

基于虚拟同步策略的电动汽车 V2G 技术在多能互补系统中的研究及应用

林晓明^{1,2}, 唐建林^{1,2}, 张帆^{1,2}, 罗欣儿³, 田杰³, 肖勇^{1,2}

(1. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510670; 2. 广东省电网智能量测与先进计量企业重点实验室, 广东 广州 510670; 3. 深圳供电局, 广东 深圳 518001)

摘要: 为解决大规模电动汽车单向充电造成的电网冲击和线路负荷过重问题, 开展了电动汽车 V2G 技术在多能互补系统中的应用研究。首先, 对比分析了多种典型的多能互补系统拓扑结构的技术优缺点, 在基于共交流母线的多能互补系统中应用 V2G 技术。其次, 提出基于虚拟同步机的 V2G 自主有功-无功控制策略, 优化设计虚拟惯量、阻尼系数等关键参数, 模拟传统发电机组的机电暂态特性, 实现系统自主调压调频, 解决光伏发电的间歇性和随机性带来的电网指标波动问题。然后, 搭建了典型的多能互补系统, 并进行仿真验证。结果表明, 基于虚拟同步机的 V2G 设备能主动跟踪并网点频率、电压变化, 及时提供有功、无功功率支撑, 有效保障电网运行的稳定性。最后, 研制了基于虚拟同步策略的 500 kW 大功率 V2G 设备, 并在示范项目中成功应用, 验证了所提方法的有效性。
关键词: 多能互补; 虚拟同步; 电动汽车; V2G

Research and application of electric vehicle V2G technology based on a virtual synchronization strategy in a multi-energy complementary system

LIN Xiaoming^{1,2}, TANG Jianlin^{1,2}, ZHANG Fan^{1,2}, LUO Xiner³, TIAN Jie³, XIAO Yong^{1,2}

(1. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510670, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Measurement and Advanced Metering of Power Grid, Guangzhou 510670, China; 3. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518001, China)

Abstract: There are problems of power grid impact and line overload caused by one-way charging of electric vehicles on a large scale. Thus research and application of electric vehicle V2G technology in a multi-energy system are carried out. First, the technical advantages and disadvantages of several typical multi-energy system topologies are compared, and V2G technology is adopted in a multi-energy system based on a common AC bus. Secondly, an autonomous active and reactive power control strategy for V2G based on a virtual synchronous machine is proposed to optimally design key parameters such as virtual inertia, damping, etc., simulate the electromechanical transient characteristics of traditional generator sets, realize the independent voltage and frequency regulation, and solve the problem of grid index fluctuation caused by the intermittent nature and randomness of photovoltaic power generation. Thirdly, a typical multi-energy system is established for simulation, and results show that the V2G equipment based on a virtual synchronous machine can actively track the changes of frequency and voltage at the connection point, and provide active or reactive power support in time. This effectively ensures the stability of power grid operation. Finally, a 500 kW high-power V2G equipment based on the virtual synchronization strategy is developed and successfully applied in the demonstration project, verifying the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2019YFE0118700).

Key words: multi energy complementary; virtual synchronization; electric vehicle; V2G

0 引言

目前, 全球化石能源逐渐枯竭, 温室气体排放

导致环境不断恶化。在 CO₂ 排放量的贡献率排名中, 机动车居于第三位^[1], 成为温室气体的主要来源之一。面对严峻的环境形势, 我国正式提出了“碳中和、碳达峰”目标。近年来, 在国家政策的大力支持下, 电动汽车及充电基础设施获得了突飞猛进的发展^[2-4]。随着大功率充电技术的发展, 数量众多电

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2019YFE0118700); 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2022]一般 015); 深圳供电局科技项目资助(090000KK52190043)

