

适用于电动汽车快充的虚拟同步电动机技术研究

颜湘武, 吕佳伟, 王侯珂, 贾焦心

(华北电力大学分布式储能与微网河北省重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 为了实现电动汽车对传统燃油汽车的替代, 电动汽车充电技术是需要重点研究解决的。针对电动汽车快充需求, 提出了一种引入虚拟同步电动机技术的快充方案, 该快充方案由 AC-DC 和 DC-DC 两级变换电路来实现。介绍了应用于 AC/DC 接口的虚拟同步电动机技术的原理、拓扑及控制方案, 使电动汽车充电机具有同步机相同的惯量、阻尼、有功调频和无功调压等特性, 同时可实现电动汽车恒流或恒功率充电; 直流感口采用双向 DC-DC 变换电路, 通过闭环控制稳定直流母线电压。在 Matlab/Simulink 中搭建了电动汽车快充的仿真模型, 仿真结果验证了所提方法的有效性和正确性。

关键词: 电动汽车; 快速充电; 虚拟同步电动机

Research on Virtual Synchronous Motor Technology for Electric Vehicle Fast Charging

YAN Xiangwu, LV Jiawei, WANG Yuke, JIA Jiaoxin

(Distributed Energy Storage and Microgrid Hebei Key Laboratory North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to replace traditional fuel vehicles with electric vehicles, it is necessary to study and solve the charging technology of electric vehicles. A fast charging scheme based on virtual synchronous motor (VSM) technology is proposed to meet the demand of fast charging for electric vehicles. The fast charging scheme is realized by AC-DC and DC-DC two-stage conversion circuit. The principle, topology and control scheme of VSM technology applied to AC/DC interface are introduced, so that the electric vehicle charger has the same characteristics of inertia, damping, and primary frequency/voltage regulation as synchronous motor and meanwhile realize the constant current or constant power charging of electric vehicle. DC interface adopts bidirectional DC-DC converter circuit to stabilize DC bus voltage through closed loop control. The simulation model of electric vehicle fast charging is built in Matlab/Simulink and simulation results verify the validity and correctness of the proposed method.

Key words: electric vehicle; fast charging; virtual synchronous motor

0 引言

随着经济的不断发展, 人们对于运输的需求不断增长, 使得汽车在世界范围内的保有量逐年上升, 而这一趋势却也引发了一系列的问题。以传统化石能源为动力的汽车在使用过程中不仅会排放大量加剧温室效应的 CO₂ 气体, 其尾气中还包含了 CO、HC、NO_x 等一系列污染环境的有害成分。同时传统汽车使用量的增加, 也加剧了世界范围内化石能源供需关系的紧张。为了解决日益增长的运输需求和环境保护、化石能源储量有限之间的矛盾, 人们将目光投向了电动汽车。

不同于普通大众所认为的“电动汽车是最近几年才发展起来的一种汽车类型”, 其实早在 1873 年

英国人罗伯特戴维森便研制成功了第一辆以蓄电池为动力、电机驱动的汽车, 其相比于 1885 年德国人卡尔·奔驰发明燃油驱动的三轮车还早了 12 年。同时对比蒸汽机汽车与内燃机汽车, 电动汽车在性能、操控性、噪音水平上均有着一定的优势, 这帮助其快速占领了小型轿车的市场。在 1900 年美国汽车总保有量的调研中, 电动汽车占到了 38%。但是受限于美国当时的电力供应状况, 电动汽车往往多见于城市之中, 在乡村地区很难得到应用与发展。而在 1911 年, 美国人凯特林发明的燃油汽车电起动机更是给了电动汽车以沉重打击。这一发明帮助燃油车摆脱了手摇曲柄的启动方式, 使妇女也可以独自驾驶汽车, 不仅极大地促进了燃油汽车的普及, 同时也加速了电动汽车的没落。到了 1924 年全美汽车展

时, 电动汽车的彻底销声匿迹则正式宣告了其诞生后第一个发展阶段的结束。回顾这一段发展历程, 可以发现当时电动汽车在动力补充的便捷性与速度上均不如燃油车; 同时受限于电池能量密度, 电动汽车在当时难以满足长里程续航的需求。综合以上因素来看, 电动汽车在当时的衰落有一定的必然性^[1]。

