

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181550

## 基于虚拟惯性自适应算法的电动汽车控制策略

朱小鹏<sup>1</sup>, 卫志农<sup>1</sup>, 颜全椿<sup>2</sup>, 范立新<sup>2</sup>, 顾文<sup>2</sup>, 李辰龙<sup>2</sup>

(1. 河海大学, 江苏 南京 210098; 2. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:** 针对电动汽车双向 DC/DC 变换器, 提出了一种虚拟惯性自适应控制策略。首先对电动汽车接入的交直流混合微电网的换流器采用虚拟同步发电机技术进行控制, 以此提高微电网的频率稳定性。然后, 对电动汽车双向 DC/DC 变换器采取虚拟惯性自适应控制, 使其能够为直流网络的电压提供惯性支持, 又可以在负荷出现波动时抑制直流电压变化过快, 负荷波动消失时使电压迅速恢复至额定值。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建含电动汽车的交直流混合微电网模型并进行测试。测试结果验证了所提控制算法的正确性与有效性。

**关键词:** 虚拟同步发电机; 电动汽车; 交直流混合微电网; 虚拟惯性; 自适应控制

### Control strategy of electric vehicle based on virtual inertial adaptive algorithms

ZHU Xiaopeng<sup>1</sup>, WEI Zhinong<sup>1</sup>, YAN Quanchun<sup>2</sup>, FAN Lixin<sup>2</sup>, GU Wen<sup>2</sup>, LI Chenlong<sup>2</sup>

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Frontier Electric Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** A virtual inertial adaptive control strategy is proposed for bidirectional DC/DC converters of electric vehicles. In order to improve the frequency stability of the microgrid, the converter of AC/DC hybrid microgrid connected by electric vehicles is controlled by the virtual synchronous generator technology. Then, the virtual inertia adaptive control is adopted for the electric vehicle bidirectional DC/DC converter, which can provide the inertia support for the voltage of the DC network. It can also restrain the DC voltage change too fast when the load fluctuates, and the voltage can be quickly restored to the rated value when the load fluctuation disappears. Finally, a AC/DC hybrid microgrid model containing electric vehicles is built and simulated in PSCAD/EMTDC. The simulation results verify the effectiveness of the proposed control algorithm.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507050) and Science and Technology Project of Jiangsu Electric Power Company (No. J2017025).

**Key words:** virtual synchronous generator; electric vehicle; AC/DC hybrid microgrid; virtual inertia; adaptive control

## 0 引言

微电网中分布式电源多为直流型电源, 同时越来越多的负荷(如电动汽车等)需要直流电源进行供电, 通过直流微网连接二者可以减少交、直变换过程中的能量损耗。而目前的配电网以交流系统为主, 全面重新建设直流微电网并不现实。因此, 要在减少能量损耗的同时充分利用现有的交流配电网, 交直流混合微电网<sup>[1-4]</sup>是目前公认的可行解决方案之一。

电动汽车接入交直流混合微电网后, 由于大量电力电子器件的存在, 系统惯性较低, 在发生分布

式能源出力波动或者负荷频繁投切等扰动时, 系统频率与电压波动加剧, 直接威胁到微电网的安全稳定运行<sup>[5-6]</sup>。为了解决该问题, 有学者提出借鉴同步发电机的机械方程和电磁方程来控制并网逆变器, 使得并网逆变器在外特性上与同步发电机相媲美的虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)技术<sup>[7-8]</sup>。VSG 技术可用于增强交直流混合微电网交流网络的稳定性<sup>[9-10]</sup>, 提高微电网对大规模电动汽车接入的适应性<sup>[11]</sup>, 使电动汽车为微电网提供调频服务<sup>[12-13]</sup>。相较于交流网络, 电动汽车大规模接入交直流混合微电网直流网络更具优势, 但若不对其采取适当控制, 会对直流网络的安全稳定运行带来挑战。直流母线电压是衡量直流微电网内功率平衡的唯一指标, 为了增强直流网络的电压稳定性, 文献<sup>[14-16]</sup>类比交流微电网 VSG 的虚拟惯性, 提出

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51507050); 江苏省电力公司科技项目资助(J2017025)

了直流微电网并网逆变器的虚拟惯性控制, 通过控制微电网中的旋转设备和储能设备达到为直流电压提供惯性支撑的效果, 电动汽车作为一种快速可控型负荷, 其本身具备向直流母线电压提供惯性支撑的能力, 而目前对此展开的研究较少。同时, 上述文献所提控制中, 由于控制参数为固定值, 系统缺乏灵活多变、适应不同工况的能力。为此, 自适应控制策略常用于弥补上述不足, 文献[17]将自适应控制策略引入到 VSG 转动惯量与阻尼系数的设计中, 在保证储能装置性能最好的同时, 优化频率响应曲线。文献[18-20]在负载扰动时采用较大的转动惯量使得频率变换缓慢, 扰动消除时采用较小的转动惯量以加快频率恢复。但上述自适应控制策略大多用于设计交流微电网中 VSG 的转动惯量, 而未用于直流微电网虚拟惯性控制之中。

