

交直流混合微电网互联变换器功率流动的柔性控制策略

施静容, 李 勇, 王姿雅, 贺 隼, 曹一家

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:针对交直流混合微电网系统间功率动态平衡以及分布式电源利用率不高的问题,提出一种适用于混合微电网互联变换器功率流动的柔性控制策略,所提策略无需通信且可灵活分配功率。首先,对交流子微电网与直流子微电网所连分布式电源采用的下垂控制方式进行详细的分析。然后,针对互联变换器需维持交流微电网侧频率与直流母线电压的稳定以及功率双向传输的特点,对混合微电网交直流接口的虚拟惯性进行分析,推导出交流频率与直流电压之间的线性耦合关系,以实现交直流两侧功率的相互支撑。最后,在DIG-SILENT软件上建立典型的交直流混合微电网模型,验证了所提互联变换器功率控制方法的有效性。仿真结果表明,在离网情况下采用所提控制策略时,互联变换器可较好地维持交直流两侧功率平衡并提升电能质量,充分利用了分布式电源的功率调节能力。

关键词:交直流混合微电网;互联变换器;功率控制;下垂控制;虚拟惯性

中图分类号:TM 727;TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.016

0 引言

由于分布式电源 DG (Distributed Generation) 大多为清洁、可再生能源,满足目前社会对环境保护的需求,所以越来越多的 DG 被广泛应用,且 DG 更多以微电网的形式接入配电网^[1-2]。微电网的结构主要分为交流微电网、直流微电网、交直流混合微电网(下文中简称混合微网)。其中混合微网综合了不同类型微电网的优势,可以满足各类交直流负荷的要求,实现系统间功率双向流动,运行于并网或孤岛模式。因此,混合微网将成为未来 DG 接入配电网的主要形式^[3-4]。

混合微网从架构上看主要由交流微电网、直流微电网以及互联变换器 IC (Interlinking Converter) 组成。IC 在维持两侧交直流子网的功率平衡中有着十分重要的作用,其不仅要管理两侧子网的功率流动,协调控制交直流子网的能量传输,而且对于两侧子网而言,IC 在某一时刻可同时呈现电源与负荷特性,当离网运行时还需要维持系统电压与频率的稳定^[5-8]。

目前,针对 IC 的控制大多采用以下的传统变换器控制方式:恒功率控制、下垂控制、电压-频率控制^[9-10]等。此类控制方式简单但仅考虑了直流微电网侧电压波动对混合微网的影响,并未考虑交流侧频率变化对系统稳定性的影响。为了综合考虑两侧交直流子网的电网特性,对于 IC 的控制,文献[11-

12]基于典型的混合微网结构,利用标么化思想将交流侧与直流侧的下垂特性统一起来对 IC 进行控制,且文献[12]对 IC 的工作区间进行分段,设置误差动作阈值,减少了 IC 的频繁切换。但对于多台 IC 并联的情况,该策略存在一定的局限性,此外有名值单位化再到有名值转化的过程,所要求的计算量较大。为了实现直流微电网并网时功率的双向流动,文献[13]设定了直流母线电压变化范围上下界以实现直流电压的分段控制,进而控制 IC 的工作模式。文献[14]提出双下垂控制策略,组成 $V_{dc}-f-P$ 的下垂特性,但该策略下 IC 对于直流负荷波动响应不明显,不具备调节直流侧电网功率的能力。此外,为了较好地维持交流侧电压、频率稳定以及直流侧电压稳定,文献[15-16]均采用前向欧拉逼近法,推导出交流网侧与直流网侧的下垂关系,实现对 IC 的控制。但两者不同之处在于前者考虑逆变器输出阻抗与线路阻抗都呈现阻性状态,建立了关于交流微电网电压与有功($V_{ac}-P$),频率与无功($f-Q$)的下垂特性;后者考虑逆变器输出阻抗和线路阻抗都为感性状态,建立了交流微电网频率与有功($f-P$),电压与无功($V_{ac}-Q$)的下垂特性。

上述文献在对 IC 进行控制时,从控制器或能量管理的角度实现了交直流微电网之间功率的双向流动,但未综合考虑交/直流系统各自的功率运行特征。基于此,本文对混合微网 IC 交直流接口的虚拟惯性、虚拟电容特性进行分析,推导出交流网侧频率与直流网侧电压的数学关系,使得交直流微电网间可以实现功率的相互支撑,提升混合微网整体运行鲁棒性。该策略无需通信,在实现功率互补的同时,可使得交流网侧频率与直流网侧电压变化在允许范围内,且最大化利用 DG 的功率调节能力。

