控制策略与传统控制策略的控制效果。

1 归一化下垂控制策略的原理

归一化下垂控制策略控制框图^[10-12]如图 1 所示。该控制策略是将直流母线电压与交流母线频率代入对应的归一化公式,得到 2 个可进行数学运算的量。归一化的直流母线电压 $U_{dc,pu}$ 定义为

$$U_{dc,pu} = \frac{U_{dc} - 0.5(U_{max} + U_{min})}{0.5(U_{max} - U_{min})} \quad (1)$$

式中: U_{max} 、 U_{min} 分别为直流母线电压的最大值和最小值。

归一化的交流母线频率 $f_{ac,pu}$ 可定义为

$$f_{ac,pu} = \frac{f_{ac} - 0.5(f_{max} + f_{min})}{0.5(f_{max} - f_{min})} \quad (2)$$

式中: f_{max} 、 f_{min} 分别为交流母线频率的最大值与最小值。

交流母线频率与直流母线电压进行归一化处理之后,直流侧到交流侧的传输功率 P_{ic} 可表示为

$$P_{ic} = K_{ic}(U_{dc,pu} - f_{ac,pu}) \quad (3)$$

式中: K_{ic} 为接口变换器的下垂系数。

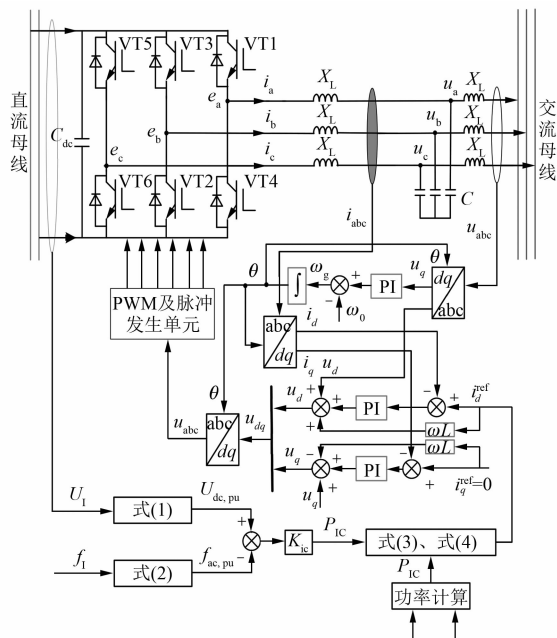


图1 归一化下垂控制策略控制框图

由式(3)可得出,如果交流侧的归一化频率值等于直流侧的归一化电压值,即 $U_{dc,pu} = f_{ac,pu}$,此时 $P_{ic} = 0$,功率不进行转移;如果直流负载增加,则 $U_{dc,pu}$ 减小,此时 $P_{ic} < 0$,功率应从交流子微网转移到直流子微网;如果交流负载增加,则 $f_{ac,pu}$ 减小,此时 $P_{ic} > 0$,功率应从直流子微网转移到交流子微网。

在 dq 参考坐标系中,传输有功功率计算式为

$$P_{ic} = \frac{3}{2} u_d i_d \quad (4)$$

式中: i_d 、 u_d 是接口变换器交流电流和电压的 d 轴分量。

结合式(3)和式(4),可得接口变换器的参考电流为

$$i_d^{ref} = \frac{2}{3} \frac{K_{ic}}{u_d} (U_{dc,pu} - f_{ac,pu}) \quad (5)$$

当交流负载或者直流负载变化较大时,单个接口变换器不足以传递足够的功率,此时应该增加接口变换器的数量,本文以并联接口变换器为例进行分析。交直流混合微电网采用2个接口变换器并联运行,如图2所示。会出现以下问题:

(1) 由于直流侧线路电阻的影响,不同接口变换器的直流端电压具有不相同的值,因此根据式(5),接口变换器无法分担与相应的下垂系数

成比例的负载。

(2) 由于直流侧线路电阻的影响,一个接口变换器的 $U_{dc,pu}$ 可能高于 $f_{ac,pu}$,而另一个接口变换器的 $U_{dc,pu}$ 可能低于 $f_{ac,pu}$ 。因此,一个接口变换器将有功功率从直流子微网传递到交流子微网,而另外一个则将功率从交流子微网传输到直流子微网,说明有功功率在交流子微网和直流子微网之间循环。循环功率将增加系统和接口变换器的损耗,占用接口变换器的容量并产生过应力问题。

