

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.D202016

基于虚拟同步策略的电动汽车 V2G 充放电系统 研究及样机实现

陈天锦¹, 牛高远¹, 甘江华¹, 陈枫², 刘向立¹, 孟凡提¹, 刘超¹, 贾甜¹

(1. 许继电源有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 为了解决大规模电动汽车和大容量新能源接入电网导致的电网负担加重及频率、电压等关键指标波动问题, 提出将虚拟同步(Virtual Synchronous, VS)控制策略应用于电动汽车双向充放电(Vehicle-to-Grid, V2G)系统中。首先设计基于虚拟同步原理的充放电系统结构, 其次在 VS 控制器中设计虚拟惯量、阻尼及励磁等参数, 使 V2G 系统具备传统电网的运行外特性, 并对工作模式分类。在 Matlab R2019a/Simulink 环境中, 充放电的同时模拟频率和电压扰动, 对典型的工作模式进行仿真分析。结果表明: 所使用的虚拟同步控制策略在 V2G 系统中具有良好的有功、无功跟踪性能; 能够快速响应电网异常并及时调节充放电功率或向电网反馈无功功率, 提高了电网的稳定性和抗干扰能力。最后, 基于虚拟同步策略研制出一台 60 kW 充放电样机, 并成功应用于示范项目中。

关键词: 电动汽车; 充放电; 虚拟同步; 调节; 功率

Research and prototype manufacture on electric vehicle V2G systems based on virtual synchronous control strategy

CHEN Tianjin¹, NIU Gaoyuan¹, GAN Jianghua¹, CHEN Feng², LIU Xiangli¹, MENG Fanti¹, LIU Chao¹, JIA Tian¹

(1. Xuji Power Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: When large-scale electric vehicles and large-capacity new energy are connected to a power grid, the grid burden and the voltage fluctuate frequently. A Virtual Synchronous (VS) control strategy can be applied to V2G systems. First, a V2G system structure is designed based on the virtual synchronization principle; secondly, the simulation parameters of virtual inertia, damping and excitation characteristics in the VS controller are designed to make the V2G system have the same external characteristics as the traditional grid, and working modes are classified. An experimental environment is built in Matlab R2019a/Simulink to simulate the frequency and voltage disturbance of a power grid while charging and discharging. The typical working mode is simulated and analyzed. Results show the virtual synchronous control strategy has good tracking performance. It can quickly respond to the abnormal power grid, and adjust the active power or feedback the reactive power to the grid in a timely fashion, so as to improve the stability and anti-interference ability. Finally, a V2G prototype with 60 kW power is developed using VS strategy, and the application is completed in the demonstration project site.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0106305).

Key words: electric vehicle; charge and discharge; virtual synchronous; adjust; power

0 引言

近年来, 我国为应对不断升级的能源危机和环境污染问题, 正在大力发展电动汽车, 鼓励人们通过绿色环保的方式出行。插电式混合动力电动汽车

(PHEV)和纯电动汽车(BEV)是我国“十二五”期间节能与新能源汽车发展的重要方向。作为电动汽车配套使用的核心供电基础设施, 电动汽车充电桩也获得了突飞猛进的发展, 根据中国电动汽车充电基础设施促进联盟(EVCIPA)统计, 截至2020年5月, 全国充电桩累计数量为129.9万台, 同比增加33.1%。随着“新能源充电桩”被列为新型基础设施建设的

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0106305)

七大领域之一,可以预见的是以后会有越来越多的电动汽车通过充电桩接入电网。但当大规模电动汽车同时接入电网取电时,能量的单向流动势必会加重电网负担、改变配电网原有的电源结构、运行方式和潮流水平等^[1],导致电能质量变差。尤其是在用电高峰期进行充电,将加剧电网的不确定性,恶化电力系统运行指标,导致居民负荷“峰上加峰”,迫使供电设备增容、扩容,并造成供电设备利用率下降,不利于电网的稳定、经济运行。

另一方面,以光伏、风电为代表的可再生能源,以其分布广、无污染、易于规模化等特点受到重视^[2],在全国各地得到迅速建设,装机容量也在不断攀升,国家发改委发布的《可再生能源发展“十三五”规划》指出,要实现2020年、2030年非化石能源占一次能源消费比重分别达到15%、20%的能源发展战略目标。截至2018年年底,全国风电累计并网装机容量达1.84亿kW,光伏发电累计装机容量达到1.74亿kW^[3]。但可再生能源的功率输出会随着外界能量的变化而发生涨落,具有典型的随机性特点,使电网系统的电压和频率等关键指标时常波动^[4],而且绝大部分的分布式电源都是通过电力电子变流器接入电网,由于逆变器并网系统缺乏惯性和阻尼特性,当大量分布式电源并网后,电网频率难以稳定保持^[5-6]。与传统同步发电机有着本质的区别,其过载能力小、转动惯量低,不具备调频、调压等主动支撑能力的特性,给新能源消纳和电网安全稳定运行带来严峻挑战^[7]。

对于上述电网问题,目前主要通过两种技术进行优化,一种是V2G技术,一种是虚拟同步机(Virtual Synchronous Machine, VSM)技术。前者将电动汽车蓄电池看作移动的储能设备参与电网调频^[8],通过控制策略使得电动汽车在电网负荷高峰期时,对电网反向放电,实现削峰填谷^[9],不但缓解线路压力、促进可再生能源消纳,而且能提供给车主经济收益;后者在电力电子变换器的控制策略中,引入同步电机的机械方程和电磁方程,模拟同步电机惯性行为中的虚拟惯量、虚拟阻尼等,使得电源侧或负荷侧的电力电子变换器具备同步电机的机电外特性^[10-11],可以自主参与电网管理,在电网电压或频率异常时,输出无功功率或有功功率,从而及时对电网进行响应和支撑,以抵御外部扰动对同步系统的干扰^[12-13]。

未来绝大多数的负荷都会通过电力电子变换器接入电网^[14],电动汽车作为典型的负荷侧设备,其大部分时间都处于闲置阶段,完全可以通过蓄电池参与电网需求侧响应,在实现V2G能量双向互动的