收稿日期:2017-11-15;**修回日期:**2018-09-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51520105011);湖南省科技重大专项(2015GK1002)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51520105011) and the Key S&T Special Project of Hunan Province(2015GK1002)

1 混合微网的结构以及子网的控制

1.1 混合微网的结构

典型的混合微网结构拓扑如图 1 所示,其由交流微电网、直流微电网以及 IC 组成。

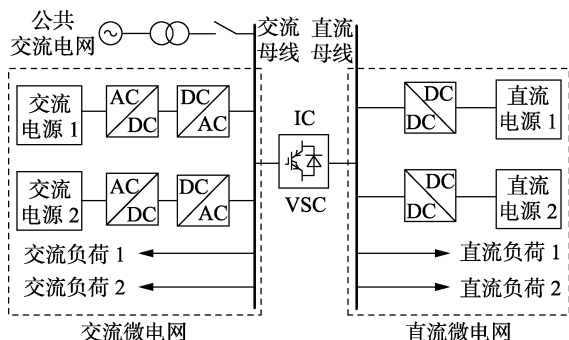


图 1 混合微网结构图

Fig.1 Structure diagram of AC/DC hybrid microgrid

由图 1 可以看出,交流微电网、直流微电网由交流直流负荷与常规 DG 组成,各 DG 分别通过 DC/AC、AC/DC 或 DC/DC 接口变换器连接到交/直流母线。混合微网经交流侧的电力变压器接入公共交流电网。本文采用电压源型换流器 VSC (Voltage Source Converter) 作为混合微网的 IC^[17],其主要作用是连接不同类型的微电网,并为交直流微电网间的功率双向流动提供通道。

1.2 交流子网运行控制策略

本文中交流子微电网功率控制采用经典的下垂控制策略,其无需通信系统,在给定的下垂系数作用下,可实现功率在 DG 间的按比例分配,满足微电网电源即插即用的需求。对于交流微电网系统,DG 有功出力基于 $f-P$ 下垂特性,当频率增大(减小)时,减少(增加)DG 的出力。无功分配基于 $V_{ac}-Q$ 下垂特性,DG 的无功出力由系统负载变化引起的母线电压偏差值决定。将上述 $f-P$ 、 $V_{ac}-Q$ 数学特性描述如下:

$$P_{ac}^{ref} = -\frac{1}{k_{ac}}(f_n - f) + P_{ac}^0 \quad (1)$$

$$Q_{ac}^{ref} = -\frac{1}{k_q}(V_{ac}^0 - V_{ac}) + Q_{ac}^0 \quad (2)$$

其中, P_{ac}^{ref} 、 Q_{ac}^{ref} 和 P_{ac}^0 、 Q_{ac}^0 分别为有功、无功功率参考值和有功、无功功率额定值; f 、 V_{ac} 和 f_n 、 V_{ac}^0 分别为交流母线频率、电压实际值和交流母线频率、电压额定值; k_{ac} 、 k_q 分别为频率、电压的下垂系数,其计算公式如式(3)所示。

$$\begin{cases} k_{ac} = -\frac{f_n - f_{min}}{P_{ac}^{max} - P_{ac}^0} \\ k_q = -\frac{V_{ac}^0 - V_{ac}^{min}}{Q_{ac}^{max} - Q_{ac}^0} \end{cases} \quad (3)$$

其中, P_{ac}^{max} 、 Q_{ac}^{max} 分别为频率下降到允许的最小值 f_{min} 时 DG 允许输出的最大有功功率、电压下降到允许的最小值 V_{ac}^{min} 时 DG 允许输出的最大无功功率。

1.3 直流子网运行控制策略

与交流微电网相比,直流微电网不需要考虑频率以及无功功率的问题,DG 的 $V_{dc}-P$ 下垂特性为:

$$P_{dc}^{ref} = -\frac{1}{k_{dc}}(V_{dc}^0 - V_{dc}) + P_{dc}^0 \quad (4)$$

其中, P_{dc}^{ref} 、 P_{dc}^0 分别为 DG 有功功率参考值、额定值; V_{dc}^0 、 V_{dc} 分别为直流母线电压额定值、实际值; k_{dc} 为下垂系数,其计算公式如式(5)所示。