电动汽车在用电高峰期无序接入充电网络，将会导致巨大的能量从电网单向传输至车辆，造成电网瞬时负荷过重，严重影响电网的安全稳定运行^[5-7]。

为应对充电高峰期电网负荷重的问题，不少学者研究电动汽车充放电技术(Vehicle-to-Grid, V2G)，利用电动汽车的移动储能特性，设计隔离型 V2G 设备，在用电低谷期为电动汽车蓄电池充电，在用电高峰期将电动汽车蓄电池剩余电量反馈至电网^[8-10]。若大规模电动汽车用户能够在规定时间内进行有序充放电操作，将达到“削峰填谷”的目的^[11-12]，大幅降低了充电负荷峰值。此外，为了促进清洁能源消纳、增强充电网络的抗冲击能力^[13-15]，多能互补型充电站应用也逐渐广泛^[16-17]。多能互补型充电站即在充电站内配置光伏、储能等多类型能量单元，虽然能够在一定程度上平滑充电负荷，但其潜在的电网指标波动问题也限制了其自身的发展。针对此，虚拟同步机(Virtual Synchronous Machine, VSM)成为一种有效的解决途径，文献[18]通过模拟同步电机的转子惯性、励磁惯性及定子电气特性，利用实验室目标机实现负荷虚拟同步机的功能，但其负荷不具备向电网反馈能量的功能。文献[19]设计的三相脉宽调制整流器具有虚拟同步功能，可工作于恒功率或恒电压两种工作模式，能够实现单位功率因数的校正，保障良好的电能质量。文献[20]提出了虚拟同步发电机控制环核心参数的设计方法，但研制的 50 kW 样机同样不具备 V2G 功能。文献[21]推导了微电网频率调节的计算方法，采用下垂控制方式模拟电动汽车充放电参与微电网一次和二次调频的效果，但未考虑维持电网电压稳定的作用，且研究仅限于仿真阶段，未针对实际样机进行验证。文献[22]虽设计了双向 DC/DC 变换器，实现了对微电网直流电压的惯性支持，但未设计双向 AC/DC 变换器，无法模拟双向充放电工况下的调频调压过程。

通过上述分析发现：1) 目前研究鲜有将 V2G 和 VSM 技术相互结合，并应用于多能互补系统中；2) 在引导车主进行有序充放电的同时无法实现有功或无功的动态响应，对电网频率或电压的支撑较弱；3) 针对 VSM 的研究主要集中于理论分析层面，局限于建模仿真、参数设计等方面，鲜有开展样机的研制及应用分析，缺乏实际工程的验证。

针对此，本文将 V2G 和 VSM 技术进行有机结合，不仅实现了多能互补充电站内充电负荷的“削峰填谷”，而且在 V2G 技术中引入虚拟同步控制策略，实时监测并追踪电网频率和电压变化，通过下垂控制算法及时调整充放电功率，满足系统调频、

调压需求。

1 多能互补系统结构

目前，我国的太阳能、风能等清洁能源分布广泛，多种能源协同发展已成为必然的发展趋势。多能互补是利用各类能源的互补特性来实现资源整合、高效利用的有效途径^[23-24]。基于“光储充”新型能源网络架构的集中式充电站，已成为多能互补系统的典型应用场景，有效地支撑了电动汽车的普及和应用。基于“光储充”的多能互补系统主要有三种拓扑结构，其分别为共交流母线、共直流母线和交直流混合型母线^[25]。从理论分析和实践经验方面对比了以上三种拓扑结构的技术特点，如表 1 所示。

表 1 多能互补系统拓扑结构技术特点对比

Table 1 Topology comparison of multi energy complementary system

对比项目	共交流 母线	共直流 母线	混合型 母线
技术成熟度	成熟可靠，应用广	应用少，需要更多的工程检验	应用少，需要更多的工程检验
设备种类	生产厂家多，产品种类较多	生产厂家少，产品种类少	生产厂家少，产品种类少
效率	较低	较高	较高
控制难度	较低	较低	较高
设备成本	容易批量生产，设备成本低	批量生产少，设备成本较高	批量生产少，设备成本较高
维护难度	较简单	困难	困难

用电可靠性和投资收益是充电站经营者考虑的关键指标。目前共交流母线的拓扑结构具有技术成熟可靠、设备成本低、控制维护难度小等诸多优点，在实际工程中的应用也最为广泛。因此，针对电动汽车 V2G 技术的应用，本文基于共交流母线型多能互补系统进行优化分析。

2 V2G 电路模型

虚拟同步机技术通过模拟同步发电机组的机电暂态特性，使得采用逆变器的电源具有类似于同步发电机组的运行外特性，如惯量、阻尼、有功调频和无功调压等。基于虚拟同步机技术的电源与负荷，均能够自主地参与电网的运行控制，及时响应电网电压和频率异常的情况，有效应对电网运行过程中的暂态、动态稳定问题。基于此，本文提出虚拟同步控制器(Virtual Synchronous Controller, VSC)的概念，并将其应用于 V2G 技术中。基于虚拟同步控制策略的 V2G 电路模型如图 1 所示。

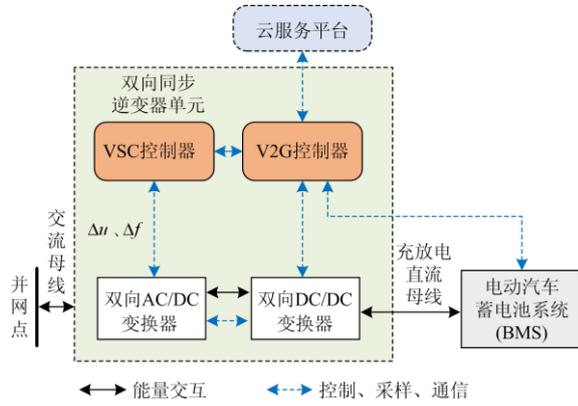


图1 基于虚拟同步策略的V2G电路模型

Fig. 1 V2G circuit model based on virtual synchronous strategy

由图1可知,基于虚拟同步策略的V2G电路主要包括双向AC/DC变换器、双向DC/DC变换器、电动汽车蓄电池系统(BMS)、VSC控制器和V2G控制器等模块,各模块功能如下所述。