而推动电动汽车第二次发展的则是使用燃油车带来的一系列问题, 例如美国光化学烟雾事件、70年代的两次石油危机以及燃烧化石产生大量CO₂导致的温室效应。这些问题让人们逐渐意识到电动汽车才是未来的趋势, 至此电动汽车再次迎来了发展的曙光。目前欧洲主要国家都已经制定了相应的发展规划, 提出了燃油车禁售时间表, 以促进用户与企业由传统燃油车向电动汽车的过渡; 2017年, 电动汽车大功率充电国际标准第一次会议^[2]在荷兰举行, 对充电功率提出了350 kW至500 kW的新要求。国内在2013年由五部门联合发布了《乘用车企业平均燃料消耗量核算办法》, 其中规定了企业平均油耗, 以淘汰高耗能车型^[3]; 此外, 海南在今年四月宣布了全省范围的燃油车禁售时间, 成为了国内首个明确这一时间期限的省份^[4]。在这样的趋势下, 可以预见在未来的几十年内, 电动汽车工业与市场将会迎来爆炸式的发展。

但是要实现电动汽车对传统化石能源汽车的顺利替代, 首先要解决电动汽车大规模应用存在的问题。得益于电池技术与电力工业的发展, 目前电动汽车在充电便捷性与续航问题方面已经可以基本满足日常需求, 但是其在充电速度上依旧无法与传统燃油车型加油的速度相比。在这样的背景下, 发展电动汽车快速充电技术的重要性显而易见。通过电动汽车快速充电技术缩短汽车的加电时间, 不仅可以减轻普通用户从燃油汽车过渡到电动汽车时使用

习惯上的不适应, 还可以改善目前商用电动汽车的运营形式与效益, 同时这项技术也是未来加电站可以像传统加油站一样商业化运营的基础。不过电动汽车快速充电技术在解决传统充电技术加电速度不足的同时, 也产生了一定的问题。首先电动汽车对电网而言属于非线性负荷, 其在充电时会对电网波形质量造成不良影响; 其次当电动汽车采用大功率进行充电时, 负荷的频繁投切会进一步加剧电网频率、电压质量的恶化^[5-7]。

针对这种情况, 本文在电动汽车快充技术的基础上引入了虚拟同步电动机^[8-92](Virtual Synchronous Motor, VSM)技术, 使得网侧整流器具有同步电动机的运行特性, 在稳态时参与电网调节, 在暂态时为系统提供惯量与阻尼支撑^[10-00], 并通过仿真验证了所提方法的有效性。

1 技术方案

本文提出一种基于虚拟同步电动机的快充方案, 通过虚拟同步机技术将三相整流器在数学模型上等效为一台同步电动机; 同时将电动汽车电池看作负荷端, 等效为电动机的负荷。由于整流侧直流母线电压等级高, 而电动汽车电池充电电压相对较低, 所以在电动汽车的充电直流接口采用DC-DC变换器, 用以满足网侧与负荷侧的电压匹配。所提电动汽车快充控制结构如图1所示。

电动汽车充电系统拓扑主电路由三相电压型PWM整流器、LC滤波器、电网、直流母线电容(C_{dc})、DC-DC变换器、动力电池组成。图中所示控制模块包括有功频率控制模块、无功电压控制模块、电压合成模块、电磁方程模块、PR电流环控制模块、脉宽调制模块、双闭环模块。

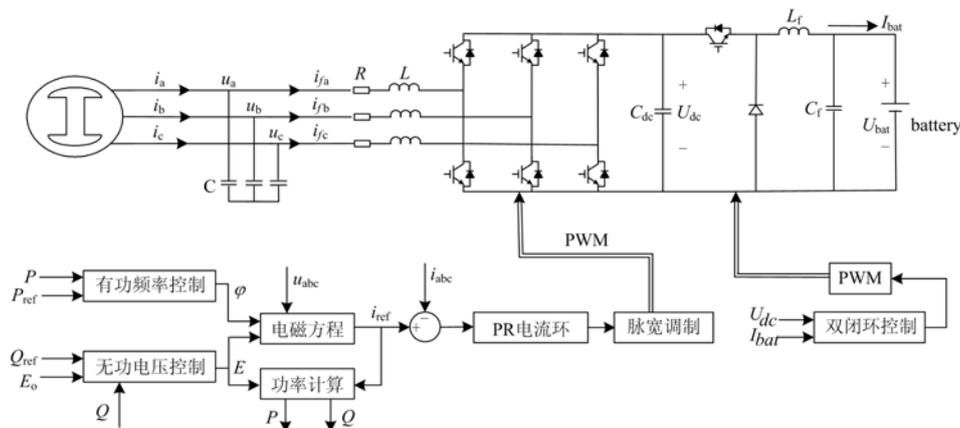


图1 应用VSM技术的电动汽车快充方案电路拓扑与控制框图

Fig. 1 Circuit topology and control block diagram of electric vehicle fast charging with VSM technology