$$k_{dc} = -\frac{V_{dc}^0 - V_{dc}^{min}}{P_{dc}^{max} - P_{dc}^0} \quad (5)$$

其中, P_{dc}^{max} 为直流母线电压下降到允许最小电压 V_{dc}^{min} 时,DG 允许输出的最大有功功率。

交/直流子网运行控制中频率-有功功率、交流电压-无功功率和直流电压-有功功率的下垂特性曲线如图 2 所示。

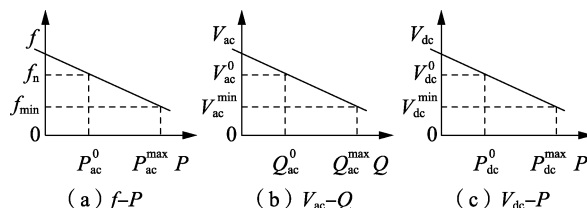


图 2 下垂特性曲线

Fig.2 Curves of droop characteristic

2 IC 的柔性控制策略

2.1 交直流断面功率平衡特性分析

对于交流系统,其功率平衡由发电机组的机械-电磁功率特性方程表征^[18]:

$$\frac{T_J}{\omega_n} \frac{d\omega}{dt} = P_T - P_E \quad (6)$$

$$\begin{cases} T_J = 2W_K / S_B \\ \omega_n = 2\pi f_n \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)得:

$$\frac{T_J}{f_n} \frac{df}{dt} = P_T - P_E \quad (8)$$

其中, W_K 为额定转速时转子动能; S_B 为功率基准值; T_J 为发电机的惯性时间常数; P_T 为原动机输入的机械功率; P_E 为发电机输出的电磁功率。

对于直流系统,其功率平衡由母线电容电压变化表征:

$$\frac{C_{dc} V_{dc}}{S_{VSC}} \frac{dV_{dc}}{dt} = P_1 - P_2 \quad (9)$$

其中, C_{dc} 为直流侧电容; S_{VSC} 为 IC 的额定容量; P_1 、

P_2 分别为直流电容等效输入功率、输出功率,其计算均采用标么值。

当功率由直流微电网经 IC 流入交流微电网时,此时直流微电网相当于交流微电网的电源端,同时 IC 工作于逆变状态,为交流系统提供功率及惯量支撑,相当于虚拟同步发电机^[19],如图 3(a)所示;当功率由交流微电网经 IC 流入直流微电网时,此时交流微电网相当于直流微电网的电源端,同时 IC 工作于整流状态,为直流系统提供功率及电压支撑,相当于虚拟电容器,如图 3(b)所示。由以上分析可见,IC 可根据需要改变自身运行状态及功率方向,由功率平衡可联立式(8)和式(9)得到:

$$\frac{T_{J,vir}}{f_n} \frac{df}{dt} = \frac{C_{vir} V_{dc}}{S_{VSC}} \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (10)$$

其中, $T_{J,vir}$ 、 C_{vir} 分别为虚拟惯性时间常数、虚拟电容值。由物理特征可知, $T_{J,vir}$ 表征了 IC 作为虚拟同步发电机的调频支撑能力,而 C_{vir} 则表征了 IC 作为直流微电网侧虚拟电容器维持直流母线电压的能力。

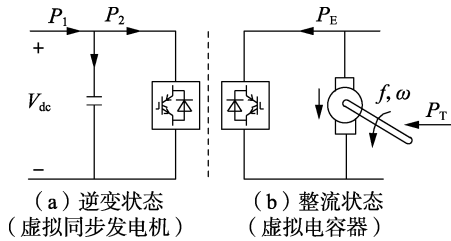


图 3 交直流断面功率等效关系

Fig.3 Equivalent relationship of AC/DC interface power

对式(10)两边同时积分得:

$$\frac{T_{J,vir}}{f_n} (f - f_n) = \frac{C_{vir}}{2S_{VSC}} (V_{dc}^2 - V_{dc,ref}^2) \quad (11)$$

$$V_{dc} = \sqrt{\beta(f - f_n) + V_{dc,ref}^2} \quad (12)$$

$$\beta = \frac{2T_{J,vir}S_{VSC}}{f_n C_{vir}} \quad (13)$$

其中, $V_{dc,ref}$ 为直流侧电压参考值;式(12)表示 IC 交流网侧频率与直流网侧电压耦合变化的关系。对式(12)进行泰勒展开,考虑到交流网频率变化一般较小,故舍弃频率变化量的高次项,可得:

$$V_{dc} = V_{dc,ref} + k_\beta(f - f_n) \quad (14)$$

$$k_\beta = \frac{\beta}{2V_{dc,ref}} \quad (15)$$

式(14)给出了基于虚拟惯量与虚拟电容特性的交流频率与直流电压的线性耦合关系。由式(14)可知,通过耦合映射关系,当交流频率发生波动时,其可等效生成虚拟直流电压变化量,控制直流微电网输出功率对交流微电网的功率波动进行补偿;当直流微电网发生电压波动时,可对应生成虚拟