同时,利用虚拟同步策略根据电网频率和电压变化,实时调整充放电负荷功率,满足调频和调压需求。目前对VSM的研究主要集中于建模分析、参数整定等理论分析,以及探讨在光伏电站、交直流微电网、高压直流输电等多种场景的应用方面,将电动汽车V2G技术和VSM技术结合进行负荷虚拟同步机(Load Virtual Synchronous Machine, LVSM)的研究尚处于起步阶段^[15],且文献[15]提出一种LVSM的拓扑结构,并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,但其研究重点在于电网故障时的低电压穿越控制方法,负荷不具备向电网反馈能量的功能。文献[16]首次提出具有虚拟同步功能的三相脉宽调制整流器,可工作于恒功率或者恒电压两种工作模式,能够实现单位功率因数的校正,获得良好的电能质量。文献[17]研究了虚拟同步电机技术在电动汽车快速充电过程中的应用,给出了控制环核心参数的选取方法,但研究的50kW样机直流侧DC/DC变换器输出只有48V,不能反映目前主流电动汽车充电高电压大电流的特性,而且不具备V2G功能。文献[8]在电动汽车虚拟同步机的AC/DC侧引入虚拟同步机控制技术,设计VSM控制模块,给出微电网频率调节计算公式,采用下垂控制方式模拟了电动汽车充放电参与微电网一次和二次调频的效果,但没有考虑稳定电网电压的作用,且仅限于仿真阶段,没有进行实际样机实现。文献[18]提出基于同步逆变器的电动汽车V2G充放电控制方法,并利用T-S模糊控制使同步逆变器根据电网状态和电动汽车电量情况,自动决策虚拟同步工作模式和充放电调节功率,但其仿真电路功率参数为10kW,与目前主流的充电桩功率偏差较大,同时缺少对控制策略有效性的理论分析。文献[19]在微电网系统中设计了双向DC/DC变换器,并利用虚拟同步发电机技术进行自适应控制,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,不能模拟电动汽车通过两级变换实现调频调压的过程。文献[20]提出利用并网光储虚拟同步机控制方式对储能系统的充放电功率进行限制,避免储能的过放和过充。

本文针对目前电动汽车在充放电过程中参与电网调频、调压研究的不足,在V2G系统中采用VSM技术的控制策略,设计具备虚拟同步特性的充放电电机,模拟有功功率-频率和无功功率-电压下垂控制环节,并根据可参与电网调节的充放电总功率,合理设置调频系数和调压系数,在充放电过程中实时检测电网异常情况,主动调节充放电有功功率或无

功率, 在实现“削峰填谷”功能的同时, 及时向电网提供惯量或阻尼支撑, 起到调频调压的作用, 从而促进电网安全稳定运行。根据实验仿真结果, 完成一台具有虚拟同步功能的 60 kW 充放电电机研制和示范应用。

1 电动汽车充放电系统结构

1.1 V2G 基本结构模型

图 1 所示为 V2G 系统基本结构示意图, 它描述了插电式混和动力汽车或纯电动汽车与电网之间的一种互动关系。随着电动汽车蓄电池技术及 V2G 技术的发展, 车载大容量动力电池可以视为电网的分布式移动储能单元。当电网负荷过高和汽车闲置时, 电动汽车通过非车载充放电电机或外接电力电子变流装置向电网馈电, 实现车载蓄电池与电网之间能量的双向流动, 成为绿色环保智能电网的重要部分。



图 1 V2G 系统基本结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of V2G system

1.2 电动汽车 V2G 充放电系统架构

基于图 1 所示的基本结构, 设计 V2G 系统架构。如图 2 所示, 充放电系统主要由双向同步逆变器单元^[16]、双向 DC/DC 变换单元、充放电控制器、电动汽车蓄电池等组成, 其中双向同步逆变器包括双向 AD/DC 变换器和虚拟同步控制器(VS 控制器); 充放电系统工作流程及各部分作用如下:

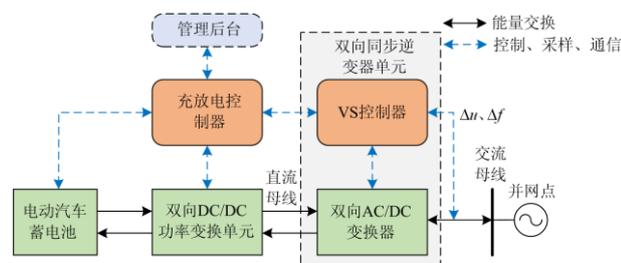


图 2 基于虚拟同步原理的充放电系统架构

Fig. 2 Structure of charge and discharge system based on VS principle

1) 充放电控制器

与蓄电池管理系统(Battery Management System, BMS)通信, 获取当前的充放电电压、充放电电流及最高允许充电功率、最高允许放电功率等参数, 计算出允许调整的有功或无功功率值; 与 VS 控制器通信, 传输当前的充放电功率及允许调整的有功或无功功率值范围, 并获取 VS 控制器决策出的工作模式及最终可调节的有功或无功功率等参数; 与双向 DC/DC 功率变换单元通信, 下发 VS 控制器决策出的最终可调节的有功功率输出指令; 与管理后台通信, 执行后台调度管理命令, 并反馈运行参数。

2) 虚拟同步控制器

采集双向 AC/DC 变换器并网点的电压、频率值波动数据, 模拟同步发电机的转动惯量、阻尼及励磁控制特性, 并设置最大可调节的有功或无功功率值; 当电网发生频率或电压波动时, 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, 结合当前充放电状态, 输出最终工作模式; 同时, 综合比较最大可调节的有功或无功功率值、允许可调节的有功或无功功率值范围、系统需要调整的有功或无功功率值, 取三者中的最小值作为最终可调节的功率值; 将最终的工作模式及最终可调节的功率值下发至双向 AC/DC 变换器执行; 并通过充放电控制器下发至 DC/DC 变换单元同步执行功率调整指令值。

3) 双向 AC/DC 变换器

执行虚拟同步控制器功率指令, 调节充放电有功功率和无功功率输出, 并向 VS 控制器反馈当前运行参数。

4) 双向 DC/DC 功率变换单元

稳定其与双向 AC/DC 变换器之间的母线电压, 根据充放电控制器下发的有功功率指令, 调节输出功率, 与双向 AC/DC 变换器保持功率平衡。

5) 电动汽车蓄电池

提供充放电系统所需的充电和放电模式下的电池特性及功率支持。

6) 管理后台

根据区域电网需求, 下发调度管理指令。

2 双向充放电电路模型及控制结构

2.1 电路拓扑结构

图 3 所示为双向充放电电路的拓扑结构, 交流侧双向 AC/DC 变换器采用中点钳位式三电平结构, 直流侧双向 DC/DC 功率变换单元采用三相交错并联式 Buck-boost 结构, 前后两级通过直流母线实现功率平衡。其中: V_{ga} 、 V_{gb} 、 V_{gc} 分别为并网各相