基于以上研究, 本文将 VSG 控制应用于电动汽车接入的交直流混合微电网的换流器之中<sup>[9]</sup>, 并针对电动汽车双向 DC/DC 变换器, 在文献[14]的基础上, 增加考虑电动汽车充放电特性、电动汽车用户出行需求、电池寿命及充电机本身功率限制等因素, 提出一种虚拟惯性自适应控制策略, 使电动汽车负荷可友好地接入电网, 并可对直流网络的电压提供支持。在所提控制策略下, 电动汽车既可在系统负荷波动出现时如文献[14]中储能设备一样抑制直流电压变化过快, 又可在负荷波动消失时使电压迅速恢复至额定值。最后在 PSCAD/EMTDC 软件中搭建模型, 对所提控制算法的正确性与有效性进行验证。

## 1 含电动汽车的交直流混合微电网结构

图 1 为典型的含电动汽车充换电装置的交直流混合微电网的系统示意图。直流网络和交流网络之间通过一台或多台联络换流器(Interfacing Converter, IFC)来实现能量的交换。同时, 交流母线上装有静态开关(Static Transfer Switch, STS), 通过控制 STS 的开关可以实现混合微电网在并网、孤岛之间的切换。交、直流电源和负荷分别通过交、直流母线连接。电动汽车充换电装置建立在混合微电网的直流侧, 通过双向 DC/DC 变换器与直流网络连接。

微电网的换流设备以及电动汽车充换电装置中存在大量的电力电子设备, 这将导致微电网的惯性降低。同时, 电动汽车作为一种快速可控型负荷, 当其大规模接入电网后, 通过改变其充放电功率能够快速补偿系统功率缺额, 为电网提供惯性支持。因此, 本文的控制策略主要分为两部分: 1) AC/DC 换流器的 VSG 控制模块; 2) DC/DC 换流器的虚拟惯性自适应控制模块。VSG 控制模块用以提高混合微电网的稳定性。虚拟惯性自适应控制模块可使电动汽车为直流侧母线电压提供惯性支持。两种控制

模块的具体实现方法将在下文中分别介绍。

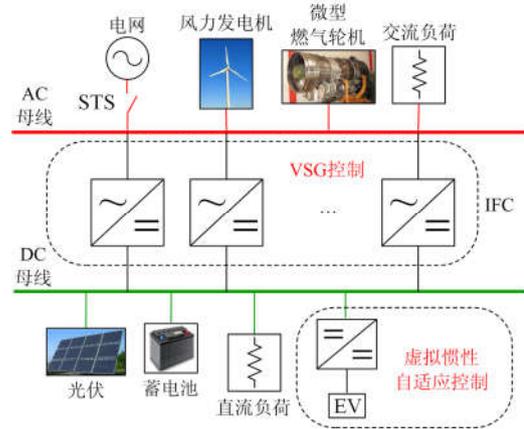


图 1 典型的含电动汽车的交直流混合微电网结构

Fig. 1 Typical AC/DC hybrid microgrid structure containing EVs

## 2 AC/DC 变换器的 VSG 控制模块

针对电动汽车负荷接入的交直流混合微电网, 对其换流器采取文献[9]所提 VSG 控制策略进行控制, 以提高微电网的效率以及频率稳定性, 增强其接纳直流负荷的能力, 为电动汽车负荷的友好接入提供条件, 其控制框图如图 2 所示。

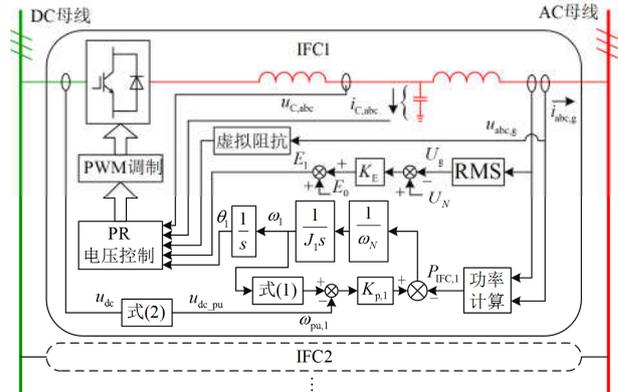


图 2 基于 VSG 的 IFC 控制策略

Fig. 2 Proposed control strategy of IFC based on VSG technology

首先将直流网络电压和 VSG 的虚拟转速进行归一化<sup>[21]</sup>, 其数学公式如式(1)和式(2)所示。

$$\omega_{pu} = \frac{\omega_N - \omega}{\Delta\omega} = -\frac{P_{ac,N} - P_{ac,load} + P_{IFC}}{\Delta P_{ac}} \quad (1)$$

$$u_{pu} = \frac{u_{dcN} - u}{\Delta u} = -\frac{P_{dc,N} - P_{dc,load} + P_{IFC}}{\Delta P_{dc}} \quad (2)$$

式中:  $\omega_N$  和  $u_{dcN}$  分别为交流网络的额定角频率、直流网络额定电压;  $P_{ac,N}$ 、 $P_{dc,N}$  分别为交直流电源在

额定频率(电压)下的输出功率;  $P_{ac,load}$ 、 $P_{dc,load}$  分别为交直流网络负荷;  $P_{IFC}$  为投入运行的 IFC 的总传输功率。