交流频率变化量,从而控制交流微电网输出功率补偿直流微电网的功率需求。2.2 节将基于此详细阐述本文所提控制策略。

2.2 IC 柔性功率控制策略

2.2.1 交流微电网频率波动

本节将分析考虑交流微电网发生频率波动时,直流微电网进行功率支撑的情况。

当交流微电网侧功率不足时,交流频率将持续跌落。通过采集交流频率,由式(14)得到虚拟直流电压变化量 $\Delta V_{dc}^{vir} = k_\beta(f - f_n)$,则直流电压参考值为:

$$V_{dc,ref} = V_{dc} - \Delta V_{dc}^{vir} \quad (16)$$

将式(16)代入式(4),得到直流微电网需向交流微电网补偿的有功功率 $P_{dc,ref}$ 为:

$$P_{dc,ref} = \frac{1}{k_{dc}} \Delta V_{dc}^{vir} + P_{dc}^0 = \frac{\beta}{2k_{dc} V_{dc,ref}} (f - f_n) + P_{dc}^0 \quad (17)$$

由式(17)及 β 的定义可知,当交流微电网频率发生波动时,直流微电网需向交流微电网补偿的功率 $P_{dc,ref}$ 与虚拟惯量 $T_{J,vir}$ 的大小及交流频率变化量 Δf 有关,三者之间的关系如图 4 所示。可见,随着交流侧频率变化量的增加,直流微电网通过 IC 对交流微电网的功率支撑量相应变大。此时,IC 工作于逆变模式,相当于虚拟同步发电机;随着惯性系数增大,直流微电网向交流侧补偿的功率增加。

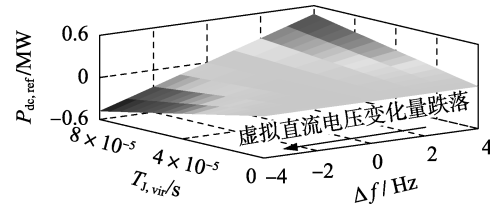


图 4 直流补偿交流功率与虚拟惯量、交流频率变化量的关系

Fig.4 Curve of DC compensation AC power vs. virtual inertia and AC frequency variation

2.2.2 直流微电网侧直流电压波动

本节将分析考虑直流微电网侧直流电压波动时,交流微电网进行功率支撑的情况。

当直流微电网侧功率不足时,直流母线电压将持续跌落。通过采集直流母线电压,由式(14)得到虚拟频率变化量 $\Delta f_{vir} = (V_{dc,ref} - V_{dc})/k_\beta$,则交流频率参考值为:

$$f_n = \Delta f_{vir} + f \quad (18)$$

此时,在交流频率-直流电压耦合关系式中取虚拟惯量 $T_{J,vir}$ 为交流网侧等效惯性时间常数 T_J ,而虚拟电容的取值与虚拟交流频率变化量将直接影响交流微电网补偿直流侧功率的大小。将式(18)代入式(1)得到交流微电网补偿直流微电网侧功率 $P_{ac,ref}$ 为:

$$P_{ac,ref} = -\frac{1}{k_{ac}} \Delta f_{vir} + P_{ac}^0 = -\frac{2V_{dc,ref}}{k_{ac}\beta} (V_{dc,ref} - V_{dc}) + P_{ac}^0 \quad (19)$$

由式(19)及 β 的定义可知,随着直流电压变化量的增加,交流微电网通过 IC 对直流微电网的功率支撑量相应变大。

交流网侧补偿直流侧功率与虚拟电容、直流电压变化量之间的关系,如图 5 所示,图中直流电压变化量 ΔV_{dc} 为标么值。可见此时,IC 处于整流状态,相当于虚拟电容器,随着虚拟电容值的增大,交流微电网向直流传输功率增大。

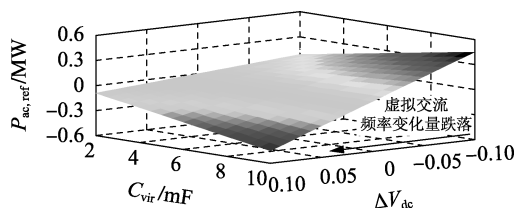


图 5 交流补偿直流功率与虚拟电容、直流电压变化量的关系

Fig.5 Curve of AC compensation DC power vs. virtual capacitor and DC voltage variation

IC 的综合控制采用功率电流双环控制,规定有功功率正方向为直流侧流向交流侧。其中,交流微电网与直流微电网之间传输功率参考值 P_{ref} 的控制框图如图 6 所示。