1) 双向AC/DC变换器:功率模块的前级变换单元,负责功率逆变,用于跟踪采集并网点电压、频率等电网数据,并及时上送至VSC控制器。

2) 双向DC/DC变换器:功率模块的后级变换单元,实现与车辆蓄电池之间的高频隔离,并根据V2G控制器的充电需求,调整充放电直流母线的电压电流。

3) 电动汽车蓄电池系统:与V2G控制器通信,提供电动汽车的电压、电流调节需求。

4) VSC控制器:判断AC/DC变换器上送的实时电网电压、频率是否超出阈值,模拟同步发电机的转动惯量、阻尼及励磁控制特性,根据调频或调压系数计算出系统需要调整的有功或无功功率值,并下发调频/调压控制指令。

5) V2G控制器:V2G设备的控制核心单元、云服务平台与BMS通信实现车辆充电或放电控制,并向后台反馈设备运行状态数据。

3 虚拟同步控制策略

3.1 数学模型

虚拟同步机的阻尼系统和系统惯量灵活可调,可根据电网频率和电压变化改变自身的输出特性,是实现电动汽车有序充放电的重要手段。虚拟同步机原理如图2所示,从文献[24-25]可知,虚拟同步发电机的数学模型主要通过同步发电机的机械方程和电磁方程来体现,其推导过程如下。

1) 机械方程

根据牛顿第二定律,传统同步发电机的转子运

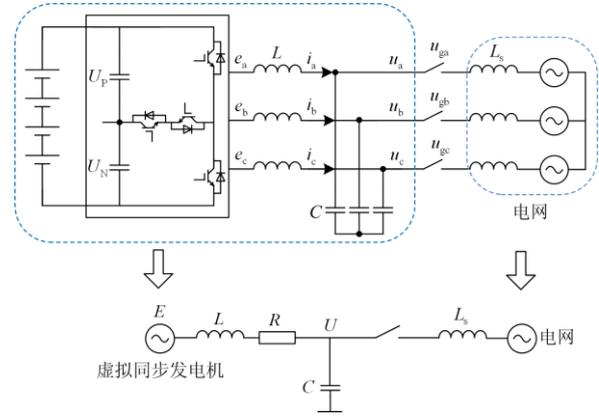


图2 虚拟同步发电机等效原理

Fig. 2 Equivalent principle of virtual synchronous generator

动方程为

$$T_m - T_e = \frac{P_m}{\omega_m} - \frac{P_e}{\omega_m} = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (1)$$

式中: T_m 、 T_e 分别为同步发电机的机械转矩和电磁转矩,单位: N m ; P_m 为原动机输入的机械功率,单位: W ; P_e 为同步发电机输出的电磁功率,单位: W ; ω_m 为机械角速度,单位: rad/s ; J 为同步发电机的转动惯量,单位: kg m^2 。

在极对数为1的条件下,机械角速度 ω_m 与电角速度 ω 相等,考虑原动机、阻尼绕组及负荷阻尼特性的影响,同步发电机的机械方程为

$$T_m - T_e - T_d = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_e}{\omega} - D\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

式中: D 为阻尼系数,单位: N m s/rad ; T_d 为阻尼转矩。

如果同步发电机的实际转速 ω 在同步转速 ω_0 附近变化,可近似认为 $\omega \approx \omega_0$,考虑速度变化对阻尼绕组的影响,则上述机械方程可转化为式(3),即虚拟同步发电机在时域的机械方程。

$$T_m - T_e - T_d = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_e}{\omega} - D(\omega - \omega_0) = J \frac{d(\omega - \omega_0)}{dt} = J \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (3)$$

式中, $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ 。

2) 电磁方程

对式(3)取拉氏变换可得虚拟同步发电机在频域的机械方程,具体如下:

$$\Delta\omega(s) = (T_m - T_e)/(Js + D) \quad (4)$$

其中,发电机的电磁转矩可由虚拟同步发电机的内电势和输出电流计算得到,如式(5)所示。

$$T_e = \frac{P_e}{\omega} = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega \quad (5)$$

由图 2 可以得到虚拟同步发电机在时域的电磁方程, 如式(6)所示。

$$u_{abc} = e_{abc} - L \frac{di_{abc}}{dt} - Ri_{abc} \quad (6)$$

式中: u_{abc} 为虚拟同步发电机的机端电压; e_{abc} 为虚拟同步发电机的内电势; L 为虚拟同步发电机的同步电抗; R 为虚拟同步发电机的同步电阻; i_{abc} 为虚拟同步发电机的输出电流。