基于 VSG 的 IFC 控制策略的核心思想是利用直流网络电压和 VSG 虚拟转速归一化后的误差作为虚拟机械力矩, 省去锁相环节, 提高系统稳定性, 同时实现各 IFC 按额定容量传输有功功率的目标; 采用下垂控制, 维持交流母线电压的稳定, 同时引入虚拟阻抗使各 IFC 按额定容量发出有功功率, 所提控制策略的数学方程为

$$J_i \frac{d\omega_i}{dt} = \frac{K_{p,i} (\omega_{pu,i} - u_{pu,i}) - P_{IFC,i}}{\omega_N} \quad (3)$$

$$\theta_i = \int \omega_i dt \quad (4)$$

$$E_i = E_0 + K_E (U_N - U_g) \quad (5)$$

式中:  $J_i$  为各 IFC 虚拟转动惯量;  $P_{IFC,i}$  为输出功率测量值;  $K_{p,i}$  为功率误差增益;  $U_N$  为额定交流电压有效值;  $U_g$  为测量获得的交流母线电压有效值;  $K_E$  为交流母线电压误差增益;  $E_i$  为虚拟电动势。

误差增益应满足

$$\frac{K_{p,i}}{K_{p,j}} = \frac{S_i}{S_j}, \quad i, j=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中,  $S_i$  为各 IFC 额定容量。

稳态状态下各 IFC 传输的有功功率之比以及发出的无功功率之比近似等于其额定容量之比, 其理论分析、PR 电压控制与参数设计原则参考文献[9], 在此不作赘述。

### 3 DC/DC 变换器虚拟惯量自适应控制模块

上节中, 针对交直流混合微电网换流器的 VSG 控制技术有助于改善系统动态性能, 提高交流网络的稳定性, 但其对直流网络电压波动的支持能力有限。电动汽车作为一种快速可控负荷, 当其大规模接入混合微电网的直流侧时, 可以对直流网络电压提供一定的惯性支持。

#### 3.1 动力电池电路模型

动力电池是电动汽车的重要组成部分, 磷酸铁锂电池因体积功率密度大、安全性高、自放电率低、成本价格低的优势, 在我国电动汽车行业中广泛应用。本文主要研究充放电机的控制策略, 对动力电池模型精确度要求不高, 因而简化分析, 采用如图 3 所示的 R-RC 结构对磷酸铁锂电池进行建模。其中:  $E_0$  为其电动势;  $V_i$  为电池端电压;  $R_0$  为电池内阻;  $R_f$  为极化电阻;  $C_f$  为极化电容; 可以反映电池充放电过程中的暂态反应。

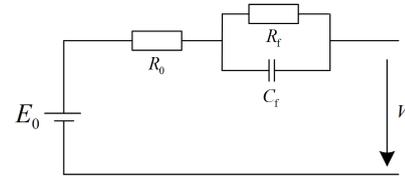


图 3 动力电池模型

Fig. 3 Model of battery

#### 3.2 动力电池虚拟惯性分析

动力电池通过双向 DC/DC 变流器连接直流母线, 对变流器采取适当控制, 可以使动力电池为直流网络提供惯性支持。如图 4 所示, 常规控制模式下, 变流器实际向直流母线注入的功率为其输出有功和并联电容放电功率的总和, 可以表示为<sup>[14]</sup>

$$P_{out} = P_{in} + P_C = C_{dc} u_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} \quad (7)$$

式中:  $P_{out}$  为实际注入直流母线的有功功率;  $P_{in}$  为变流器输出的有功功率;  $P_C$  为变流器直流母线侧电容  $C_{dc}$  的放电功率;  $u_{dc}$  为直流母线电压。

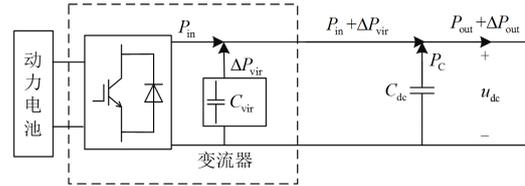


图 4 动力电池虚拟惯性

Fig. 4 Virtual inertia of battery

当直流微电网稳定时,  $P_C=0$ , 即  $P_{in}=P_{out}$ ; 当直流微电网发生扰动, 功率  $P_{out}$  增加或者减少  $\Delta P_{out}$ , 不平衡功率将导致直流母线电压发生变化, 直流侧电容根据电压变化释放或者吸收功率, 但受容量限制其抑制效果有限。然而动力电池本身具有提供惯性支持的能力, 如果对其施加虚拟惯性控制, 可使动力电池在电压突变时向直流网络提供额外的虚拟惯性功率  $\Delta P_{vir}$ , 此时电容两侧的功率平衡关系可以表示为

$$P_{out} + \Delta P_{out} = P_{in} + P_C + \Delta P_{vir} \quad (8)$$

由式(8)知, 一部分的功率波动由虚拟惯性功率  $\Delta P_{vir}$  抵消, 使得电容器的充放电功率  $P_C$  的变化量减少, 从而减少直流母线的电压变化量, 相当于提高了直流网络的惯性。

类比电容器充放电功率的表达式, 动力电池提供的惯性功率可表达为

$$\Delta P_{vir} = C_{vir} u_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} \quad (9)$$