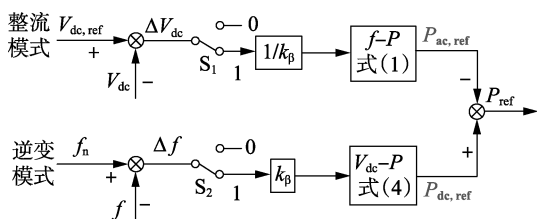


图 6 P_{ref} 的控制框图

Fig.6 Control block diagram of P_{ref}

在所提 IC 控制策略中,为了避免 IC 在电压或者频率跌落/上升时频繁切换,设置电压死区 $\Delta V_{dc} = \pm 0.02$ p.u.。当在该区间内时,IC 交流侧不向直流侧传输有功功率即 $P_{ac,ref} = 0$,此时开关 S_1 处于打开状态;当电压变化超过该区间时,交流侧需向直流侧提供有功功率,开关 S_1 处于闭合状态。类似地,设置频率死区 $\Delta f = \pm 0.1$ Hz。综上,开关 S_1 、 S_2 状态分别如下:

$$S_1 = \begin{cases} 1 & |\Delta V_{dc}| > 0.02 \\ 0 & |\Delta V_{dc}| \leq 0.02 \end{cases} \quad (20)$$

$$S_2 = \begin{cases} 1 & |\Delta f| > 0.1 \\ 0 & |\Delta f| \leq 0.1 \end{cases} \quad (21)$$

交流微电网与直流微电网之间传输功率参考值 P_{ref} 通过控制 IC 实现,控制框图如图 7 所示。可见,无功功率参考值通过 $V-Q$ 下垂特性求出。功率双

环控制的目的是将有功功率参考值与检测值进行比较,经过 PI 控制器得到电流环控制的参考电流。参考电流再与经 dq 解耦后的网侧电流做差,经过 PI 控制器得到变换器的调制信号 P_{md} 、 P_{mq} ,作用于 IC,以实现交/直流微电网之间功率的传输。

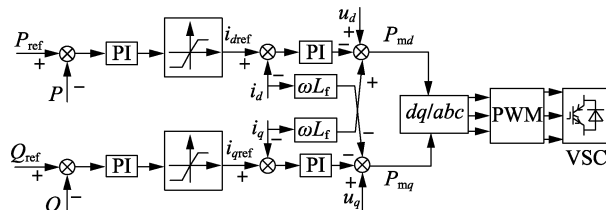


图 7 IC 的控制框图

Fig.7 Control block diagram of IC

3 仿真分析

为了验证所提 IC 柔性控制策略的有效性,在 DigSILENT 软件中搭建了如图 1 所示的混合微网仿真模型。本文对交流侧向直流侧提供功率支撑和直流侧向交流侧提供功率支撑以及频率、直流电压在允许范围内交直流两侧不进行功率传输进行了仿真验证,并比较了 IC 是否参与功率传输时交流网侧频率与直流网侧电压变化的情况。仿真参数如下:交流微电网中 $V_{ac}^0 = 380$ V, $f_n = 50$ Hz, $k_{ac} = 0.5$ MW/Hz, $T_{J,vir} = 2 \times 10^{-5}$ s, DG 功率为 0~10 MW,交流负荷为 5 MW;直流微电网中 $V_{dc}^0 = 700$ V, $k_{dc} = 0.25$ MW/V, $C_{dc} = 4\ 000$ μ F, DG 功率为 0~5 MW,直流负荷为 3 MW;IC 额定容量 $S_{VSC} = 2$ MV·A。

3.1 工况 1:交流负荷波动

当交流网侧负荷突然增加,导致频率跌落时,直流微电网侧功率充足,控制系统检测到频率变化,经过分析计算出直流侧需向交流侧传输的功率,此时 IC 工作于逆变模式,以维持交流网侧频率的稳定。工况 1 考虑了交流侧负荷变化时直流微电网通过 IC 向交流侧传输功率的情况。仿真结果如图 8—10 所示,图中 V_{ac} 、 V_{dc} 均为标么值,后同。

仿真开始时,交直流两侧 DG 在 IC 作用下维持混合微网的功率平衡。在 1 s 时,交流负荷有功功率比例阶跃 5%。由图 8(a)可以看出,在 1~4 s 区间内,交流微电网侧频率变化在所设置频率死区 ± 0.1 Hz 范围内。直流侧不向交流侧提供功率支撑,对应图 10 中 IC 输出有功功率为 0。从图 8(c)、9(b)可以看出, DG 出力仅能满足当地侧负荷供给。在 4~10 s 区间内,交流侧负荷有功功率比例阶跃 20%,频率变化大于设置死区值,下降到 49.87 Hz。由图 8(c)可以看出, DG 不足以维持当地负荷平衡,此时,直流微电网侧 DG 通过所提 IC 控制策略响应交流侧频率变化,计算得出需向交流侧传输功率 0.14 MW,如图 9(b)所示。在 10 s 时,交流负荷恢复至