电压; L_g 、 R_g 分别为网侧电感和电阻; L_s 、 R_s 和 C 组成 LC 滤波器; U_a 、 U_b 、 U_c 为 LC 滤波器电容侧端电压; e_a 、 e_b 、 e_c 为双向 AC/DC 变换器三相电压;

i_a 、 i_b 、 i_c 为交流侧电流; U_{dc} 为前后级直流母线电压, V_t 为电池端电压。

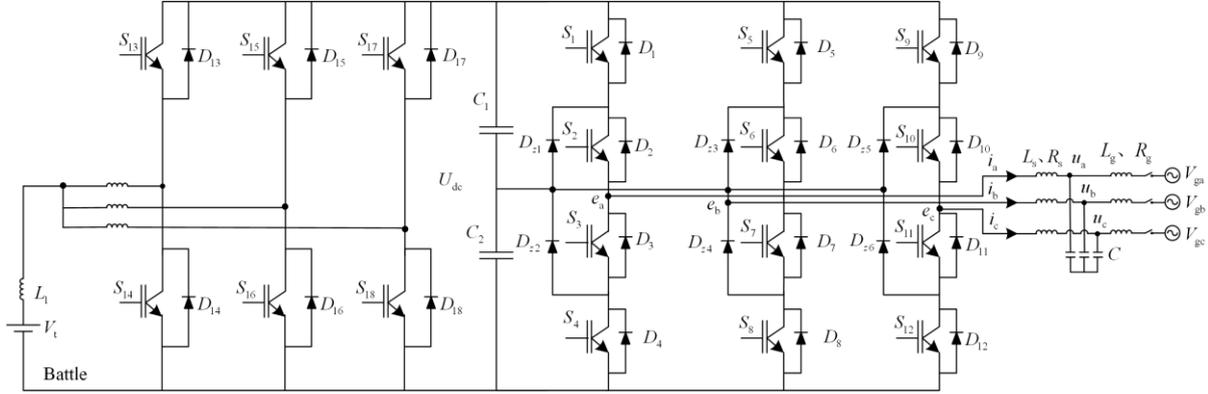


图 3 双向充放电电路拓扑

Fig. 3 Circuit topology of charge and discharge system

根据文献[21]的惯量、阻尼及励磁控制特性模拟方法, 借鉴传统同步发电机的机械方程和电磁方程来控制并网逆变器, 并设计控制策略。将图 3 所示的 LC 滤波器阻抗 L_s 、 R_s 设定为同步发电机定子等效阻抗; e_a 、 e_b 、 e_c 设定为等效电动势; 电流 i_a 、 i_b 、 i_c 设定为定子等效三相电流。如此即可将双向 AC/DC 变换器在数学模型上等效为一个同步发电机, 具备同步发电机的频率和电压下垂控制特性。

同步发电机的外特性模型主要由机械方程和电磁方程体现^[17-22], 其中机械方程为

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(T_m - T_e - T_d) \quad (1)$$

$$T_d = D(\omega - \omega_0) \quad (2)$$

式中: J 为同步发电机的转动惯量, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; ω 为同步发电机的机械角速度和电气角速度(设极对数为 1); ω_0 为电网同步角速度, 单位为 rad/s ; T_m 、 T_e 、 T_d 分别为同步发电机的机械转矩、电磁转矩和阻尼转矩, 单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$; D 为阻尼系数, 单位为 $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$ 。其中, 电磁转矩 T_e 可表示为

$$T_e = P_e / \omega = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega \quad (3)$$

式中: e_a 、 e_b 、 e_c 分别为同步发电机电势, 单位为 V ; i_a 、 i_b 、 i_c 分别为同步发电机输出电流, 单位为 A ; P_e 为同步发电机输出电磁功率。

从式(1)、式(2)中可知, 转动惯量使并网逆变器对功率-频率的动态调节具备惯性, 阻尼系数使并网逆变器具备抑制网侧功率振荡的特性, 从而可有效提高电网运行的稳定性^[23-24]。

从图 3 中可得到电磁方程为

$$\frac{di_{abc}}{dt} = \frac{1}{L}(e_{abc} - u_{abc} - Ri_{abc}) \quad (4)$$

式中, L 、 R 、 u_{abc} 分别为同步发电机的同步电感、同步电阻和机端电压。

2.2 同步逆变器控制机制

图 4 所示为双向同步逆变器的控制原理框图, 主要分为两部分, 即电压-无功调节及其对应电气部分, 频率-有功调节及其对应机械部分^[25-28]。以下分别为有功功率调节和无功功率调节的实现机制。

1) 有功-频率控制机制

频率是电力系统运行的重要指标, 在传统发电机组中都装有调速器, 当电网频率与额定频率不一致时, 调节机械转矩可以改变有功功率输出, 以稳定频率。基于此, 可通过调节同步发电机的虚拟机械转矩 T_m 来调节并网逆变器的有功功率指令。其中 T_m 由两部分组成, 分别为机械转矩指令 T_0 和频率偏差反馈指令 ΔT , T_0 可表示为