(3) 归一化的下垂控制几乎不能为系统提供惯性。当系统负载发生变换时,瞬时波动较大,会对系统的稳定性造成一定得影响。

如果上述3个主要问题能够得到有效解决,交直流混合微电网系统的性能将会得到改善。

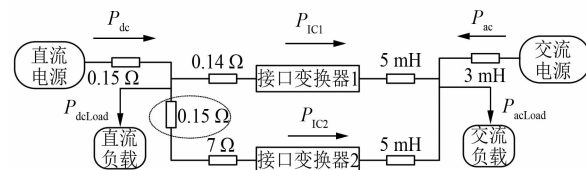


图2 混合微电网的简化拓扑图

2 基于VSG并联接口变换器的控制策略

2.1 消除直流侧线路电阻对接口变化器的影响

第1节中提到,直流侧线路电阻对并联接口变化器影响较大。要想消除影响,应将局部母线直流电压变为全局直流叠加频率^[17-19]。文献[17-19]从概念上解释了直流频率下垂控制方法,但是局限于直流微电网的功率分配控制。本文受文献[17-19]的启发,设计了将小交流电压信号源注入DC/DC转换器中,相当于在直流DC/DC转换器的电压上叠加一个直流频率,其中直流频率与相应的输出功率成比例。因此,转换器与基于叠加频率的下垂方法一起被协调。此外,因为注入的叠加频率对于接口变换器均具有相同的值,所以接口变换器将不受直流侧线路电阻的影响。

DC/DC转换器的频率下垂控制如图3所示。在直流电压上加一个小交流电压信号源,其频率与相应的输出功率成正比,满足如下方程:

$$f_{dc} = f_{max} - K_{dc} P_{dc} \quad (6)$$

式中: f_{dc} 为直流叠加频率; K_{dc} 为下垂系数; f_{max} 为空载时的最大频率。

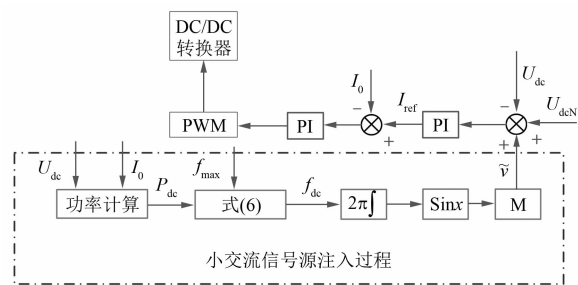


图3 DC/DC 转换器的频率下垂控制

2.2 系统惯量补充

第 1 节中提到了传统的归一化控制策略在交直流侧负荷变化的瞬间,几乎不能为系统提供一定的惯量和缓冲时间,对系统冲击较大,可能损坏设备。为了解决这个问题,文献[16]提出在交直流微电网中具有同步发电机特性的接口变换器的控制策略,为交直流混合系统提供了一定的惯量,本文采用了类似的思想,对系统的惯量进行补充。但是如果能与 2.1 节所提基于频率叠加的控制方法结合起来,系统性能会进一步得到完善。根据归一化控制策略思路,将直流子网的叠加频率与虚拟同步机的虚拟频率差值作为 VSG 的机械力矩,不但为系统提供了一定的惯量,而且解决了循环功率问题,最终实现各接口变换器按额定容量传输有功功率。