对式(6)取拉氏变换可得虚拟同步发电机在频域的电磁方程, 如式(7)所示。

$$i_{abc}(s) = [e_{abc}(s) - u_{abc}(s)] / (Ls + R) \quad (7)$$

3.2 调频/调压控制策略

虚拟同步机针对内电势相位和幅值进行控制。VSM 变换器采用自同步控制方式, 利用功率误差控制自身内电势的变化, 使其内电势在电网波动时具备保持原有运动状态的能力, 即惯性。变换器输出内电势 E_{abc} 跟随电网电压缓慢变化, 从而自发地为电网提供无延时的动态功率支撑。

VSM 变换器采集并网点的电压和电流, 计算瞬时有功功率 P_e 和瞬时无功功率 Q_e , 根据功率参考值 P_{ref} 、 Q_{ref} 及 P_e 、 Q_e , 并利用相位同步控制器和幅值控制器得到 VSM 内电势的幅值和相位, 再经过内电势发生器产生所需的内电势矢量, 具体原理如图 3 所示。

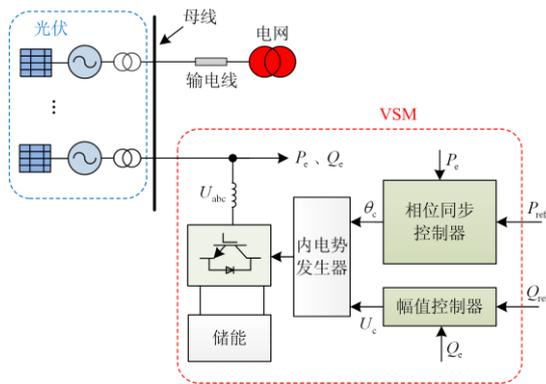


图 3 VSM 有功/无功控制策略原理

Fig. 3 Diagram of VSM active or reactive power control strategy block

1) 自主有功调频控制策略

VSM 有功控制策略原理如图 4 所示, 虚拟同步发电机通过机械转矩 T_m 来调节有功输出, 机械转矩的控制指令包含两部分: (1) 通过给定的有功指令值 P_{ref} 和角频率 ω 计算得到的机械转矩指令 T_0 ; (2) 频率偏差反馈指令 ΔT 。

图 4 中: f 为虚拟同步发电机机端电压的频率; f_0 为电网基准频率; K_f 为有功调频系数。电网基

准频率 $f_0 = 50 \text{ Hz}$, 考虑虚拟同步发电机机端电压的频率范围为 $(50 \pm 2.5) \text{ Hz}$, 故系统的有功调频系数 K_f 设计为 20。有功调频控制流程如图 5 所示。

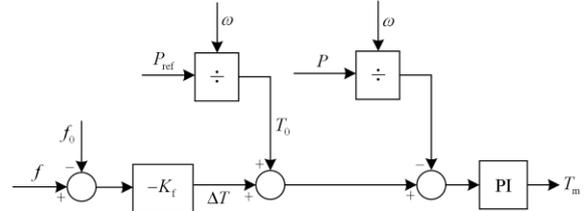


图 4 自主有功调频控制策略

Fig. 4 Autonomous active power frequency modulation control strategy

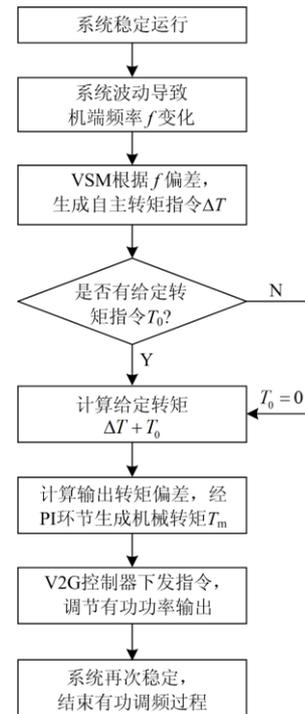


图 5 自主有功调频控制流程

Fig. 5 Autonomous active power frequency modulation control flows

2) 自主无功调压控制策略

传统同步发电机通过调节励磁来调节其无功输出及机端电压, 类似地, 可以通过内电势 E 来调节虚拟同步发电机的无功输出和机端电压。虚拟同步发电机自主无功调压控制策略如图 6 所示, 内电势的控制指令 E 由 3 个部分组成: (1) 虚拟同步发电机的空载电势 E_0 , 其表征了虚拟同步发电机空载离网运行时的机端电压; (2) 对应于无功功率调节的部分 ΔE_Q ; (3) 对应于机端电压调节的部分 ΔE_U , 其作用等效于同步发电机的励磁调节或自动电压调节。图 6 中: Q_{ref} 为无功指令值; Q 为机端输出的瞬时无