$$T_0 = P_{ref} / \omega \quad (5)$$

式中, P_{ref} 为并网逆变器的有功指令。

若同步发电机机端频率与电网额定频率发生偏差, 则产生的机械功率偏差指令为

$$\Delta T = -k_f(f - f_0) \quad (6)$$

即可得到

$$k_f = -\frac{\Delta T}{f - f_0} = -\frac{\Delta T}{\Delta f} \quad (7)$$

式中: f 为同步发电机机端频率; f_0 为电网额定频率; k_f 为频率调节系数; Δf 为频率波动量。

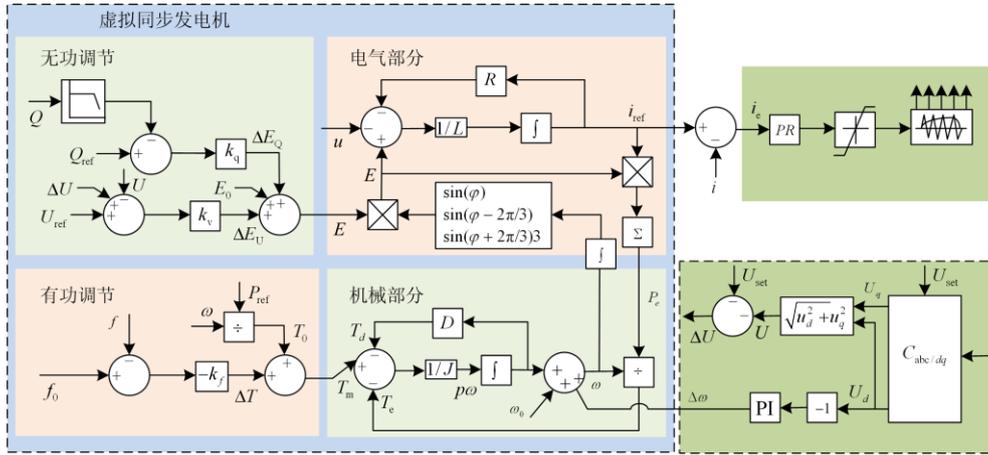


图 4 双向同步逆变器控制框图

Fig. 4 Control diagram of bidirectional synchronous inverter

从式(7)可知, 虚拟同步发电机提供了旋转器件的转动惯量, 通过设计虚拟惯量环节和下垂环节, 可模拟同步发电机的机械惯性和一次调频特性。参数 k_f 为虚拟同步发电机的有功-频率下垂系数, 定义为所需转矩改变量与频率改变量的比值。根据式(5)和式(7)可知, 当频率波动为 Δf 时, 同步发电机的有功功率调节量为

$$\Delta P = \Delta T \omega = -k_f \Delta f \omega = k_f \Delta f \quad (8)$$

式中: ΔP 为有功功率调节量; $k_f = -k_i \omega$, 为有功功率调节系数。

式(8)的物理意义在于, 虚拟同步发电机不但能跟踪机端频率的异常波动, 而且能够根据频率调节系数自动调节有功功率, 为电网提供有功支撑, 以抑制电网频率指标进一步恶化。

2) 无功-电压控制机制

电压与系统无功密切相关, 同步发电机发出的无功功率大小是通过改变励磁电流来调节的, 励磁电流增加时发出的无功功率增加。借鉴传统发电机特性, 当机端电压发生偏差时, 可通过调节虚拟同步发电机的励磁, 进而改变虚拟电势 E , 来调节机端电压和无功。虚拟电势 E 可表示为

$$E = E_0 + \Delta E_Q + \Delta E_U \quad (9)$$

式中: E_0 为空载电势, 是逆变器空载运行的机端电压; ΔE_Q 为需要调节的无功功率对应部分; ΔE_U 等效为同步发电机励磁调节器的输出。 ΔE_Q 具体可表示为

$$\Delta E_Q = k_q (Q_{ref} - Q) = k_q \Delta Q \quad (10)$$

式中: k_q 为无功功率调节系数; Q_{ref} 为并网逆变器的无功指令; Q 为逆变器机端输出的瞬时无功功率值; ΔQ 为需要调节的无功功率。

ΔE_U 具体可表示为

$$\Delta E_U = k_u (U_{ref} - U) \quad (11)$$

式中: k_u 为电压调节系数; U_{ref} 、 U 分别为逆变器机端电压的有效值指令和实际值。

从式(10)可看出, 通过设计虚拟励磁和下垂控制环节, 可模拟同步发电机的励磁控制特性, 参数 k_q 为虚拟同步发电机无功-电压下垂系数, 定义为无功功率改变量与电压改变量的比值。式(10)的物理意义在于, 虚拟同步发电机不但能跟踪机端电压的异常波动, 而且能够根据电压调节系数自动调节无功功率, 为电网提供无功支撑, 以抑制电网电压指标进一步变化。

因此, 当并网逆变器的下垂控制模式起作用时, 能够根据实时检测到的电网频率和电压与其额定值之间产生的异常偏差情况, 在给定值的基础上自主计算需要调节输出的有功和无功功率, 参与电网的调频调压。

3 双向充放电系统工作模式及功率调节范围

3.1 工作模式

当并网点频率和电压处于正常波动范围或额定值时, 双向充放电系统有充电和放电两种标准的工作状态, 如果在充放电过程中, 并网点频率或电压出现异常变化, 波动范围超出正常值, 则需要进行有功功率调节或无功功率调节。如表 1 所示, 状态排列组合计算后会出现 8 种工作模式。

基于 BMS 系统保护的原则, 电动汽车蓄电池电量允许过充或过放, 因此, 当需要调节充放电功率时, 在虚拟同步控制器中设置系统当前的充放电功率只能向下调整, 不能向上调整。如图 5 所示, 工作模式②出现时, 需要增加充电功率, 落入充电

时的虚拟同步不响应区；工作模式③出现时，需要增加放电功率，落入放电时的虚拟同步不响应区，此两种工作模式系统可不进行有功功率调节。

表 1 充放电系统工作模式

Table 1 Working mode of V2G system

标准工况	并网点频率变化		并网点电压变化	
	异常下降	异常上升	异常下降	异常上升
充电	模式①	模式②	模式⑤	模式⑥
放电	模式③	模式④	模式⑦	模式⑧

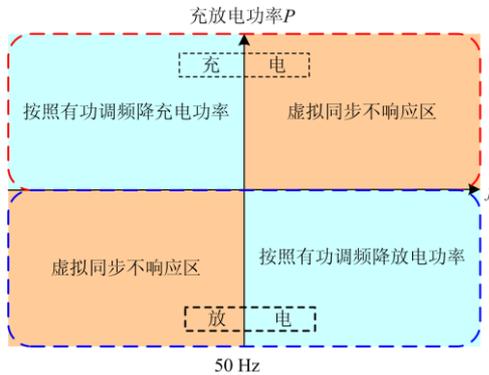


图 5 有功功率调节区域

Fig. 5 Adjust area of active power

3.2 功率调节范围

如本文 1.2 节所述，当充放电系统处于虚拟同步响应模式时，VS 控制器根据当前状态，最终下发的功率调节值通常会受三个方面的范围限制，即最大可调节的有功或无功功率值、允许可调节的有功或无功功率值、系统需要调整的有功或无功功率值。