本文所提电动汽车快充方案采用 VSM 控制技术, 可使电动汽车充电接口与电网形成友好互动^[11]。主电路电网侧采用三相电压源型 PWM 整流器, 通过 LC 滤波器与电网相连。控制结构具有功率因数高、谐波含量低、动态响应快的特点, 可以自适应地响应电网电压、频率等扰动, 并为系统提供惯性、阻尼支撑, 主动参与系统一次调节, 支持系统快速恢复稳定。直流接口通过 DC-DC 变换器与电池相连, 用双闭环控制结构稳定直流母线电压稳定^[12-13]。

1.1 区性交流侧接口控制

本文所提电网侧虚拟同步机的 AC-DC 整流控制框图如下图所示。

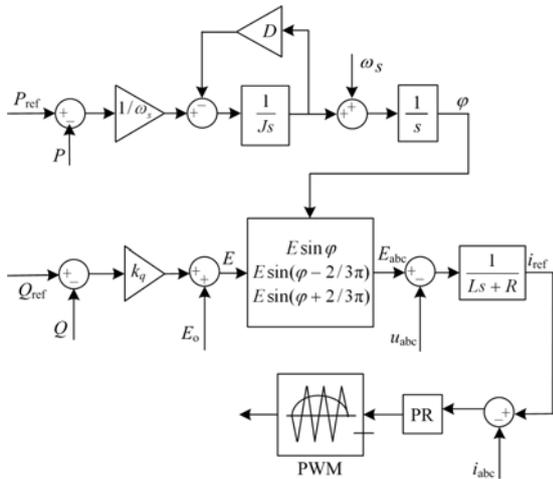


图 2 交流侧接口控制框图

Fig. 2 Control block diagram of AC side interface

借鉴传统同步电机的数学模型, 对比分布式可再生发电单元, 可以发现两者之间存在对应关系。

假设虚拟同步机的极对数为 1, VSM 的机械方程可以用同步发电机的转子方程来表示。

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_m - T_D \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega \\ T_D = D(\omega - \omega_s) \end{cases} \quad (1)$$

式中: J 为同步电机的转动惯量; T_e 、 T_m 、 T_D 分别为同步电机的电磁转矩、机械转矩、阻尼转矩; D 为阻尼系数; δ 为发电机的功角; ω_s 为并网额定角频率; ω 为同步机转子的实际角速度。

相对于虚拟同步发电机, 虚拟同步电动机与其算法的不同仅为将定子侧的电流符号取反; 电动汽车的充电接口对于 VSM 而言相当于负荷端。

同步电机的电磁方程为

$$L \frac{di_{abc}}{dt} = e_{abc} - u_{abc} - Ri_{abc} \quad (2)$$

式中: u_{abc} 为同步电机的端电压; e_{abc} 为 VSM 暂态电势; L 和 R 分别为同步电机的定子电感和电阻。

借鉴传统同步电机的数学模型, 对比分布式可再生发电单元, 可以发现两者之间存在对应关系^[14]。网侧滤波电感电阻对应同步电机的同步电感与电枢电阻, 整流器桥臂中点的输出端电压等效为电动机的暂态电势, 电动汽车充电电池相当于有功负荷。通过式(1)、式(2)可知, 机械转矩由虚拟同步电动机的有功给定, 电磁转矩由输出的暂态电势和网侧电流得到。当调节 VSM 的有功功率给定值时, 相当于调节同步电机的机械转矩, 原动机的转速随之变化, 调速器将提高或降低原动机的机械转矩, 达到新的功率平衡; 而惯量与阻尼的存在可以抑制功率突变, 防止系统震荡失稳, 改善系统的动态特性, 参与系统一次调节^[15]。

类似同步电机的励磁调节, 虚拟同步电动机通过调节虚拟内电势来调节端电压和无功。VSM 输出的虚拟暂态电势有电动机的空载电势和无功功率调节两部分。

$$\begin{cases} \Delta E_q = k_q (Q_{ref} - Q) \\ E = E_0 + \Delta E_q \end{cases} \quad (3)$$