功率值; U_{ref} 和 U 分别为机端电压有效值的指令值和实际值; K_v 为无功调压系数。电网电压 $U_{ref} = 380 \text{ V}$, 考虑虚拟同步发电机机端电压调节有效值范围为 $(380 \pm 30) \text{ V}$, 故系统的无功调压系数 K_v 设计为 12.5。自主无功调压控制流程如图 7 所示。

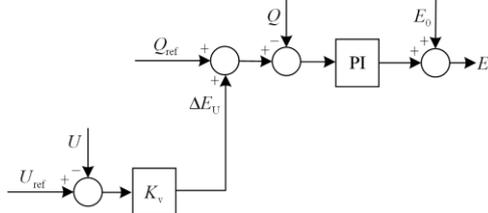


图 6 自主无功调压控制策略框图

Fig. 6 Block diagram of autonomous reactive power voltage regulation control strategy

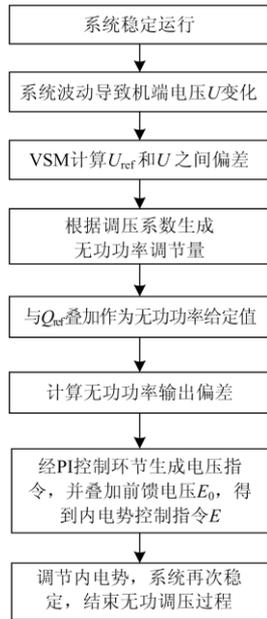


图 7 自主无功调压控制流程

Fig. 7 Autonomous reactive power voltage regulation control flows

4 仿真及试验验证

4.1 多能互补系统配置

在文献[25]的基础上并结合当前光伏、储能及充电设施的建设成本, 本文设计的共交流母线型多能互补系统参数为: 光伏装机容量为 100 kW ; 储能容量为 100 kWh 、功率为 500 kW ; 其他站用负荷总功率为 500 kW 。此外, 充放电设备设计为群体控制型, 集中式功率机柜可根据车辆实际需求将功率动态分配给 5 个充放电终端, 每个终端的额定功率为 100 kW 。所设计的“光储充”多能互补系统等效拓扑结构如图 8 所示。

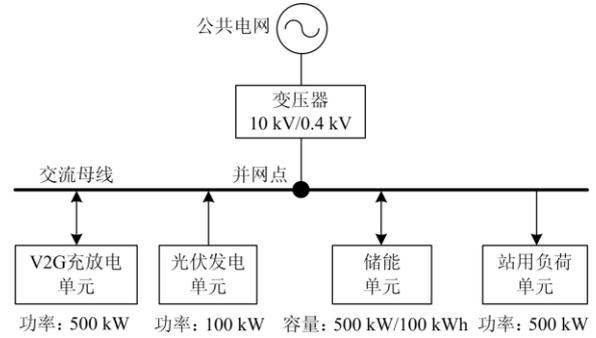


图 8 多能互补系统等效拓扑结构

Fig. 8 Equivalent topology of multi-energy system

4.2 仿真试验分析

虚拟同步策略的关键参数包括有功调频系数、无功调压系数、转动惯量和阻尼系数等。其中, 转动惯量的主要作用为抑制功率突变, 但转动惯量较大, 系统的动态响应较慢, 甚至会引起有功功率振荡。惯性时间常数通常控制在 10 s 以内, 本文将 V2G 设备的惯性时间常数设计为 6 s 。阻尼的主要作用为抑制系统振荡, 但阻尼系数过大会增加系统达到稳态所用的时间, 本文将 V2G 设备的阻尼系数设计为 125。根据 4.1 节的系统配置, 在 Simulink 试验环境中搭建仿真模型, VSC 控制器的仿真参数如表 2 所示。

表 2 虚拟同步仿真系统参数

Table 2 Parameters of virtual synchronous simulation system

参数名称	参数值
交流侧线电压有效值	380 V
开关频率	5.2 kHz
采样频率	5.2 kHz
LC 滤波器电感值	0.8 mH
LC 滤波器电容值	24 μF
直流母线电容值	4.9 mF
有功调频系数 K_f	20
无功调压系数 K_v	12.5
阻尼系数 D	125
惯性时间常数 T_j	6 s
同步电阻(标么值)	0.02 p.u.
同步电感(标么值)	0.2 p.u.
交流电流采样截止频率	1 500 Hz
交流电压采样截止频率	1 500 Hz
直流电压采样截止频率	750 Hz

为了验证多能互补系统在 V2G、自主调频、调压等方面的特性, 本文设置了 4 组仿真场景进行模拟。

1) 场景 1: 模拟充电时有功负荷切除

当系统达到稳定状态时, 并网点频率为额定值 50 Hz , 电动汽车充电与站内负荷消耗的有功功率为

250 kW。在 1.2 s 时，切除部分站内负荷，导致站内并网点频率升高，其调频结果如图 9 所示，当站内发出的有功功率大于负荷吸收总有功功率时，虚拟同步机通过采样跟踪到电网频率上升，利用其自主一次有功调频功能，增加车辆蓄电池充电功率，频率下降并稳定，V2G 单元和站内负荷单元消耗总有功功率为 200 kW。