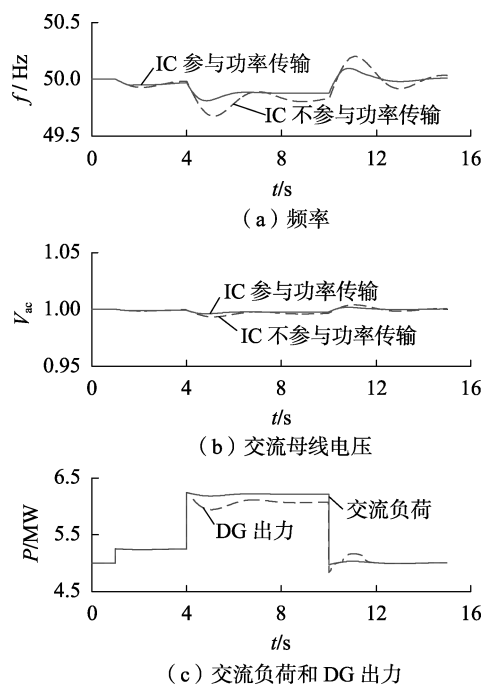


图 8 工况 1 下交流微电网侧仿真结果

Fig.8 Simulative results of AC microgrid in Case 1

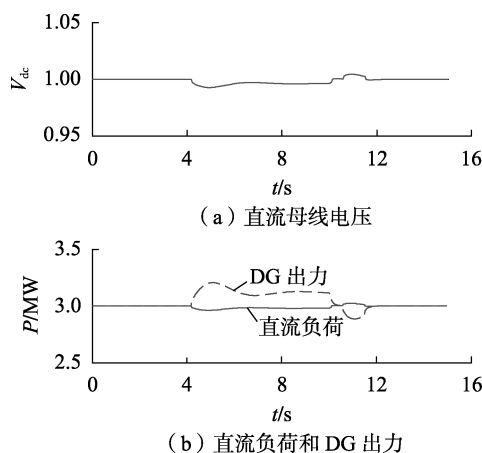


图 9 工况 1 下直流微电网侧仿真结果

Fig.9 Simulative results of DC microgrid in Case 1

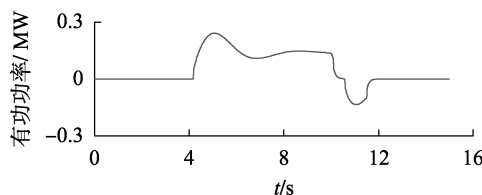


图 10 工况 1 下 IC 输出功率仿真结果

Fig.10 Simulative results of IC output power in Case 1

初始值 5MW,由图 10 可以看出,各 DG 出力减少,IC 的输出功率下降恢复为 0。

为了验证所提 IC 控制策略的有效性,对 IC 不参与功率传输时交流微电网侧电气量的变化与 IC 参与功率传输时交流微电网侧电气量变化进行了对比。由图 8(a)、8(b)可以看出,当 IC 参与功率传输时,直流网侧 DG 通过 IC 响应交流网侧频率变化,

为交流网侧提供功率支撑,交流频率变化量减小且恢复稳定时间缩短;交流母线电压波动更加平缓,提高了系统稳定性。

3.2 工况 2:直流负荷波动

当直流负荷增加时,导致直流母线电压下降,此时交流微电网侧功率充足,控制系统检测到母线电压的变化,经过计算得到交流侧向直流侧传输的功率值,来维持直流母线电压的稳定。工况 2 考虑了直流负荷变化时,交流网侧通过 IC 向直流网侧传输功率的情况。仿真结果如图 11—13 所示。