式中,  $C_{vir}$  为变流器的虚拟惯性控制系数, 在一定范围内, 通过改变  $C_{vir}$  的大小可以改变动力电池提

供惯性支持的大小。

### 3.3 电动汽车的虚拟惯性自适应控制策略

微电网内部调压资源不足时, 可根据微电网电压变化改变电动汽车充放电功率, 参与微电网电压调整。图 5 为电动汽车调压特性示意图, 一方面需要防止轻微电压波动下电动汽车充放电功率频繁波动对电池寿命以及健康状态的影响, 另一方面, 受电动汽车用户出行需求、电池寿命及充电机本身功率限制, 其充放电功率存在上下限值。

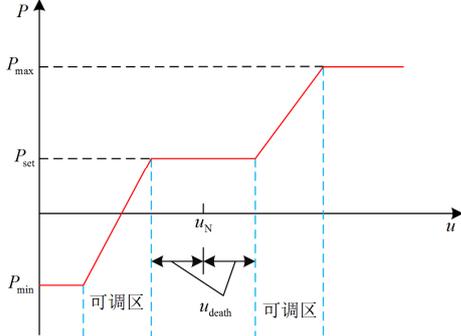


图 5 电动汽车调压特性示意图

Fig. 5 Voltage regulation characteristic of EV

#### 1) 调节死区的设置

图中,  $u_N$  为电压额定值,  $u_{death}$  为电压死区值, 当系统电压波动范围在  $u_N - u_{death}$  至  $u_N + u_{death}$  之间时, 为避免充放电功率频繁波动对电池寿命以及健康状态的影响, 动力电池不参与电网调压服务。

#### 2) 充放电功率的上、下限值

图中,  $P_{max}$  和  $P_{min}$  分别为充放电功率的上下限值, 由充电机本身功率限制、用户出行需求和电池寿命共同决定<sup>[22]</sup>, 其表达式分别为

$$P_{max} = \min \left( P_{char,max}, \frac{\Delta Soc_1 C_{ev}}{\eta_{char} \Delta t} \right) \quad (10)$$

$$P_{min} = \begin{cases} \min \left( P_{char,max}, \frac{\Delta Soc_2 C_{ev}}{\eta_{char} \Delta t} \right) & \Delta Soc_2 > 0 \\ \max \left( -P_{dischar,max}, \frac{\Delta Soc_2 C_{ev}}{\eta_{dischar} \Delta t} \right) & \Delta Soc_2 < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\Delta Soc_1 = 100\% - Soc_t \quad (12)$$

$$\Delta Soc_2 = Soc_{min,t+\Delta t} - Soc_t \quad (13)$$

式中:  $P_{char,max}$  为充电机本身允许的最大充电功率;  $\eta_{char}$  为电池充电效率;  $C_{ev}$  为电池容量;  $\Delta t$  为控制周期, 其值由人为决定;  $Soc_t$  为当前时刻  $t$  的剩余电量;  $\Delta Soc_1$  为  $\Delta t$  时刻内电动汽车可以增加的最大荷电状态(SOC)值;  $P_{dischar,max}$  为充电机本身允许的最大放点功率, 且  $P_{dischar,max} > 0$ ;  $\eta_{dischar}$  为电池放电效率;  $\Delta Soc_2$  为  $t+\Delta t$  时刻所允许的最小电量  $Soc_{min,t+\Delta t}$

与当前时刻电量  $Soc_t$  的差,  $Soc_{min,t+\Delta t}$  由考虑电池寿命和用户出行需求计划得到, 文献[22]有详细介绍, 此处不再赘述。  $\Delta Soc_2 > 0$  表示当前电池 SOC 没有达到  $t+\Delta t$  时刻允许的最小电量, 此时不允许电池放电,  $P_{min} > 0$ ,  $P_{min}$  表示允许最小充电功率;  $\Delta Soc_2 < 0$  表示当前电池 SOC 已经达到  $t+\Delta t$  时刻允许的最小电量, 此时允许电池放电,  $P_{min} < 0$ ,  $|P_{min}|$  表示允许最大放电功率。

#### 3.3.1 虚拟惯性控制环节

为了使电动汽车能参与微电网的电压调节, 文献[14]提出的方法可使动力电池具备下垂特性和虚拟惯性, 具体的实施方法如图 6 中下垂控制环节和虚拟惯性控制环节所示。

动力电池经由 DC/DC 变流器施加附加控制提供的虚拟惯性功率可表示为

$$\Delta P_{vir} = -\frac{1}{2} C_{vir} \frac{d(u_{dcN}^2 - u_{dc}^2)}{dt} \approx -\frac{C_{vir}}{2T} \left[ (u_{dcN}^2 - u_{dc}^2) - (u_{dcN}^2 - u_{dc0}^2) \right] \quad (14)$$

式中:  $u_{dc}$  为实测的直流母线电压;  $u_{dc0}$  为前一时刻的直流母线电压;  $u_{dcN}$  为直流母线的额定电压;  $C_{vir}$  为变流器的虚拟惯性控制系数;  $P_{vir}$  为动力电池惯性功率。