本文最终提出的交直流混合微电网并联接口变换器的 VSG 控制策略控制框图如图 4 所示。

该控制策略需要用到如下数学方程:

$$f_{\text{dc_pu}} = \frac{f_{\text{dc}} - 0.5(f_{\text{max}} + f_{\text{min}})}{0.5(f_{\text{max}} - f_{\text{min}})} \quad (7)$$

$$f_{\text{pui}} = \frac{f_i - 0.5(f_{\max} + f_{\min})}{0.5(f_{\max} - f_{\min})} \quad (8)$$

$$J_i \omega_N \frac{d\omega_i}{dt} = K_{P,i} (f_{dc,pu} - f_{pu1}) - P_{IC,i} \quad (9)$$

$$E_i = E_0 + K_{\text{F}}(U_{\text{N}} - U_{\text{g}}) \quad (10)$$

式中: J_i 为转动惯量; ω_N 为额定频率; $K_{P,i}$ 为功率误差增益; $P_{IC,i}$ 为传输功率值; E_i 为虚拟电动势; K_E 为交流母线电压误差增益; U_N 为额定交流电压有效值; U_e 为交流母线电压有效值。

功率误差增益应满足:

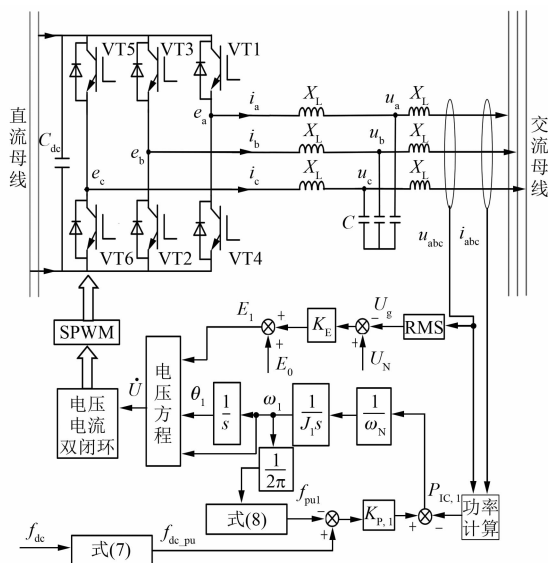


图 4 基于 VSG 的 IC 控制策略

$$\frac{K_{p,i}}{K_{p,2}} = \frac{S_1}{S_2}, \quad i,j = 1,2 \quad (11)$$

稳定情况下 $d\omega_i/dt=0$, 即:

$$P_{\text{IC},i} = K_{\text{P},i}(f_{\text{dc pu}} - f_{\text{pu1}}) \quad (12)$$

由于所有的接口变换器均并联在相同的交流母线上,则稳态时虚拟频率的测量值相等,即:

$$f_{pu1} = f_{pu2} \quad (13)$$

由于小交流信号电压源的注入,使 $f_{\text{dc_pu}}$ 在直流微网中成为全局变量,即:

$$f_{\text{dc pu1}} = f_{\text{dc pu2}} \quad (14)$$

联立式(11)~式(14)可得:

$$\frac{P_{\text{IC},i}}{P_{\text{IC},j}} = \frac{K_{\text{P},i}}{K_{\text{P},j}} = \frac{S_i}{S_j}, \quad i, j = 1, 2 \quad (15)$$

式中: S_i 为各接口变换器额定容量。

由式(15)可知:稳定状态下各 IC 传输的有功功率之比近似等于其额定容量之比。

3 仿真分析

利用 MATLAB/Simulink 软件,搭建交直流混合微网并联接口变换器的仿真平台,仿真参数如表 1 所示。

微电网的运行方式主要有 2 种:并网模式与孤岛模式。在孤岛模式下对接口变换器采用传统控制策略以及本文所提出的控制策略进行仿真分析。

表 1 仿真参数

参数名称	参数值
IC1 额定容量/kW	3
IC2 额定容量/kW	1.5
$K_{P,1}$	500
$K_{P,2}$	250
$C_{dc}/\mu F$	500
K_E	3
$J_1/(kg \cdot m^2)$	0.76
$J_2/(kg \cdot m^2)$	1.52
U_{dcN}/V	400
U_N/V	220
小交流电压源/V	2.5
f_N/Hz	50
交、直流侧的额定容量/kW	10