1) 最大可调节功率值

本文设计的 V2G 样机额定充放电功率为 60 kW(kvar)，因此样机实现时，双向 AC/DC 变换器和双向 DC/DC 功率变换单元设置有相同的额定功率，设为 P_n ，取 $P_n = 60 \text{ kW(kvar)}$ ；设双向 AC/DC 变换器做无功调节时，能够输出的无功功率极限值为 Q_n ，取 $Q_n = 60 \text{ kvar}$ ，在实际功率调节中，为了保持一定的功率余量，并考虑并网特性要求，设置双向 AC/DC 变换器和双向 DC/DC 功率变换单元最大可调节的有功功率值为额定值的 40%，即 $\Delta P_{m1} = 40\% P_n = 24 \text{ kW}$ 。双向 DC/DC 功率变换单元最大可调节的无功功率值为额定值的 40%，即 $\Delta Q_{m1} = 40\% Q_n = 24 \text{ kvar}$ 。

根据国家标准 GB/T 15945-2008《电能质量 电力系统频率偏差》规定，“电力系统正常运行条件下频率偏差极限为 $\pm 0.2 \text{ Hz}$ ，当系统容量较小时，偏

差极限可以放宽为 $\pm 0.5 \text{ Hz}$ ”，根据国家标准 GB/T 12325-2008《电能质量 供电电压》规定，“20 kV 及以下三相供电电压偏差为标称电压的 $\pm 7\%$ ”。因此为体现系统耐受指标扰动的优越性，设计并网点频率波动范围为 $[47.5 \text{ Hz}, 51.5 \text{ Hz}]$ ，即下限波动范围为 $[47.5 \text{ Hz}, 50 \text{ Hz}]$ ，上限波动范围为 $(50 \text{ Hz}, 51.5 \text{ Hz})$ ，当频率落入上下限范围时，进行有功调频；同时设计并网点电压波动范围为 $[80\% U_n, 120\% U_n]$ ，即电压偏差为额定电压的 $\pm 20\%$ ，其中， U_n 为额定交流单相电压，取 $U_n = 220 \text{ V}$ ，当电压落入上下限范围时，进行无功调压。图 6 和图 7 所示分别为有功调频和无功调压的最大可调节区域。

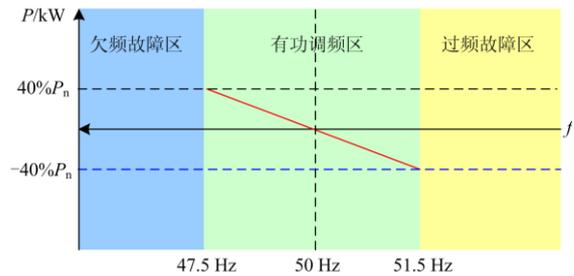


图 6 有功调频区域

Fig. 6 Frequency regulation area by active power

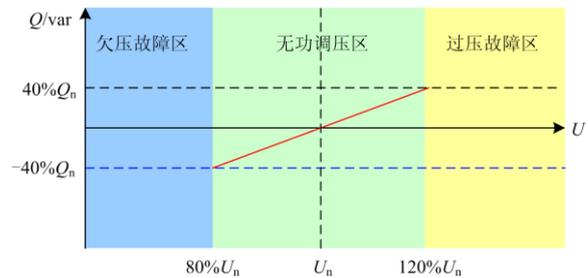


图 7 无功调压区域

Fig. 7 Voltage regulation area by reactive power

由以上设置的最大可调节有功功率值和频率波动范围，并根据式(7)可知有功功率调节系数为

$$k_F = \frac{2 \times \Delta P_{m1}}{51.5 - 47.5} = 12 \text{ kW/Hz} \quad (12)$$

同理，由设置的最大可调节无功功率值和电压波动范围，并根据式(10)可知无功功率调节系数为

$$k_q = \frac{2 \times \Delta Q_{m1}}{2 \times 20\% U_n} = 0.545 \text{ kvar/V} \quad (13)$$

2) 允许可调节功率值

充放电系统正处于充电或放电状态时，若并网点频率波动处于异常水平，设当前的充电有功功率为 P_c ，当前的放电有功功率为 P_f ，允许可调节的有功功率值 ΔP_{m2} 等同于 ΔP_{m1} 。充放电系统正处于充电

或放电状态时, 若并网点电压波动处于异常水平, 设当前的充电有功功率为 P_c , 则允许可调节的无功功率值为 $\Delta Q_{m2} = \sqrt{60^2 - P_c^2}$, 当前的放电有功功率为 P_f , 则允许可调节的无功功率值为 $\Delta Q_{m2} = \sqrt{60^2 - P_f^2}$ 。

3) 系统需要的调节功率值

根据式(12)和式(13), 当并网点频率偏差值为 Δf 时, 系统需要的有功功率调节值为

$$\Delta P_{m3} = k_F \Delta f \quad (14)$$

式中, ΔP_{m3} 为系统需要的有功功率调节值, 单位为 kW。

当并网点电压偏差值为 Δu 时, 系统需要的无功功率调节值为

$$\Delta Q_{m3} = k_q \Delta u \quad (15)$$

式中, ΔQ_{m3} 为系统需要的无功功率调节值, 单位为 kvar。

虚拟同步控制器接受充放电控制器发送的允许可调节功率值, 并根据调节系数和电网指标波动情况, 计算出系统需要调节的功率值, 同时结合系统设置的最大可调节功率值, 最终将最小的可调节功率值作为命令执行值, 下发给双向 AC/DC 变换器和双向 DC/DC 变换单元。

4 仿真分析及样机实现

为验证虚拟同步控制策略在充放电系统中的有效性, 使用 Matlab R2019a/Simulink 搭建试验电路模型进行仿真分析, 设计同步发电机的关键参数如表 2 所示。电动汽车蓄电池类型为磷酸铁锂电池, 额定电压为 303 V, 电池容量为 270 A·h。以下重点对四种典型的工作模式进行仿真模拟和分析。

表 2 同步发电机关键参数

Table 2 Key parameters of synchronous generator

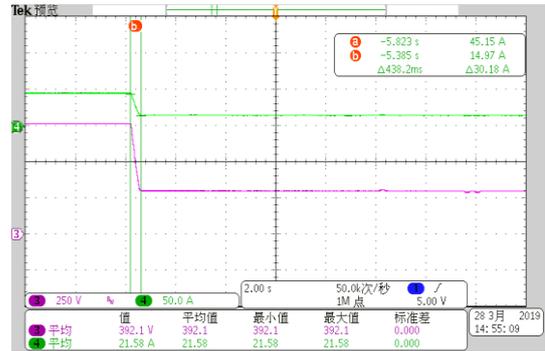
参数	数值	参数	数值
额定功率 P_n / kW	60	网侧电阻 R_s / Ω	0.5
额定频率 f_0 / Hz	50	滤波电感 L_s / μ H	1 000
交流额定相电压有效值 U_n / V	220	滤波电阻 R_f / Ω	0.24
网侧电感 L_s / μ H	500	滤波电容 C / μ F	25