#### 3.3.2 自适应控制环节

为使虚拟惯性控制环节能够根据电压变化动态地调节虚拟惯性系数  $C_{vir}$ , 将  $C_{vir}$  写成关于电压变换量  $|u_{dc} - u_{dcN}|$  的函数, 同时引入电压跟踪系数  $k_u$ , 当  $|u_{dc} - u_{dcN}| \geq K$  时,  $k_u$  可根据需要自行设计;  $K$  为根据微电网直流母线电压允许波动范围设定的电压变化量限定值; 为避免电压轻微波动引起电池充放电功率的频繁波动, 当  $|u_{dc} - u_{dcN}| \leq K$  时,  $k_u = 0$ , 此时虚拟惯性系数  $C_{vir}$  可用式(15)表示。

$$C_{vir} = C_{vir0} + k_u |u_{dc} - u_{dcN}| \quad (15)$$

式中:  $C_{vir0}$  为虚拟惯性系数的初始值;  $u_{dc}$  为直流母线电压实测值;  $u_{dcN}$  为直流母线电压额定电压。

上述虚拟惯性自适应控制算法能够减缓负载扰动发生时的电压变化速度, 但同时也会降低扰动消失后电压的恢复速度。为此, 在上述算法的基础上引入开关状态值  $\Delta s$  和电压变化的微分量  $du/dt$ , 此时虚拟惯性系数  $C_{vir}$  受到  $du/dt$  的影响。为了简化分析, 这里只分析负载突增时的扰动情况。当扰动出现时,  $du/dt < 0$ , 即电压处于下降阶段, 令  $\Delta s = 1$ , 此时希望电压能够缓慢下降。当  $du/dt \geq 0$ , 即电压变化率过零反向, 电压处于恢复阶段时, 令  $\Delta s = 0$ , 让电压能够迅速恢复, 此时虚拟惯性系数  $C_{vir}$  则可用式(16)表示。

$$C_{vir} = C_{vir0} + \Delta s k_u |u_{dc} - u_{dcN}| \quad (16)$$

分析式(16)可知, 通过引入电压跟踪系数  $k_u$  和开关状态值  $\Delta s$  可使虚拟惯性系数  $C_{vir}$  在电压波动

出现时快速增大, 增加系统惯性, 减缓电压变化速率; 而当电压反向恢复时, 虚拟惯性系数  $C_{vir}$  则迅速变小为  $C_{vir0}$ , 直流母线电压能够快速恢复。

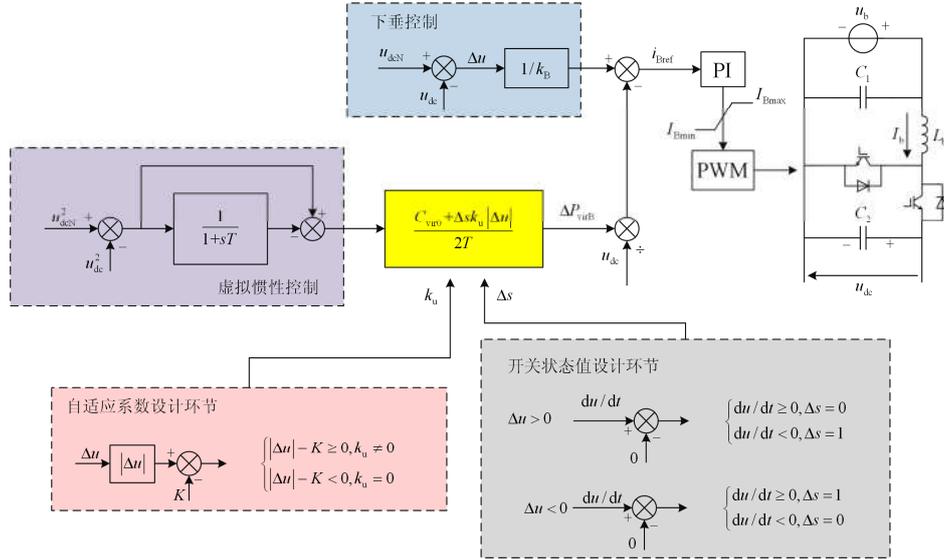


图 6 虚拟惯性自适应控制图

Fig. 6 An adaptive virtual inertial control chart

#### 4 测试分析

为了验证所提控制策略的正确性, 在 PSCAD/EMTDC 软件中搭建如图 7 所示的含电动汽车的交直流混合微电网模型进行测试分析。

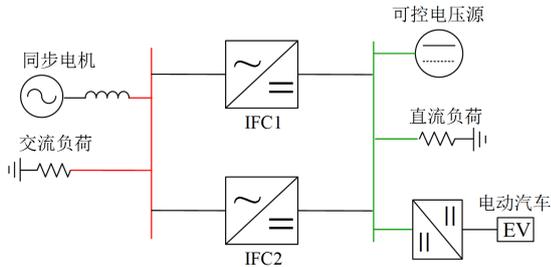


图 7 交直流混合电网测试算例

Fig. 7 Structure of the tested AC/DC hybrid microgrid

测试系统中, 交流电源用同步电机等效, 直流电源用可控电压源等效。交直两侧通过两台换流器连接实现能量转换, 且接有一定量的负荷, 电动汽车通过双向 DC/DC 变换器与直流母线连接, 系统部分参数如表 1 所示。