逆变模式下仿真结果如图 5~图 9 所示。

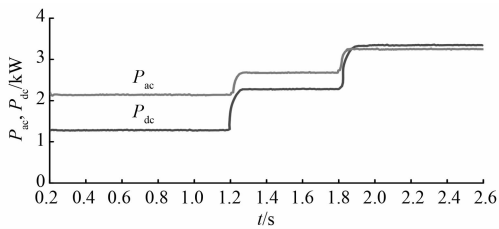


图 5 逆变模式下交、直流电源发出的功率

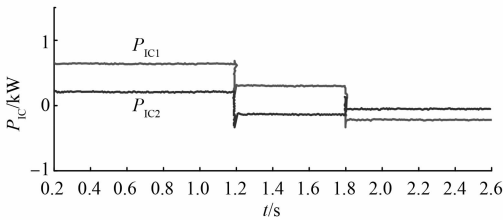


图 6 逆变模式下接口变换器的传输功率

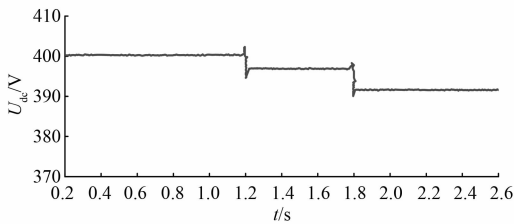


图 7 逆变模式下直流母线电压的变化情况

在 0.2~1.2 s 时间段,交直流混合微电网中直流负载为 0.5 kW,交流负载为 3 kW,直流电源发

出 1.37 kW 的有功功率,交流电源发出 2.125 kW 有功功率,如图 5 所示。接口变换器 1 与接口变换器 2 分别从直流侧向交流侧传递 663、210 W 功率;直流电压稳定在约 399 V,接口变换器 1 的直流端口电压的归一化值、交流母线频率的归一化值、接口变换器 2 的直流端口电压的归一化值的大小关系: $U_{dc1}>U_{dc2}>f_{ac}$ 。

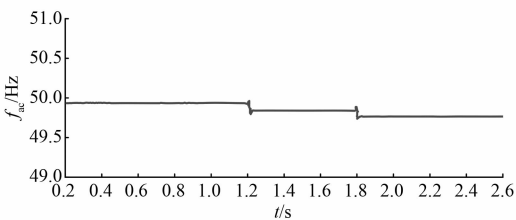


图 8 逆变模式下交流母线频率的变化情况

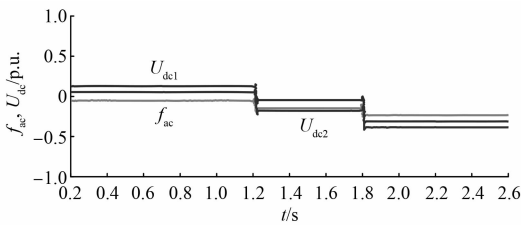


图 9 逆变模式下参数归一化值的比较

接口变换器 1 与接口变换器 2 的额定容量比为 2:1,按照前文的理论分析可得出:二者的传输有功功率之比应为 2:1,而实际接口变换器 1 与接口变换器 2 传输有功功率之比为 663:210 $\approx$ 3:1。说明直流侧线路电阻不同,接口变换器的端电压不同,导致并联接口变换器的有功功率分配精度较低。同时,根据 $U_{dc1}>U_{dc2}>f_{ac}$,判断并联接口变换器处于逆变模式。

在 1.2~1.8 s 时间段,交直流混合微电网中直流负载为 2 kW,交流负载为 3 kW,直流电源发出 2.24 kW 的有功功率,交流电源发出 2.75 kW 的有功功率;接口变换器 1 与接口变换器 2 分别由直流侧向交流侧传递 352、-110 W 有功功率,直流电压变为约 397 V,接口变换器 1 的直流端口电压的归一化值、交流母线频率的归一化值、接口变换器 2 的直流端口电压的归一化值的大小关系为 $U_{dc1}>f_{ac}>U_{dc2}$ 。

接口变换器 1 与接口变换器 2 传输的有功功率分别为 352、-110 kW,对应逆变模式与整流模

式,比值近似为 3:1,说明直流侧线路电阻不同,接口变换器的端电压不同,导致并联接口变换器之间产生了循环功率。循环功率不但降低了并联接口变换器的有功功率分配精度,而且增加接口变换器的损耗,缩短接口变换器的寿命,并占用接口变换器的容量。