4.1 有功调频仿真分析

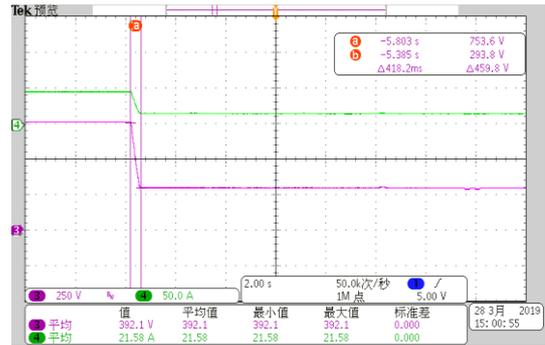
1) 充电时有功调频

系统充电时, 设置电网侧频率为额定值, 在 BMS 系统模拟界面设置所需充电电压为 750 V, 充电电流为 45 A, 启动充电, 系统处于稳压状态; 某时刻调节电网侧频率从额定值 50 Hz 下降至 48 Hz, 由表 1 可知, 此时系统响应频率波动, 应该进入工作模式①, 减少充电功率。根据式(14), 系

统需要调节的有功功率 ΔP_{m3} 为 24 kW, 小于等于最大可调节功率值和允许可调节功率值, 最终虚拟同步控制器、充放电控制器分别下发给双向 AC/DC 变换器及双向 DC/DC 变换单元的有功功率调节值为 24 kW。如图 8 所示, 图 8(a)、图 8(b)分别为有功调频后功率降低及产生的电压波动结果, 通道 3、4 分别为充电输出的电压和电流。



(a)



(b)

图 8 充电状态下有功调频仿真结果

Fig. 8 Simulation results of active power adjust under charging state

由图 8(a)可知, 调频前的当前实际输出电流为 45.15 A, 输出电压为 753.6 V, 输出有功功率 $P_c = 34.03$ kW, 电网频率突降后, 充电电流由 45.15 A 降低至 14.97 A, 变化量为 30.18 A, 频率响应时间为 438.2 ms。计算可知, 实际减少的输出功率为 $\Delta P_c = 22.74$ kW, 功率调节误差为 -5.25%。由图 8(b)可知, 在稳压模式下, 控制器下发的需求电流理论应减少值为 31.85 A, 即由 50 A 减少至 18.15 A, 在负载内阻不变的情况下, 调频后系统实际已处于限流模式, 导致输出电压出现向下波动的趋势。

2) 放电时有功调频

系统放电时, 设置电网侧频率为额定值, 在 BMS 系统模拟界面设置放电直流母线电压为 700 V, 放电直流母线电流为 68 A, 启动放电; 某时刻调节电网侧频率从额定值 50 Hz 上升至

51 Hz, 从表 1 可知, 此时系统响应频率波动, 应该进入工作模式④, 减少放电功率。根据式(14), 系统需要调节的有功功率 ΔP_{m3} 为 12 kW, 小于最大可调节功率值和允许可调节功率值, 最终虚拟同步控制器、充放电控制器分别下发给双向 AC/DC 变换器及双向 DC/DC 变换单元的有功功率调节值为 12 kW。图 9 所示为功率调节的仿真结果, 通道 3、4 分别为直流母线电压和电流。

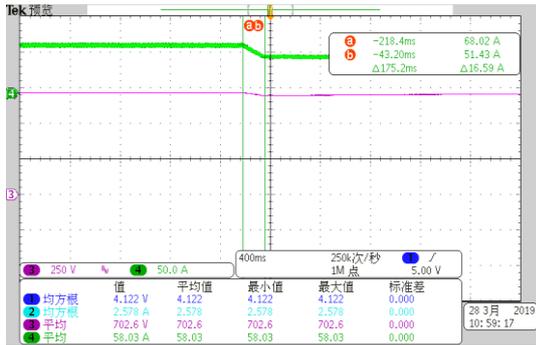


图 9 放电状态下有功调频仿真结果
Fig. 9 Simulation results of active power adjust under discharging state

由图 9 可知, 调频前后的实际母线电压为 702 V, 调频前的实际母线电流为 68.02 A, 实际放电功率 $P_f = 47.75$ kW, 调频后母线电流下降为 51.43 A, 变化量为 16.59 A, 频率响应时间为 175.2 ms。计算可知, 实际减少的放电输出功率为 $\Delta P_f = 11.65$ kW, 功率调节误差为 -2.92%。

4.2 无功调压仿真分析

1) 充电时无功调压

系统充电时, 设置电网侧电压为额定值, 在 BMS 系统模拟界面设置所需充电电压为 750 V, 充电电流为 70 A, 启动充电。如图 10 波形所示, 通道 1、2 分别为交流侧电压和电流, 通道 3、4 分别为直流侧充电输出电压和电流, 能够看出调压前当前实际充电电压约为 750 V, 充电电流约为 45 A, 当前的充电输出功率为 $P_c = 33.75$ kW, 由于双向 AC/DC 变换器额定功率为 60 kW, 则计算可知允许的可调无功功率 $\Delta Q_{m2} = \sqrt{60^2 - 33.75^2} = 49.61$ kvar。某一时刻调节电网侧单相电压有效值从额定 220 V 下降至 180 V, 从表 1 可知, 此时系统响应电压波动, 应该进入工作模式⑤, 双向 AC/DC 变换器向电网提供无功功率。根据式(15), 系统需要调节输出的无功功率 $\Delta Q_{m3} = 21.6$ kvar。

对比 ΔQ_{m1} 、 ΔQ_{m2} 、 ΔQ_{m3} 可知, 最终虚拟同步控制器下发给双向 AC/DC 变换器的无功功率调节值为 21.6 kvar。

由图 10 可知, 当电压突降时, 由于无功电流的叠加, 导致交流侧电流在原基础上出现明显上升的现象, 在 19.1 ms 时间内, 峰峰值从 69.98 A 增加为 84.09 A, 计算可知产生的无功电流峰峰值为 $\Delta I_Q = \sqrt{84.09^2 - 69.98^2} = 46.63$ A, 则双向 AC/DC 变换器瞬时产生的实时无功功率为 $\Delta Q_t = \Delta I_Q \times 380 \times \sqrt{3} / \sqrt{2} = 21.70$ kvar, 无功功率调节误差为 0.46%。