式中: E_0 为 VSM 的空载电势; ΔE_q 为无功调节器的输出; k_q 为电压调节系数; Q_{ref} 为 VSM 的无功给定值, 一般给为 0; Q 为 VSM 实际输出的无功功率。然后通过电压合成模块即可得到 VSM 的电势电压向量。

$$e_{abc} = \begin{bmatrix} E \sin(\varphi) \\ E \sin\left(\varphi - \frac{2}{3}\pi\right) \\ E \sin\left(\varphi + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \quad (4)$$

忽略开关管损耗, 其中功频控制器主要负责在满足电池充电所需功率的同时, 为电网提供阻尼与惯性支撑, 并对电网频率变化做出响应; 励磁调节器主要负责对无功需求与电压偏差做出响应; 定子电压方程用于产生电流参考值; 内环电流调节器用于跟踪前级控制给出的参考电流。

1.2 直流接口控制

电动汽车交流侧接口输出给定值为 700 V, 所以直流侧充电接口采用 Buck 型 DC-DC 变换器, 进行高低压转换, 然后与电动汽车电池连接。在交流

侧 VSM 的控制策略中已经设定了有功功率的值, 即电动汽车的充电功率已经确定, 所以直流侧需要保持直流母线电压稳定。如图 3 所示, 电动汽车直流侧采用电压电流双闭环控制, 使直流母线电容 C_{dc} 稳定在 700 V, U_{dcref} 为直流母线电压的参考值, I_{bat} 为电动汽车充电电流。 U_{dcref} 与实际测得的直流母线电压的差值经过 PI 调节, 得到交流侧输出的电流参考值, 将其与实测的 $8I_{bat}$ 差值经电流环 PI 控制输出控制信号, 实现电池的大功率恒流充电。

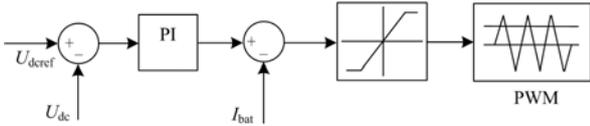


图 3 直流接口控制框图

Fig. 3 Control block diagram of DC interface

2 仿真分析

为了验证本文所提控制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 中搭建了仿真模型。电动汽车充电系统中的电路参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

参数	数值	参数	数值
L/mH	4	C_{dc}/mF	1.5
C/mF	1	L_f/mH	2
R/Ω	0.2	$C_f/\mu F$	50
D	2	J	0.01
P_{ref}/kW	10	Q_{ref}	0

为了测试电动汽车充电系统的性能, 本文测试了系统在不同工况下的运行结果。模拟分析了两种工况下的扰动: 即电网频率在 0.5 s 时突降 0.25 Hz; 系统给定有功输出在 0.8 s 时突降 2 kW。仿真波形如图 4 所示。

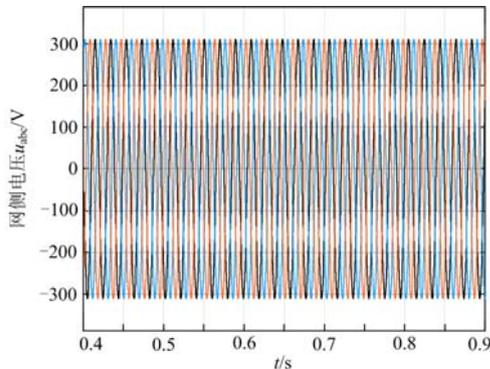


图 4 网侧电压

Fig. 4 Grid side voltage

仿真中动力电池容量设置为 100 Ah, 电流流向为网侧流向电池端对电池充电。第一种仿真工况 0.5 s 时电网频率突降 0.25 Hz, 由于并网频率突变引起额定角速度的变化, 根据系统有功频率环路可知系统输出有功降低, 并网电流也随之下落; 交流接口输出功率的降低同时引起电池侧充电电压的波动, 由于直流侧母线电压为双闭环控制, 母线电压几乎不变, 从而导致电池侧充电电流降低。第二种仿真工况系统给定有功输出突降, 由于设定系统输出无功为 0, 所以网侧电压幅值不变, 电流降低; 同时引起电池侧充电电流下降。