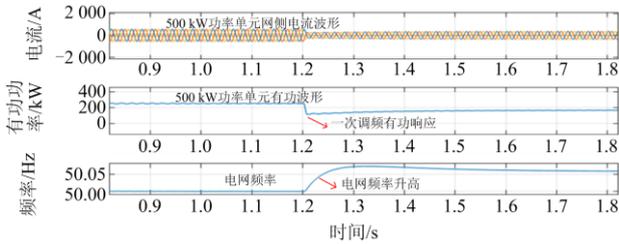


图 9 充电时有功调频

Fig. 9 Active frequency modulation during charging

2) 场景 2：模拟放电时光伏出力波动

当系统达到稳定状态时，并网点频率为额定值 50 Hz，光伏发电单元和储能单元输出的总有功功率为 250 kW。在 1.2 s 时，光伏输出功率大幅降低，导致站内并网点频率降低。调频结果如图 10 所示，当站内发出的有功功率小于负荷吸收总有功功率时，虚拟同步机通过采样跟踪到电网频率下降，利用其自主一次有功调频功能，增加车辆蓄电池放电功率，频率升高并稳定，储能单元和 V2G 单元放电总有功功率为 300 kW。

3) 场景 3：模拟充电时无功负荷投入

当系统达到稳定状态时，V2G 单元工作于充电状态，虚拟同步机输出无功功率为 50 kvar，并网点电压为额定值 380 V。在 1.4 s 时，投入部分站内无功负荷，导致站内并网点电压降低。调压结果如图 11 所示，当虚拟同步机发出的无功功率小于负荷吸收总无功功率时，虚拟同步机通过电压采样跟踪到电网电压的下跌，利用其自主一次无功调压功能，增加 V2G 单元输出的无功功率，电压升高并稳定，其输出的总无功功率为 110 kvar。

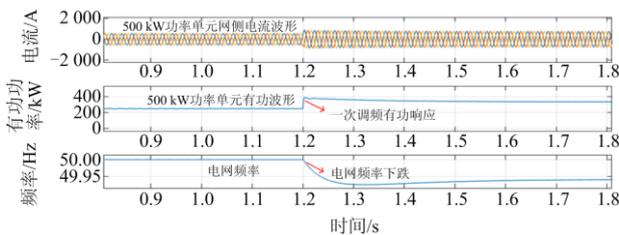


图 10 放电时有功调频

Fig. 10 Active frequency modulation during discharging

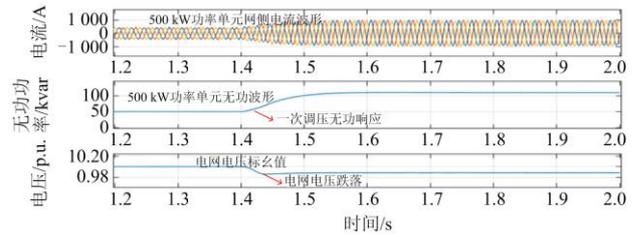


图 11 充电时无功调压

Fig. 11 Reactive voltage regulation during charging

4) 场景 4：模拟放电时无功负荷切除

当系统达到稳定状态时，虚拟同步机输出无功功率为 50 kvar，并网点电压为额定值 380 V。在 1.4 s 时，切除部分站内无功负荷，导致站内并网点电压上升。调压结果如图 12 所示，当虚拟同步机发出的无功功率大于负荷吸收总无功功率时，虚拟同步机通过电压采样跟踪到电网电压的上升，利用其自主一次无功调压功能，减少 V2G 单元输出的无功功率，电压下降并稳定，总输出无功功率为-10 kvar。

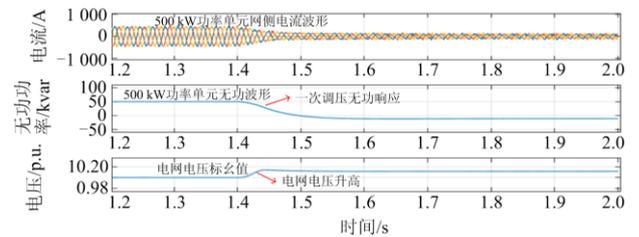


图 12 放电时无功调压

Fig. 12 Reactive voltage regulation during discharging

上述仿真结果表明，基于虚拟同步策略的 V2G 设备在电网频率、电压波动超出规定范围时，能够动态调节其有功、无功输出，自主参与电网有功调频、无功调压，及时有效地维持电网频率和电压的稳定。