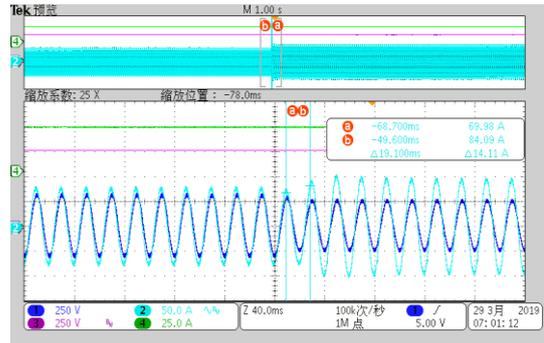


图 10 充电状态下无功调压仿真结果
Fig. 10 Simulation results of reactive power adjust under charging state

2) 放电时无功调压

系统放电时, 设置电网侧电压为额定值, 在 BMS 系统模拟界面设置放电直流母线电压为 750 V, 直流母线电流为 50 A, 启动放电。如图 11 波形所示, 通道 1、2 分别为交流侧电压和电流, 通道 3、4 分别为直流母线电压和电流, 某一时刻调节电网侧单相电压有效值从额定值 220 V 下降至 190 V。从图 11 中可明显看出, 交流侧电压下降的同时, 由于双向 AC/DC 变换器发出无功功率, 无功电流的叠加导致交流侧电流明显上升。限于篇幅, 此处不再做定量分析。

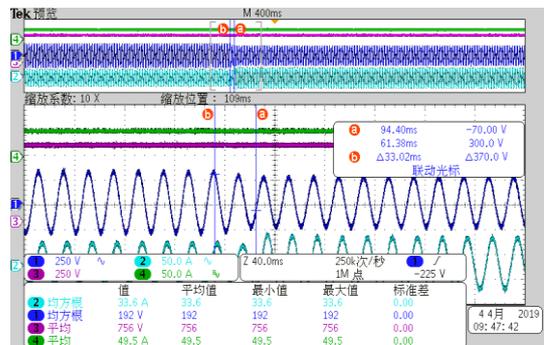


图 11 放电状态下的无功调压仿真结果
Fig. 11 Simulation results of reactive power adjust under discharging state

从上述仿真结果分析可知: 无论在充电或放电过程中, 如果电网频率发生波动, 系统都能够快速

响应功率调节需求, 提供抑制频率波动所需的能量; 如果电网电压发生波动, 系统也能相应地及时发出支撑电网的无功功率, 可缓解电网电压的进一步变化。由于本次仿真实验样机的可调节功率太小, 对整个电网的调频调压作用比较微弱, 但证明了本文所采用的虚拟同步策略在充放电系统中的正确性和有效性, 为大规模大容量电动汽车同时参与充放电系统的调频调压提供了原理验证。

4.3 样机实现

基于图 2 所示的充放电系统架构和仿真验证结果, 研发设计 1 台功率为 60 kW 的“电动汽车直流双向充放电机电”。图 12 所示为研发样机在国网电动汽车公司“V2G 及云储能示范项目”中待机状态的场景, 图 13 所示为样机在项目现场对接比亚迪 E6 车辆进行充放电工作的场景。实测结果表明, 样机能够实现充放电工况的稳定运行及其在虚拟同步作用下的调频调压功能, 各项测试指标符合要求。另外, 为了增强客户使用的体验感, 满足功能多样性, 在样机设置界面中提供了虚拟同步功能的投/退可选按钮, 当虚拟同步功能退出时, 系统只单纯实现 V2G 功能, 不参与电网的调频调压。图 14 所示为样机放电工作状态的参数界面, 从图中可知, 系统在放电的同时, 虚拟同步功能也处于投入状态。



图 12 样机的待机状态

Fig. 12 Standby state of the prototype

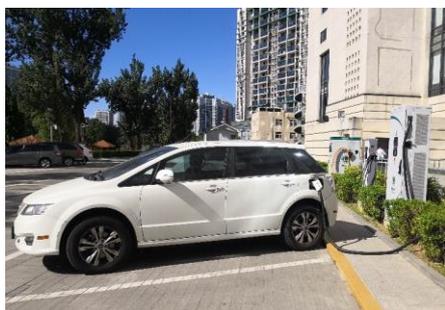


图 13 样机的工作状态

Fig. 13 Working state of the prototype



图 14 工作参数界面

Fig. 14 Interface of working parameter

5 结论

近年来, 不同类型的新能源通过电力电子器件并网的容量不断扩大, 其本身具有的波动性、间歇性及低转动惯量等特点使其难以与传统电网的外特性保持一致, 影响电网的运行稳定性。尤其是当前电动汽车大规模接入电网已成为必然趋势, 短时间内巨大能量的单向流动更是加剧了线路的负担, 电网电压、频率等关键指标发生异常波动的概率增大。

V2G 技术使得分布式存在的电动汽车蓄电池能够与电网实现双向友好互动。在充电集中时段, 大容量蓄电池的反向放电可实现“削峰”; 在充电低谷时段, 大功率充电可实现“填谷”。本文基于 V2G 技术的良好特质, 为优化电网质量, 进一步将虚拟同步控制策略应用于充放电系统中, 并通过仿真分析进行了试验验证, 最终成功实现了样机的示范应用, 可得到如下结论:

1) 设计的虚拟同步控制器模拟虚拟惯量、阻尼和励磁特性, 使得双向充放电系统具备传统同步发电机的调频调压功能, 在充放电的同时能够实时检测电网频率和电压变化, 并及时提供有功功率或无功功率支撑, 增强电网的抗扰动和接纳新能源的能力, 提高了电网的稳定性和经济性。