##### 4.1 基于 VSG 的 IFC 控制效果验证

由第 2 节分析可知, 在 IFC 中施加 VSG 控制策略可增强系统抵御负荷波动的能力, 提高系统的频率稳定性。忽略电动汽车接入的影响, 对系统进

行负荷波动测试,  $t=3\text{ s}$  时系统负荷突增  $20\text{ kW}$ , 图 8 为负荷波动时系统频率的动态过程。由图 8 可知, 负荷波动时系统频率缓慢下降, 克服了传统控制策略中 IFC 缺乏惯性的不足, 有效增强了系统的频率稳定性。

表 1 系统部分参数

Table 1 Partial parameter of system

参数	数值
交流母线额定电压 $U_N/\text{V}$	380
交流频率 $f/\text{Hz}$	50
滤波电感 $L/\text{mH}$	2.5
滤波电容 $C_1/\mu\text{F}$	20
直流母线额定电压 $u_{dcN}/\text{V}$	400
直流侧电容 $C_2/\mu\text{F}$	1 000
动力电池组额定电压 $U_{bat}/\text{V}$	300

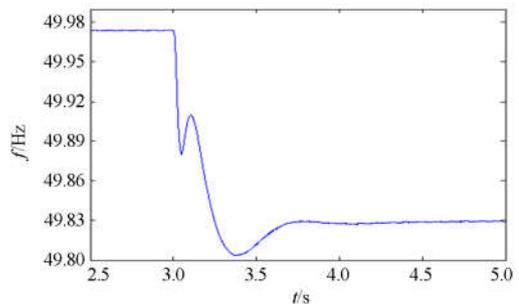


图 8 交流母线频率

Fig. 8 Frequency of AC bus voltage

## 4.2 虚拟惯性控制效果验证

由 3.2 节可知, 在虚拟惯性控制策略下电动汽车能够为直流网络提供电压支持, 且可通过调节虚拟惯性系数  $C_{vir}$  的大小来改变其支持能力的大小。对于不同的虚拟惯性系数  $C_{vir}$ , 分析系统在负荷波动时的电压动态响应过程,  $t=3$  s 时突增负荷 10 kW, 测试结果如图 9 和图 10 所示。

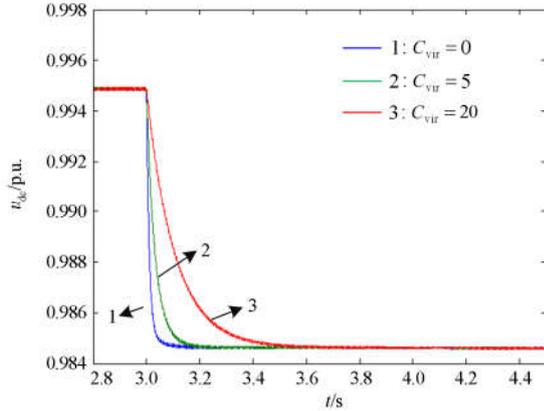


图 9 直流母线电压的变化  
Fig. 9 Change of DC bus voltage

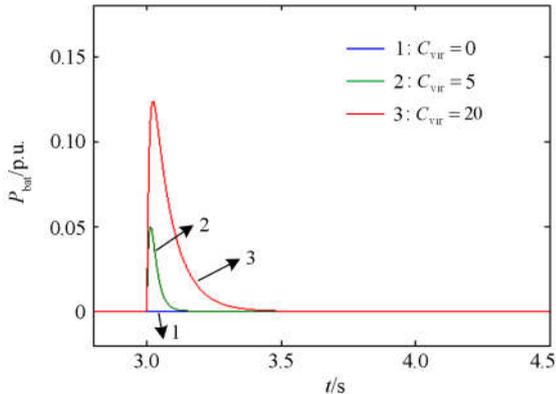


图 10 电动汽车功率的变化  
Fig. 10 Power change of electric vehicle

图 9 中, 波形 1、2、3 分别表示虚拟惯性系数  $C_{vir}$  为 0、5、20 下直流母线电压的动态响应曲线, 图 10 中波形 1、2、3 分别对应此时电动汽车动力电池组输出功率变化量的标幺值。从波形 1 可以看出,  $C_{vir}$  为 0 即仅在下垂控制作用下, 直流母线电压在负荷突增时会迅速下降, 电动汽车几乎不参与电网电压的调节; 而波形 2 中, 在虚拟惯性控制作用下, 直流母线电压在遭受负荷突增时其下降速度明显减缓, 电动汽车在负荷突增时增大了对电网的功率输入; 从波形 3 可以看出, 通过增大虚拟惯性系数  $C_{vir}$ , 电动汽车在负荷突增时向电网输入的功率进一步增大, 直流母线电压的下降速度进一步减缓。

由此可知, 虚拟惯性控制下电动汽车能够为微电网直流网络提供电压支持, 通过调节虚拟惯性系数  $C_{vir}$  的值可改变其参与电压支持的程度, 但当  $C_{vir}$  超出一定值后, 虚拟惯性控制也会导致系统不稳定, 应综合考虑选取合适的  $C_{vir}$  参数值<sup>[14]</sup>。

## 4.3 自适应控制效果验证

由 3.3 节可知, 所提虚拟惯性自适应控制策略有助于改善负荷变化开始以及结束时直流母线电压的动态响应过程, 为验证其理论的有效性, 分别对基于虚拟惯性控制且虚拟惯性系数  $C_{vir}$  较小、未引入开关状态值  $\Delta s$  的虚拟惯性自适应控制、引入开关状态值  $\Delta s$  的虚拟惯性自适应控制策略下的系统进行负荷波动测试, 以上 3 种控制策略分别记为策略 1、策略 2、策略 3。 $t=3$  s 时, 系统的负荷突增 10 kW,  $t=4$  s 时负荷恢复正常, 测试结果如图 11 和图 12 所示。