4.3 样机测试分析

基于上述的 V2G 控制策略，本文研制了 500 kW 的大功率 V2G 设备，并将其应用于某“光储充”多能互补示范项目中。

现场与某车企 E6 型号车辆连接并进行充放电操作，根据后台调控指令，顺利地完成了“车-桩-网”双向互动。同时，模拟示范园区电网频率和电压发生波动，V2G 设备的调节过程如图 13、图 14 所示，图中：通道 1—2 分别为交流侧电压、电流波形；通道 3—4 分别为直流侧电压、电流波形。

由图 13 可知，当“光储充”系统交流侧并网点频率下降时，系统减少 V2G 设备输出给车辆的有功功率，交直流侧输出电流也明显同步下降。由图 14

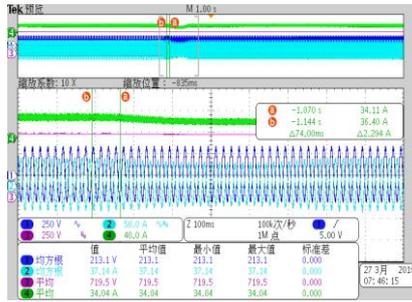


图 13 有功功率调节

Fig. 13 Active power regulation



图 14 无功功率调节

Fig. 14 Reactive power regulation

可知, 当“光储充”系统交流侧并网点电压下降时, 系统增加 V2G 设备输出给电网的无功功率, 交流侧有功电流叠加无功电流, 总输出电流明显同步增加。

上述测试结果表明, 当并网点频率或电压发生波动时, V2G 系统能够快速反应, 及时调节有功或无功功率输出, 为电网提供有功、无功支撑, 达到了虚拟同步策略的预期效果。

5 结论

本文开展了电动汽车 V2G 技术在多能互补系统中的应用研究, 提出了基于虚拟同步机的 V2G 设备控制策略, 搭建了基于共交流母线的“光储充”多能互补系统仿真模型, 研制了大功率 V2G 设备, 并在实际示范园区开展测试。结果表明, 当电网频率和电压发生波动时, 在虚拟同步控制策略下, V2G 设备能够主动地调节输出有功和无功功率, 支持电网的一次调频调压, 有效抑制了电网频率、电压等指标的进一步恶化, 具有与传统发电同步机组相同的机电暂态特性, 显著增强了多能互补系统抵御电网振荡的能力, 保障了电网的安全稳定运行。

参考文献

[1] 中华人民共和国环境保护部. 中国机动车环境管理年报(2017)[R/OL].[2020-06-01].
<http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/201706/P020170605550637870889.pdf>.

- [2] 檀勤良, 代美, 梅书凡. 考虑电动汽车碳配额及需求响应的电力系统调度研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(7): 79-86.
TAN Qinliang, DAI Mei, MEI Shufan. Research on electric vehicle carbon quota and demand response in electric power system dispatching[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(7): 79-86.
- [3] 张彬桥, 李成, 李振兴, 等. 基于交通信息和配电网全成本电价的电动汽车充电负荷调度方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(7): 52-57.
ZHANG Binqiao, LI Cheng, LI Zhenxing, et al. Dispatching method of electric vehicle charging load considering traffic information and distribution network full cost electricity[J]. Smart Power, 2021, 49(7): 52-57.
- [4] 蔡黎, 张权文, 代妮娜, 等. 规模化电动汽车接入主动配电网研究进展综述[J]. 智慧电力, 2021, 49(6): 75-82.
CAI Li, ZHANG Quanwen, DAI Nina, et al. Review on research progress of large-scale electric vehicle access to active distribution network[J]. Smart Power, 2021, 49(6): 75-82.
- [5] 沈国辉, 陈光, 赵宇, 等. 基于双目标分层优化和 TOPSIS 排序的电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 115-123.
SHEN Guohui, CHEN Guang, ZHAO Yu, et al. Orderly charging optimization strategy of an electric vehicle based on double objective hierarchical optimization and TOPSIS ranking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 115-123.
- [6] 白浩, 曲锴, 简山. 基于 V2G 技术的电动汽车与光伏协同调度优化策略[J]. 南方电网技术, 2019, 13(4): 88-92, 106.
BAI Hao, QU Kai, YIN Shan. Optimization strategy for cooperative dispatching of photovoltaic and electric vehicle based on V2G technology[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(4): 88-92, 106.
- [7] 谭瑾, 王勇, 马洲俊, 等. 考虑规模化电动汽车负荷的柔性台区安全经济运行边界[J]. 电力工程技术, 2021, 40(5): 25-33.
TAN Jin, WANG Yong, MA Zhoujun, et al. Security-economy operational boundary of flexible district considering large-scale EV charging loads[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5): 25-33.
- [8] WU Fuzhang, YANG Jun, ZHAN Xiangpeng, et al. The online charging and discharging scheduling potential of electric vehicles considering the uncertain responses of users[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 1794-1806.
- [9] 李植鹏, 谢莹华, 肖鸣, 等. 计及 V2G 模式的有源配电网协调运行优化[J]. 广东电力, 2019, 32(6): 41-47.
LI Zhipeng, XIE Yinghua, XIAO Ming, et al. Coordinated operation optimization of active distribution network considering V2G mode[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(6): 41-47.
- [10] 黄艳岩, 朱斌, 谷泓杰, 等. 基于 V2G 技术的微电网最优运营规划策略[J]. 智慧电力, 2021, 49(3): 26-31, 45.