在 1.8~2.6 s 时间段,交直流混合微电网中直流负载变为 3.5 kW,交流负载为 3 kW,直流电源发出 3.26 kW 的有功功率,交流电源发出 3.24 kW 的有功功率,接口变换器 1 与接口变换器 2 分别由交流侧向直流侧传递 -180、-56.25 W 的有功功率,直流电压约为 391.5 V,接口变换器 1 的直流端口电压归一化值、交流母线频率的归一化值、接口变换器 2 的直流端口电压的归一化值的关系:

$$f_{ac} > U_{dc1} > U_{dc2} \circ$$

接口变换器 1 与接口变换器 2 传输有功功率之比为 -180:-56.25 $\approx$ 3:1,且均处于整流模式。说明直流侧线路电阻不同,接口变换器的端电压不同,导致有功功率分配精度较低。

观察图 6~图 8 的拐点处可知,负载变化会导致直流母线电压、交流母线频率存在骤降状态,同时传输功率存在一定的超调量。

整流模式下仿真结果如图 10~图 14 所示。

在 0.2~1.2 s 时间段,交直流混合微电网中直流负载为 0.5 kW,交流负载为 3 kW,直流电源发出 1.4 kW 的有功功率,交流电源发出 2.13 kW 的有功功率,如图 10 所示。接口变换器 1 与接口变换器 2 分别由直流侧向交流侧传递 581、291 W 的有功功率,直流电压稳定在约 400 V,接口变换器的直流端口频率的归一化值、交流母线频率的归一化值的大小关系为 $f_{dc} > f_2 = f_1$ 。

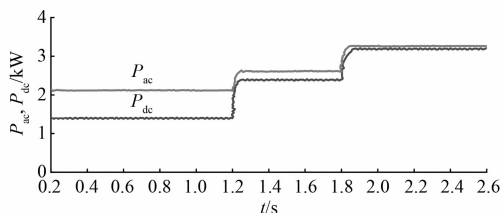


图 10 整流模式下交、直流电源发出的功率

接口变换器 1 与接口变换器 2 的额定容量比为 2:1,按照前面的理论分析可以得出:二者的传输有功功率之比为 2:1,而此时实际接口变换器 1

与接口变换器 2 传输有功功率之比为 581:291 $\approx$ 2:1,且二者均为逆变模式。说明所提控制策略消除了直流侧线路电阻的影响,提高了并联接口变换器的有功功率分配精度。