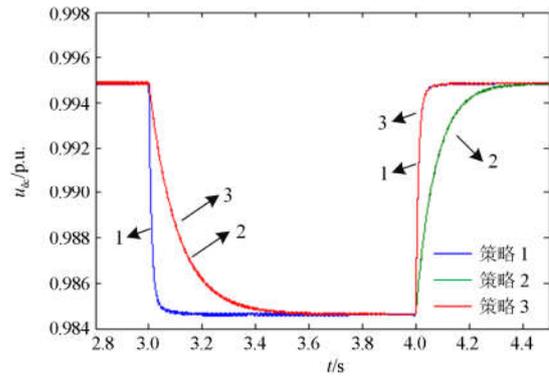


图 11 直流母线电压的变化  
Fig. 11 Change of DC bus voltage

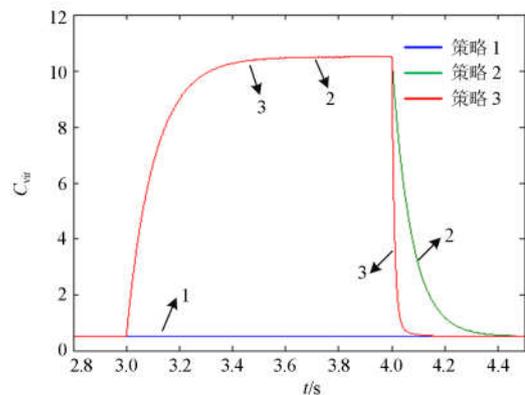


图 12 虚拟惯性系数对比

Fig. 12 Comparison of virtual inertia coefficient

图 11 为不同控制策略下, 负荷波动时直流母线电压的动态响应曲线, 图 12 为不同控制策略下, 负荷波动时虚拟惯性系数  $C_{vir}$  的数值。分析图 11、图 12 中的波形 1 可知, 当采用虚拟惯性控制且虚拟惯

性系数  $C_{vir}$  很小接近于 0 时, 直流网络电压下降速度较快, 直流网络的惯性较低, 电动汽车基本不参与电压调节; 当采用未引入开关状态量  $\Delta s$  的虚拟惯性控制策略时, 虚拟惯性系数  $C_{vir}$  则会根据电网电压的波动情况动态变化, 使电动汽车参与电网电压调节。此时直流母线电压的动态响应曲线如图 11 中的波形 2 所示, 直流母线电压下降速度明显减缓、直流网络的惯性得到提升, 但是负荷恢复正常时其电压恢复速度变慢, 不利于系统稳定; 而采用引入开关状态量  $\Delta s$  的虚拟惯性自适应控制策略时, 从波形 3 可以看出, 所提控制算法既能减缓波动出现时电压的变化速度, 同时不影响波动消失后的电压恢复速度, 有助于提高直流网络电压的稳定性。

由上述分析可知, 通过动态地改变虚拟惯性系数  $C_{vir}$  的大小, 所提控制策略能减缓负荷波动出现时的电压降落速度, 同时不影响负荷波动结束后电压的恢复速度, 增强了直流网络的电压稳定性。

## 5 结论

为了充分利用电动汽车负荷的快速可控性, 发挥其对交直流混合微电网中直流网络提供电压支持的能力, 本文提出一种虚拟惯性自适应控制策略, 并对所提控制策略下的虚拟惯性功率输出特性以及在交直流混合微电网中的作用进行了验证, 测试结果表明:

1) 在虚拟惯性控制策略下电动汽车可以快速地调节充放电功率, 能为交直流混合微电网的直流网络提供惯性支撑; 且在一定范围内, 调节虚拟惯性系数  $C_{vir}$  的大小, 可改变其对直流网络电压支持能力的大小。

2) 交直流混合微电网的直流网络电压发生波动时, 本文所提的虚拟惯性自适应控制策略能够减缓波动出现时电压的变化速度, 同时不影响波动消失后的电压恢复速度, 有助于提高直流网络电压的稳定性。

随着电动汽车技术的不断发展, 未来电网中将有更多的电动汽车负荷接入, 在合理的控制策略下, 电动汽车负荷有潜力为电网提供调频、调压服务。本文所提基于虚拟惯性自适应算法的电动汽车控制策略可为电动汽车大规模接入电网提供思路。通过对现有的直流充电桩进行改造, 用户在充电时即可参与到电网的调频调压中, 而不会影响到用户的出行体验。未来, 随着大规模充电站的建设, 电动汽车电池标准的统一, 电动汽车逐步采用更换电池的充电方式后, 电动汽车充放电将更具规模化、有序化, 其参与电网调频调压的能力会更强, 所提控制