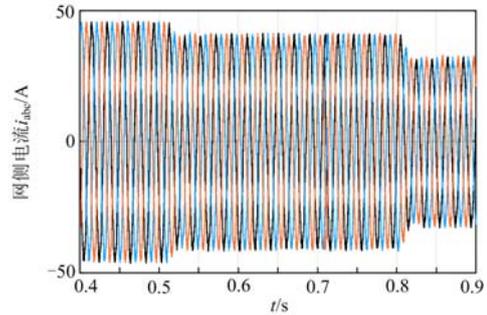


图 5 网侧电流

Fig. 5 Grid side current

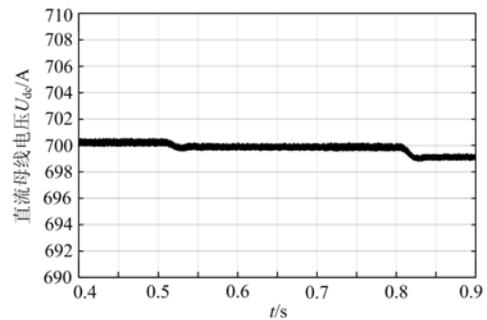


图 6 直流母线电压

Fig. 6 DC bus voltage

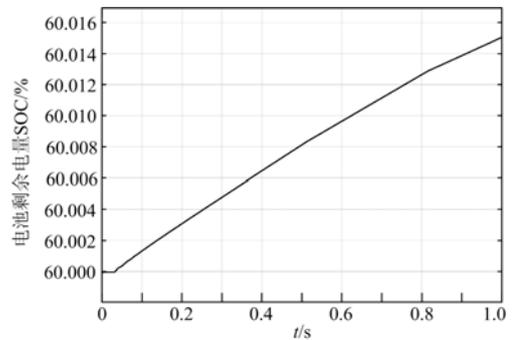


图 7 电动汽车剩余电量

Fig. 7 Electric vehicle remaining power

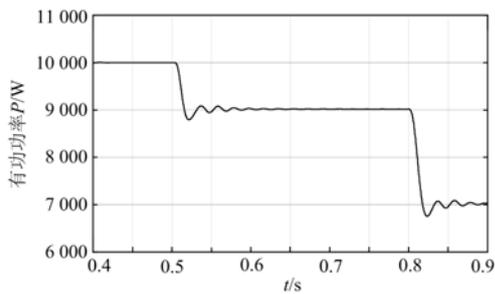


图 8 VSM 输出有功功率

Fig. 8 VSM output active power

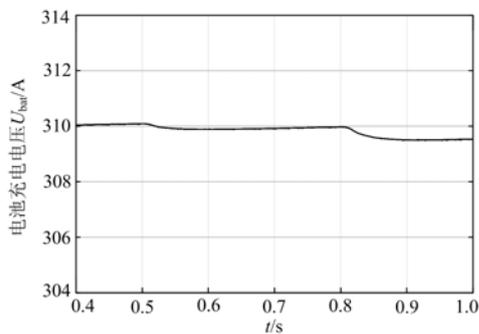


图 9 电动汽车充电电压

Fig. 9 Electric vehicle charging voltage

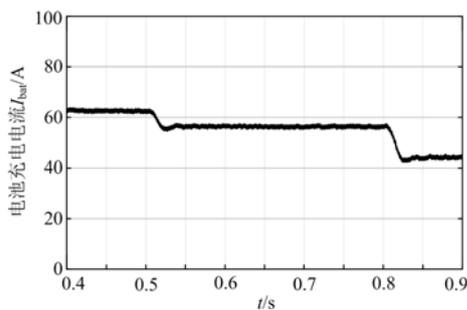


图 10 电动汽车充电电流

Fig. 10 Electric vehicle charging current

通过引入虚拟同步电动机的控制策略，使系统具备了惯量和阻尼特性。由仿真波形可以得出，当系统频率突变时，由于转动惯量对系统功率突变的抑制作用，所以 VSM 输出有功功率没有发生突变，网侧电流表现出平滑良好的阻尼特性，没有发生电流对系统的阶跃冲击影响，大概经过 0.1 s 的时间恢复稳定，验证了惯量与阻尼特性在系统发生扰动时对系统的有效调节作用。综合以上仿真结果，可以认为本文所提出的控制方案有效。

3 结论

当前限制电动汽车发展的重要原因之一就是电

动汽车的充电时间过长，所以电动汽车大功率充电是未来重点发展的关键技术。本文通过引入虚拟同步电动机技术，提出恒流快充方案，这种控制方案在实现恒流快充的同时，还可以向电网提供惯量和阻尼支撑，并参与电网一次调节。通过仿真验证得到，提出的控制策略可使网侧整流器具备同步电动机的运行特性，有效抑制功率振荡，改善并网点电流质量，增强了系统稳定性。