- HUANG Yanyan, ZHU Bin, GU Hongjie, et al. Optimal operation planning strategy for microgrid considering V2G technology[J]. Smart Power, 2021, 49(3): 26-31, 45.
- [11] SAID D, MOUFTAH H T. A novel electric vehicles charging/discharging management protocol based on queuing model[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2020, 5(1): 100-111.
- [12] 马英姿, 马兆兴. 基于博弈算法的电动汽车有序充电优化及效益分析[J]. 电力工程技术, 2021, 40(5): 10-16.
MA Yingzi, MA Zhaoxing. Orderly charging optimization and benefit analysis of electric vehicles based on game algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5): 10-16.
- [13] 吴凡, 周云, 冯冬涵, 等. 光储充一体化快充站日前运行策略[J]. 电测与仪表, 2020, 22(4): 1-7.
WU Fan, ZHOU Yun, FENG Donghan, et al. Day-ahead scheduling strategy of fast charging station with battery energy storage system and PV[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 22(4): 1-7.
- [14] 单栋梁, 刘向立, 徐利凯, 等. 用户侧光储充一体化智能微电网系统应用研究[J]. 电器与能效管理技术, 2020(2): 41-46.
SHAN Dongliang, LIU Xiangli, XU Likai, et al. Research on application of intelligent micro-network system with user side light storage and charge integration[J]. Electrical and Energy Management Technology, 2020(2): 41-46.
- [15] 程杉, 杨堃, 魏昭彬, 等. 计及电价优化和放电节制的电动汽车充电站有序充放电调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 1-8.
CHENG Shan, YANG Kun, WEI Zhaobin, et al. Orderly charging and discharging scheduling of an electric vehicle charging station considering price optimization and discharge behavior control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 1-8.
- [16] LIU H, HUANG K, YANG Y, et al. Real-time vehicle-to-grid control for frequency regulation with high frequency regulating signal[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 141-148.
- [17] 王倩倩, 孙帅, 旦增巴桑, 等. 分布式电网多能互补电源输出电压自动开关控制方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(2): 244-247.
WANG Qianqian, SUN Shuai, DAN Zengbasang, et al. Distributed power grid multi-energy complementary power supply output voltage automatic switch control method[J]. Automation and Instrumentation, 2021(2): 244-247.
- [18] 胡文强, 吴在军, 窦晓波, 等. 负荷虚拟同步机及其低电压故障穿越控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 100-107.
HU Wenqiang, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. Load virtual synchronous machine and its low voltage ride-through control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 100-107.
- [19] MAZ Y, ZHONG Q C, YAN J D. Synchronverter-based control strategies for three-phase PWM rectifiers[C] // 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), July 18-20, 2012, Singapore, Singapore: 225-230.
- [20] 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.
- [21] 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): 544-556.
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): 544-556.
- [22] 朱小鹏, 卫志龙, 颜全椿, 等. 基于虚拟惯性自适应算法的电动汽车控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 134-141.
ZHU Xiaopeng, WEI Zhilong, YAN Quanchun, et al. Control strategy of electric vehicle based on virtual inertial adaptive algorithms[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 134-141.
- [23] 邵志芳, 张东强. 基于合约负荷曲线的多能互补电力系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1758-1766.
SHAO Zhifang, ZHANG Dongqiang. Capacity configuration optimization of multi-energy complementary power system based on contract load curve[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1758-1766.
- [24] 冯奕, 应展烽, 颜建虎. 考虑碳排放成本的多能互补微能源网储能装置优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 92-99.
FENG Yi, YING Zhanfeng, YAN Jianhu. Optimized operation of energy storage in a multi-energy complementary micro-energy network considering carbon emission cost[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 92-99.
- [25] 陈少霞, 李庆博. 离网型光储一体化发电系统的研究[J]. 电力学报, 2017, 32(4): 275-280.
CHEN Shaoxia, LI Qingbo. Research on off-grid power generation system integrated photovoltaic and energy storages[J]. Journal of Electric Power, 2017, 32(4): 275-280.

收稿日期: 2021-08-24; 修回日期: 2021-11-03

作者简介:

林晓明(1993—), 男, 硕士, 研究方向为电动汽车与智能用电技术; E-mail: linxm4@csg.cn

唐建林(1994—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电动汽车充电与碳计量技术; E-mail: tangjl2@csg.cn

张帆(1996—), 男, 硕士, 研究方向为电动汽车无线充电与直流计量技术。E-mail: zhangfan4@csg.cn

(编辑 姜新丽)