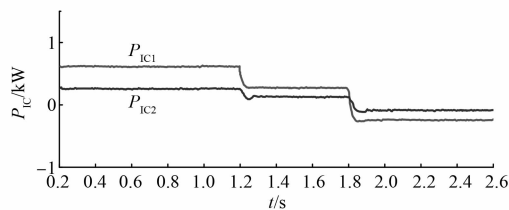


图 11 整流模式下接口变换器的传输功率

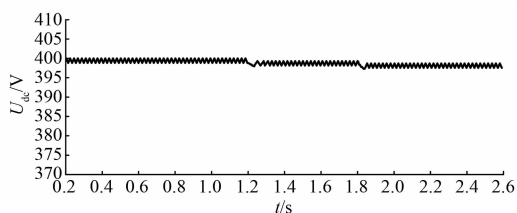


图 12 整流模式下直流母线电压的变化情况

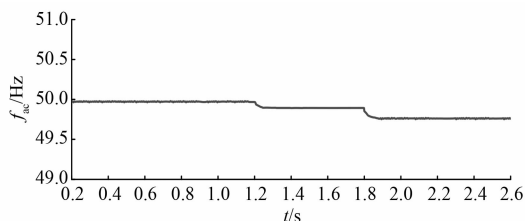


图 13 整流模式下交流母线频率的变化情况

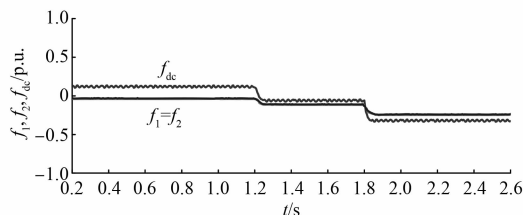


图 14 整流模式下参数归一化值的比较

在 1.2~1.8 s 时间段,交直流混合微电网中直流负载为 2 kW,交流负载为 3 kW,直流电源发出 2.38 kW 的有功功率,交流电源发出 2.62 kW 的有功功率,接口变换器 1 与接口变换器 2 分别由直流侧向交流侧传递 250、125 W 的有功功率,直流电压约为 398 V,接口变换器 1 的直流端口频率的归一化值、交流母线频率的归一化值的大小关系为 $f_{dc} > f_2 = f_1$ 。

接口变换器 1 与接口变换器 2 传输有功功率

之比为 $250:125 \approx 2:1$, 且处于逆变模式。说明所提控制策略消除了直流侧线路电阻的影响, 解决了并联接口变换器之间的循环功率问题, 并且提高了并联接口变换器的有功功率分配精度, 减少了系统和接口变换器的损耗, 提高了接口变换器的寿命。

在 $1.8 \sim 2.6$ s 时间段, 交直流混合微电网中直流负载变为 3.5 kW, 交流负载为 3 kW, 直流电源发出 3.24 kW 的有功功率, 交流电源发出 3.3 kW 的有功功率, 接口变换器 1 与接口变换器 2 分别向交流侧传递 -180、-90 W 有功功率, 直流电压为 397.5 V 左右, 接口变换器 1 的直流端口频率归一化值、交流母线频率的归一化值的大小关系为 $f_2 = f_1 > f_{dc}$ 。

接口变换器 1 与接口变换器 2 传输有功功率之比为 $-180:-90 \approx 2:1$, 且均处于整流模式。说明所提控制策略已经消除了直流侧线路电阻的影响, 提高了并联接口变换器有功功率分配精度。

观察图 11~图 13 可知, 采用所提控制策略时, 电压值一直稳定在额定值附近, 交流母线频率可以较为平滑的恢复到稳态, 并且不存在电压或者频率骤降状态, 同时传输功率也能够平滑的恢复到稳态, 提高了系统的稳定性能。

4 结 语

本文总结了传统的归一化控制方法存在功率分配精度低、循环功率、惯量不足等问题, 并且分析了问题产生的原因。针对这些原因, 提出了交直流混合微电网并联接口变换器的 VSG 控制策略。最后通过仿真, 验证了所提算法的有效性。得出以下结论:

(1) 所提控制策略能够消除直流侧线路电阻对并联接口变换器的影响, 提高并联接口变换器的功率分配精度。

(2) 所提控制策略能够消除直流侧线路电阻对并联接口变换器的影响, 解决接口变化器之间的循环功率问题, 并且提高了并联接口变换器的有功功率分配精度, 减少了系统和接口变换器的损耗, 从而提高接口变换器的寿命。

(3) 所提控制策略能够在负荷变化时为系统提供一定的惯量, 不但使频率、电压在所允许的范围内波动, 而且实际电压值在额定值附近。

【参 考 文 献】

- [1] SUN Q, HAN R, ZHANG H, et al. A multiagent-based consensus algorithm for distributed coordinated control of distributed generators in the energy internet [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 3006.
- [2] LAI J, LU X, MONTI A, et al. Event-driven distributed active and reactive power dispatch for CCVSI-based distributed generators in AC microgrids [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(3): 3125.
- [3] 施静容, 李勇, 贺悝, 等. 一种提升交直流混合微电网动态特性的综合惯量控制方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 337.
- [4] BARAN M E, MAHAJAN N R. DC distribution for industrial systems: opportunities and challenges[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(6): 1596.
- [5] SALOMONSSON D, SANNINO A. Low-voltage DC distribution system for commercial power systems with sensitive electronic loads[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1620.
- [6] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2.
- [7] 朱永强, 贾利虎, 蔡冰倩, 等. 交直流混合微电网拓扑与基本控制策略综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2756.
- [8] 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.
- [9] SAU-BASSOLS J, ZHAO Q, GARCIA-GONZALEZ J, et al. Optimal power flow operation of an interline current flow controller in a hybrid AC/DC meshed grid [J]. Electric Power Systems Research, 2019, 177: 105935.
- [10] WANG J, JIN C, WANG P. A uniform control strategy for the interlinking converter in hierarchical controlled hybrid AC/DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6188.
- [11] GUERRERO J M, LOH P C, LEE T L, et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids—Part II: power quality, energy storage, and AC/DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1263.