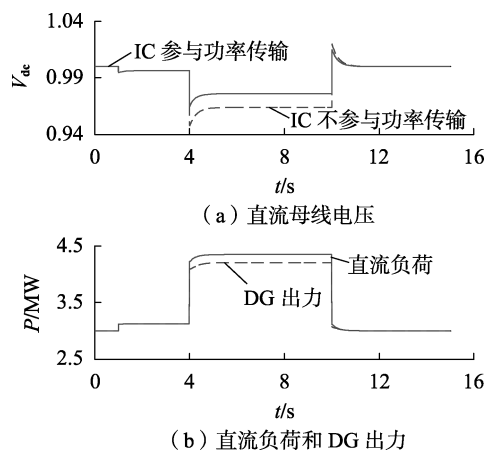


图 11 工况 2 下直流微电网侧仿真结果

Fig.11 Simulative results of DC microgrid in Case 2

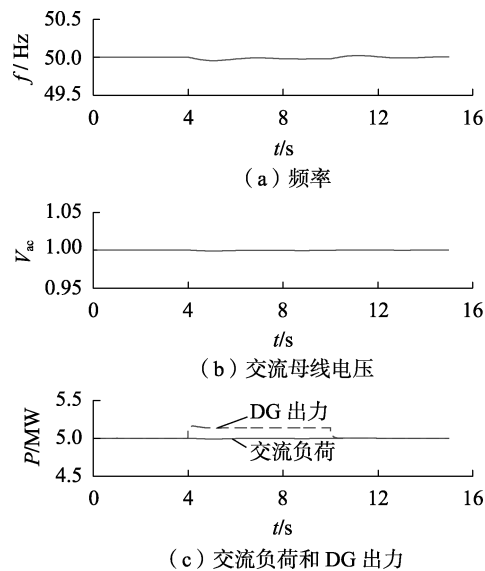


图 12 工况 2 下交流微电网侧仿真结果

Fig.12 Simulative results of AC microgrid in Case 2

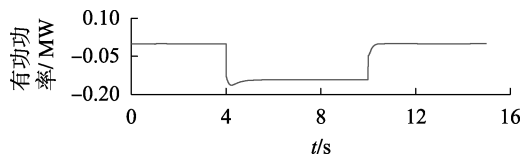


图 13 工况 2 下 IC 输出功率仿真结果

Fig.13 Simulative results of IC output power in Case 2

仿真开始时,交直流两侧功率平衡。在 1 s 时,

直流负荷功率阶跃5%,由图11(a)可以看出,在1~4 s区间内,直流电压变化标幺值在电压设置死区 ± 0.02 p.u.范围内;直流侧DG出力满足当地侧负荷需求,如图11(b)所示,此时IC不动作,如图13所示,输出功率为0。在4~10 s区间内,直流负荷有功功率比例阶跃50%,直流微电网侧出现过载,如图11(a)所示,直流电压跌落大于3%,DG已不能满足直流负荷需求,图11(b)所示。此时,交流网侧DG通过IC响应直流母线电压变化,IC工作于整流模式,由图13可看出,交流侧向直流侧传输功率为-0.14 MW,对应图12(c)中交流侧DG出力增加0.14 MW。而交流网侧频率与交流电压受直流负荷波动影响较小,变化范围较小。在10 s时,直流负荷恢复至初始值3 MW,IC输出功率下降到0,交直流两侧功率恢复平衡。

另外,仿真比较了在直流负荷波动情况下,IC不参与功率传输时与IC参与功率传输时直流网侧母线电压变化的情况。由图11(a)可以看出,交流网侧DG通过所提控制策略响应直流母线电压变化向直流侧输出功率,在IC参与功率传输时,减小了直流网侧直流母线电压的波动。

综合工况1与工况2可知,IC参与功率传输并采用所提控制策略实现了交流负荷增加时,IC向交流侧传输功率的增加;直流负荷增加时,IC向直流侧传输功率的增加。并且完成了交直流两侧功率的协调分配,提高了交流微电网侧与直流微电网侧电能质量。

4 结论

混合微网的IC不仅要承担功率的双向流动,而且还要维持交直流两侧电压与频率的稳定。基于此,本文对混合微网交直流断面的虚拟惯性、虚拟电容特性进行分析,推导出交流频率与直流电压之间的线性耦合关系,并提出一种新型柔性控制策略,其无需通信将交直流两侧下垂特性联系起来,以实现交流网侧与直流网侧功率的双向流动,维持系统的功率动态平衡。通过DIGSILENT软件对本文提出的控制方法进行建模仿真,结果表明,当交流侧负荷波动时,直流侧可通过IC向交流侧提供功率支撑,维持其频率的稳定;当直流侧负荷过载时,交流侧也可向直流侧提供能量,维持直流侧电压的稳定。本文提出的方法充分利用了分布式电源的功率调节能力,可有效提升交直流混合微网的鲁棒性。

参考文献:

[1] 杨健,唐飞,廖清芬,等.考虑可再生能源随机性的微电网经济性与稳定性协调优化策略[J].电力自动化设备,2017,37(8):179-184,200.
YANG Jian, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. Microgrid economy

and stability coordinated optimization considering randomness of renewable energy resource[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 179-184, 200.

[2] 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.