2) 单台电动汽车蓄电池的容量有限, 基于 BMS 系统保护原则, 超过充放电系统允许调节的范围或要求增大充放电功率时, 系统可不作响应。

3) 有功功率及无功功率的实际调节值与理论值之间还存在一定误差, 后续需要对算法进行优化, 以达到更高的调节精度。

4) 样机的研发和现场实车测试, 为完善充放电系统的功能性能提供了实用化的参考数据, 同时为产品的推广应用奠定了基础。

参考文献

- [1] 李振兴, 孟晓星, 田斌, 等. 电动汽车接入充放电对配

- 电网继电保护的影响[J]. 高压电器, 2018, 54(4): 188-194.
- LI Zhenxing, MENG Xiaoxing, TIAN Bin, et al. Influence of electric vehicle charging and discharging on distribution network relay protection[J]. High voltage Apparatus, 2018, 54(4): 188-194.
- [2] 张宁, 杨洪明, 徐岩, 等. 局部阴影条件下太阳能电池-超级电容器件的充放电控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 72-79.
- ZHANG Ning, YANG Hongming, XU Yan, et al. Charge and discharge control method of solar cell-supercapacitor under partial shading condition[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 72-79.
- [3] 水利水电规划设计总院. 中国可再生能源发展报告[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [4] 陈懿, 刘涤尘, 吴军, 等. 分布式光伏电源对配电网电压波动的影响研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(14): 27-32.
- CHEN Yi, LIU Dichen, WU Jun, et al. Research on influence of distributed photovoltaic generation on voltage fluctuations in distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(14): 27-32.
- [5] 沈诞熠, 赵晋斌, 李吉祥, 等. 分布式电源并网惯性功率补偿研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 51-57.
- SHEN Danyu, ZHAO Jinbin, LI Jixiang, et al. Analysis and application of inertia power compensating of grid-connected distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 51-57.
- [6] BADAL F R, DAS P, SARKER S K, et al. A survey on control issues in renewable energy integration and microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 87-113. DOI: 10.1186/s41601-019-0122-8.
- [7] 马钦林, 杨欢, 何绍民. 基于虚拟同步机运行模式的平滑算法[J]. 电源学报, 2018, 16(6): 1-10.
- MA Yilin, YANG Huan, HE Shaomin. Smoothing algorithm based on operating mode of virtual synchronous generator[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(6): 1-10.
- [8] 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.
- [9] ZHANG G, JABBAR I F, BROWN T, et al. Coordinating plug-in electric vehicle charging with electric grid: valley filling and target load following[J]. Journal of Power Sources, 2014, 267: 584-597.
- [10] 沈天娇, 曾成, 王琦, 等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用[J]. 电工电气, 2017(9): 6-10.
- SHEN Tianjiao, ZENG Cheng, WANG Qi, et al. Development and application of virtual synchronous machine technologies in power systems[J]. Electrotechnics Electric, 2017(9): 6-10.
- [11] 任自盼, 鲁春宝, 赵亚龙, 等. 光伏虚拟同步发电机建模与仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 92-99.
- REN Zipan, LU Baochun, ZHAO Yalong, et al. Research on modeling and simulation of photovoltaic virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 92-99.
- [12] 吕志鹏, 盛万兴, 刘海涛, 等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 349-359.
- LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-359.
- [13] 苏剑. 分布式电源与微电网并网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [14] ZHONG Q C. Power electronics-enabled autonomous power systems: next generation smart grids[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 2017.
- [15] 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.
- [16] MA Z Y, ZHONG Q C, YAN J D. Synchronverter-based control strategies for three-phase PWM rectifiers[C] // IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), July 18-20, 2012, Singapore, Singapore: 225-230.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 朱小鹏, 卫志龙, 颜全椿, 等. 基于虚拟惯量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.
- [20] 高建瑞, 李国杰, 汪可友, 等. 考虑储能充放电功率限制的并网光储虚拟同步机控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 134-141.
- GAO Jianrui, LI Guojie, WANG Keyou, et al. Control of grid-connected PV-battery virtual synchronous machine considering battery charging/discharging power limit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 134-141.
- [21] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.
- LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [22] 谢卫才, 王世豪, 何力, 等. 一种基于虚拟同步发电机的多逆变器微电网频率无差调节策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 169-175.
- XIE Weicai, WANG Shihao, HE Li, et al. A frequent deviation-free regulation strategy of microgrid based on the VSG of multi-inverter[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 169-175.
- [23] LIU Ju, YANG Dongjun, YAO Wei, et al. PV-based virtual synchronous generator with variable inertia to enhance power system transient stability utilizing the energy storage system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 429-437. DOI: 10.1186/s41601-017-0070-0.
- [24] 林静怀, 范士雄, 徐郑崎, 等. 基于模糊层次分析法和 LSTM-注意力机制的电网运行态势感知评估模型[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(4): 58-66.
- LIN Jinghui, FAN Shixiong, XU Zhengqi, et al. A situation awareness model for power grid operation based on fuzzy analytic hierarchy process and LSTM-Attention mechanism[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(4): 58-66.
- [25] 范亚楠, 刘天羽, 江秀臣, 等. 基于最优阻尼比虚拟同步发电机的优化控制策略[J]. 电测与仪表, 2020, 57(7): 60-67.
- FAN Yanan, LIU Tianyu, JIANG Xiuchen, et al. Optimal control strategy of virtual synchronous generator based on optimal damping ratio[J]. Electric Measurement & Instrumentation, 2020, 57(7): 60-67.
- [26] 张宸宇, 缪惠宇, 史明明, 等. 一种基于虚拟同步机的背靠背系统控制策略[J]. 电测与仪表, 2019, 56(19): 107-113.
- ZHANG Chenyu, MIAO Huiyu, SHI Mingming, et al. A back-to-back system control strategy based on virtual synchronous generator[J]. Electric Measurement & Instrumentation, 2019, 56(19): 107-113.
- [27] 李军, 胡传意, 彦辉, 等. 基于改进型虚拟同步发电机的功率控制[J]. 电测与仪表, 2019, 56(3): 133-138.
- LI Jun, HU Chuanyi, YAN Hui, et al. Power control based on improved virtual synchronous generator[J]. Electric Measurement & Instrumentation, 2019, 56(3): 133-138.
- [28] 颜湘武, 吕佳伟, 王侯珂, 等. 适用于电动汽车快充的虚拟同步电动机技术研究[J]. 新能源汽车供能技术, 2019, 3(2): 6-11.
- YAN Xiangwu, LÜ Jiawei, WANG Yuke, et al. Research on virtual synchronous motor technology for electric vehicle fast charging[J]. Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles, 2019, 3(2): 6-11.

收稿日期: 2020-09-30; 修回日期: 2020-11-22

作者简介:

陈天锦(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力电子技术、电能变换及储能技术应用等; E-mail: chentianjindy@126.com

牛高远(1985—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电动汽车充换电技术、岸电供电技术及新能源并网技术等。E-mail: niugaoyuandy@126.com

(编辑 葛艳娜)