策略将更具实用性与经济性。

## 参考文献

- [1] LIU Xiong, WANG Peng, LOH P C. A hybrid AC/DC microgrid and its coordination control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 278-286.
- [2] LOH P C, LI Ding, CHAI Yikang, et al. Hybrid AC-DC microgrids with energy storages and progressive energy flow tuning[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1533-1543.
- [3] 任志航, 李民, 马凯琪, 等. 交直流混合微电网微元建模与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 82-88.  
REN Zhihang, LI Min, MA Kaiqi, et al. Modeling & control of hybrid AC/DC microgrid micro components[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 82-88.
- [4] 唐磊, 曾成碧, 苗虹, 等. 交直流混合微电网中 AC/DC 双向功率变流器的新控制策略[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 microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 13-18.
- [5] DRAGICEVIC T, GUERRERO J M, VASQUEZ J C, et al. Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 695-706.
- [6] WU T F, CHANG C H, LIN L C, et al. DC-bus voltage control with a three-phase bidirectional inverter for dc distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1890-1899.
- [7] 张东, 卓放, 翟灏. 基于虚拟同步发电机的逆变器控制策略研究[J]. 陕西电力, 2014, 42(9): 40-43.  
ZHANG Dong, ZHUO Fang, ZHAI Hao. Study of inverter control strategy based on virtual synchronous generator[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(9): 40-43.
- [8] 祝钧, 李瑞生, 毋炳鑫, 等. 交直流混合微电网接口变换器虚拟同步发电机控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 28-34.  
ZHU Jun, LI Ruisheng, WU Bingxin, et al. Virtual synchronous generator operation of interlinking converter between AC and DC microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 28-34.
- [9] 林子杰, 卫志农, 孙国强, 等. 基于虚拟同步电机的交直流混合微电网控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 424-433.  
LIN Zijie, WEI Zhihong, SUN Guoqiang, et al. A novel

- control strategy of AC/DC converter in hybrid microgrid based on virtual synchronous generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 424-433.
- [10] 禹红, 夏向阳, 彭梦妮, 等. 基于虚拟同步电机技术的混合储能平抑微网频率波动策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 47-54.
- YU Hong, XIA Xiangyang, PENG Mengni, et al. Research on strategy of micro-grid frequency control in hybrid energy storage system based on virtual synchronous generator technology[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 47-54.
- [11] 吕志鹏, 梁英, 曾正, 等. 应用虚拟同步电机技术的电动汽车快充控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4287-4294.
- LÜ Zhipeng, LIANG Ying, ZENG Zheng, et al. Virtual synchronous motor based control scheme of fast charger for electric vehicle application[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4287-4294.
- [12] 刘东奇, 钟庆昌, 王耀南, 等. 基于同步逆变器的电动汽车 V2G 智能充放电控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 544-557.
- LIU Dongqi, ZHONG Qingchang, WANG Yaonan, et al. A synchronverter-based V2G smart charging and discharging control strategy for electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 544-557.
- [13] 刘其辉, 逯胜建. 参与微电网调频的电动汽车虚拟同步机充放电控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 171-179.
- LIU Qihui, LU Shengjian. Charging and discharging control strategy based on virtual synchronous machine for electrical vehicles participating in frequency regulation of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 171-179.
- [14] 朱晓荣, 谢志云, 荆树志. 直流微电网虚拟惯性控制及其稳定性分析[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3884-3893.
- ZHU Xiaorong, XIE Zhiyun, JING Shuzhi. Virtual inertia control and stability analysis of DC micro-grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3884-3893.
- [15] 邹培根, 孟建辉, 王毅, 等. 一种直流微电网的灵活虚拟惯性控制策略[J]. 电力建设, 2018, 39(6): 56-62.
- ZOU Peigen, MENG Jianhui, WANG Yi, et al. A flexible virtual inertia control strategy for DC microgrid[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(6): 56-62.
- [16] 伍文华, 陈燕东, 罗安, 等. 一种直流微网双向并网变换器虚拟惯性控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 360-372.
- WU Wenhua, CHEN Yandong, LUO An, et al. A virtual inertia control strategy for bidirectional grid-connected converters in DC micro-grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 360-372.
- [17] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2): 451-458.
- [18] 程冲, 杨欢, 曾正, 等. 虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 82-89.
- CHENG Chong, YANG Huan, ZENG Zheng, et al. Rotor inertia adaptive control method of VSG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 82-89.
- [19] 张亚楠, 朱淼, 张建文, 等. 基于自适应调节的微源逆变器虚拟同步发电机控制策略[J]. 电源学报, 2016, 14(3): 11-19.
- ZHANG Yanan, ZHU Miao, ZHANG Jianwen, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on adaptive adjusting for distributed inverters[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(3): 11-19.
- [20] 宋琼, 张辉, 孙凯, 等. 多微源独立微网中虚拟同步发电机的改进型转动惯量自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 412-424.
- SONG Qiong, ZHANG Hui, SUN Kai, et al. Improved adaptive control of inertia for virtual synchronous generators in islanding micro-grid with multiple distributed generation units[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 412-424.
- [21] 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): 1263-1270.
- [22] 何晨颖, 耿天翔, 许晓慧, 等. 利用电动汽车可调度容量辅助电网调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 134-140.
- HE Chenying, GENG Tianxiang, XU Xiaohui, et al. Research on grid frequency regulation using schedulable capacity of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 134-140.

收稿日期: 2018-12-13; 修回日期: 2019-04-23

作者简介:

朱小鹏(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。E-mail: hhuzxp\_work@163.com

(编辑 周金梅)