参考文献

- [1] 张文亮, 武斌, 李武峰, 等. 我国纯电动汽车的发展方向及能源供给模式的探讨[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 1-5.
ZHANG Wenliang, WU Bin, LI Wufeng, et al. Discussion on development trend of battery electric vehicles in china and its energy supply mode[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 1-5.
- [2] 中国投资咨询网. 2017 年电动汽车大功率充电国际第一次会议在荷兰举行 [EB/OL]. <http://www.ocn.com.cn/qiche/201704/dsvgw26144832.html>.
China Investment Consulting Network. The first international conference on high power charging of electric vehicles in 2017 was held in the Netherlands [EB/OL]. <http://www.ocn.com.cn/qiche/201704/dsvgw26144832.html>
- [3] 唐佳奇. 限制车企的达摩克利斯之剑"咖啡法"[EB/OL]. [2017-05-22]. http://auto.dzwww.com/data/news/stories_109515.html.
TANG Jiaqi. Damocles'Sword of restricting automobile enterprises: coffee law. http://auto.dzwww.com/data/news/stories_109515.html.
- [4] 东方网. 海南成为中国首个禁售燃油车的省份!燃油车不能买了么? [EB/OL]. <http://auto.Eastday.com/a/180416035617627.html>.
Eastday.com. Hainan has become the first province in China to ban the sale of fuel vehicles! Can't you buy fuel vehicles? [EB/OL]. <http://auto.Eastday.com/a/180416035617627.html>.
- [5] 邓磊, 刘敏, 应丽云. 不同充电模式下电动汽车充电站的仿真与谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 87-95.
DENG Lei, LIU Min, YING Liyun. Simulation and harmonic analysis of electric vehicle charging station under different charging modes[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 87-95.
- [6] 禹红, 夏向阳, 彭梦妮. 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. 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.
- [7] 周娟, 任国影, 魏琛. 电动汽车交流充电桩谐波分析及谐波抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 18-25.
- ZHOU Juan, REN Guoying, WEI Chen. Harmonic analysis of electric vehicle AC charging spot and research on harmonic restriction[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 18-25.
- [8] 黎凡森, 黄晓茜, 陈显东, 等. 电网负荷侧的虚拟同步电动机整流技术研究[J]. 黑龙江电力, 2018, 40(1): 18-21.
- LI Fansen, HUANG Xiaoxi, CHEN Xiandong, et al. Study on rectification technology of virtual synchronous motor at grid load side[J]. Heilongjiang Electric Power, 2018, 40(1): 18-21.
- [9] 张怡冰, 刘其辉. 基于虚拟同步机的电动汽车快速充电控制技术[J/OL]. 电测与仪表: 1-7. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20190123.1022.002.html>.
- ZHANG Yibing, LIU Qihui. Virtual synchronous machinebased fast charger control technology for electric vehicle[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-7. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20190123.1022.002.html>.
- [10] 范红, 董伟杰, 白晓民, 等. 基于虚拟同步电动机技术的变频器控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4447-4453.
- FAN Hong, DONG Weijie, BAI Xaiomin, et al. A novel frequency-converter control strategy based on virtual synchronous motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4447-4453.
- [11] 张波, 颜湘武, 黄毅斌, 等. 虚拟同步机多机并联稳定控制及其惯量匹配方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 42-52.
- ZHANG Bo, YAN Xiangwu, HUANG Yibin, et al. Stability control and inertia matching method of multi-parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 42-52.
- [12] 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.
- [13] 张莉, 张松. 电动汽车充电站的充放电控制策略研究[J]. 电子技术应用, 2018, 44(11): 150-153.
- ZHANG Li, ZHANG Song. Research on charging and discharging control strategy of electric vehicle charging station[J]. Application of Electronic Technique, 2018, 44(11): 150-153.
- [14] 刘东奇. 电动汽车 V2G 充放电智能控制与调度方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- LIU Dongqi. Research on the control method of bi-directional charging for electric vehicles and its coordination with generating system in V2G scenario[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [15] 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.

收稿日期: 2018-11-30

作者简介:

颜湘武(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为新能源电力系统分析与控制、现代电力变换、新型储能与节能技术。

E-mail: xiangwuy@ncepu.edu.cn