(下转第 80 页)

- [3] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760.
- [4] 杨晓峰, 林智钦, 郑琼林, 等. 模块组合多电平变换器的方波脉冲循环调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(9): 42.
- [5] 魏晨华, 杨岩, 谢阳, 等. 模块化多电平变换器关键问题研究综述[J]. 电子设计工程, 2014, 22(6): 182.
- [6] 何梨梨, 帅智康, 单佳佳. MMC 的多载波调制策略对比分析[J]. 电源学报, 2019, 17(5): 56.
- [7] 李彬彬, 周少泽, 徐殿国. 模块化多电平变换器与级联 H 桥变换器在中高压变频器应用中的对比研究[J]. 电源学报, 2015, 13(6): 9.
- [8] 徐殿国, 李彬彬, 周少泽. 模块化多电平高压变频技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 104.
- [9] SHE X, HUANG A Q. Circulating current control of double-star chopper-cell modular multilevel converter for HVDC system [C] // IECON 2012—38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012.
- [10] 陈耀军, 陈柏超, 钟炎平, 等. 模块化多电平变换器全电平产生原理及电容均压策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 126.
- [11] 许建中, 李钰, 陆锋, 等. 降低 MMC 子模块电容电压纹波幅值的方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 571.
- [12] 冯志国, 葛曼玲, 陈玉民. 模块化多电平换流器的环流抑制方法研究[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(10): 48.
- [13] 屠卿瑞, 徐政, 郑翔, 等. 一种优化的模块化多电平换流器电压均衡控制方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 15.
- [14] 屠卿瑞, 徐政, 郑翔, 等. 模块化多电平换流器型直流输电内部环流机理分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 547.
- [15] SAEEDIFARD M, IRAVANI R. Dynamic performance of a modular multilevel back-to-back HVDC system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2903.
- [16] 刘钟淇, 宋强, 刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 53.
- [17] 陆翌, 王朝亮, 彭茂兰, 等. 一种模块化多电平换流器的子模块优化均压方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 52.
- [18] 石绍磊, 李彬彬, 张毅, 等. 模块化多电平型高压 DC/DC 变换器的研究[J]. 电源学报, 2015, 13(6): 110.
- [19] TU Q, XU Z, XU L. Reduced switching-frequency modulation and circulating current suppression for modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 2009.

(上接第 74 页)

- [12] HEMA V K, DHANALAKSHMI R. Power sharing of an autonomous hybrid microgrid with an interlinking converter [C] // IET Chennai Fourth International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2013), 2013.
- [13] 高泽, 杨建华, 季宇, 等. 交直流混合微电网接口变换器双向下垂控制[J]. 南方电网技术, 2015, 9(5): 82.
- [14] XIAO H, LUO A, SHUAI Z, et al. An improved control method for multiple bidirectional power converters in hybrid AC/DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 340.
- [15] 张学军, 许博, 张一非, 等. 基于小交流信号注入的接口变换器二次控制方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(18): 141.
- [16] QI G, CHEN A, CHEN J. Improved control strategy of interlinking converters with synchronous generator characteristic in islanded hybrid AC/DC microgrid [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2017, 2(2): 149.
- [17] PEYGHAMI S, MOKHTARI H, LOH P C, et al. Distributed primary and secondary power sharing in a droop-controlled LVDC microgrid with merged AC and DC characteristics [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 2284.
- [18] PEYGHAMI S, DAVARI P, MOKHTARI H, et al. Synchronverter-enabled DC power sharing approach for LVDC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(10): 8089.
- [19] PEYGHAMI S, MOKHTARI H, BLAABJERG F, et al. Decentralized load sharing in a low-voltage direct current microgrid with an adaptive droop approach based on a superimposed frequency [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(3): 1205.