[3] 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):2756-2767.
ZHU Yongqiang, JIA Lihu, CAI Bingqian, et al. Overview on topologies and basic control strategies for hybrid AC/DC microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2756-2767.

[4] MALIK S M, AI X, SUN Y, et al. Voltage and frequency control strategies of hybrid AC/DC microgrid: a review[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(2): 303-313.

[5] 杨捷,金新民,杨晓亮,等.交直流混合微网功率控制技术研究综述[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] 王晓声,孙凯,李运帷.交直流混合微网中双向接口变换器控制综述[J].电源学报,2016,14(2):70-79.
WANG Xiaosheng, SUN Kai, LI Yunwei. Review of control strategies for bidirectional interfacing converters in hybrid AC/DC microgrid[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(2): 70-79.

[7] 兰征,涂春鸣,肖凡,等.电力电子变压器对交直流混合微网功率控制的研究[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.

[8] 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.

[9] 周稳,戴瑜兴,毕大强,等.交直流混合微电网协同控制策略[J].电力自动化设备,2015,35(10):51-57.
ZHOU Wen, DAI Yuxing, BI Daqiang, et al. Coordinative control strategy for hybrid AC-DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 51-57.

[10] 唐磊,曾成碧,苗虹,等.交直流混合微电网中AC/DC双向功率变换器的新控制策略[J].电力系统保护与控制,2013,41(14):13-18.
TANG Lei, ZENG Chengbi, MIAO Hong, et al. One novel control strategy of the AC/DC bi-directional power converter in micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 13-18.

[11] 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, 2012, 28(5): 2214-2223.

[12] 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.

[13] 刘佳易,秦文萍,韩肖清,等.交直流双向功率变换器的改进下垂控制策略[J].电网技术,2014,38(2):304-310.
LIU Jiayi, QIN Wenping, HAN Xiaoqing, et al. Control method of interlink-converter in DC microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 304-310.

- [14] 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):82-87.
GAO Ze, YANG Jianhua, JI Yu, et al. Bidirectional droop control of AC/DC Hybrid microgrid interlinking converter [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(5): 82-87.
- [15] 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.
- [16] EGHTEHDARPOUR N, FARJAH E. Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1494-1505.
- [17] ZHU J, BOOTH C D, ADAM G P, et al. Inertia emulation control strategy for VSC-HVDC transmission systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1277-1287.
- [18] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 3版. 北京:中国电力出版社, 2007:150-152.
- [19] 贺悝,李勇,曹一家,等. 考虑分布式储能参与的直流配电网电压柔性控制策略[J]. 电工技术学报,2017,32(10):101-110.

HE Li, LI Yong, CAO Yijia, et al. Flexible voltage control strategy of DC distribution network considering distributed energy storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 101-110.

作者简介:



施静容

施静容(1993—),女,河南周口人,硕士研究生,主要研究方向为交直流微电网控制(E-mail:jrsshi@hnu.edu.cn);

李勇(1982—),男,河南信阳人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统运行与控制、电力电子系统与控制(E-mail:yongli@hnu.edu.cn);

王姿雅(1976—),女,湖南长沙人,助理教授,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail:wangzi-ya@126.com);

贺悝(1991—),男,湖南衡阳人,博士研究生,主要研究方向为中压直流系统的建模及其控制(E-mail:helifamily@hnu.edu.cn)。

Flexible power flow control strategy for interlinking converter in AC/DC hybrid microgrid

SHI Jingrong, LI Yong, WANG Ziya, HE Li, CAO Yijia

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To address the issues of dynamic power balance in AC/DC hybrid microgrid and the low utilization of distributed generators, a novel flexible power flow control strategy for interlinking converter in hybrid microgrid is proposed, which can flexibly allocate power without the requirement of communication. Firstly, the droop control mode of distributed generators connected by AC and DC sub-microgrids is analyzed in detail. Secondly, based on the characteristics of interlinking converter, which is required to maintain the stability of AC microgrid frequency and DC bus voltage as well as the bidirectional power transmission, the virtual inertia of hybrid microgrid AC/DC interface is analyzed. At the same time, the linear coupling relationship between the AC frequency and DC voltage is deduced to accomplish the mutual support of AC/DC power at both sides. Finally, a typical AC/DC hybrid microgrid model is built on the DIgSILENT simulation platform, based on which the proposed power control strategy of interlinking converter is validated. Simulative results show that the proposed control strategy can effectively maintain the power balance at both sides and improve the power quality under the islanded mode, which fully exploits the power adjustment capability of distributed generators.

Key words: AC/DC hybrid microgrid; interlinking converter; power control; droop control; virtual inertia