

电动汽车负荷虚拟同步机参与电网频率调节的 充放电策略与实现

李秉宇¹, 杜旭浩¹, 曾四鸣¹, 尹利科², 芮月晨³, 肖国春³

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021;

2. 河北拓朴建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050000;

3. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 随着电动汽车(EV)充电接口大量接入电网, 电力系统的稳定运行受到挑战。负荷虚拟同步机(LVSM)技术应运而生, 可以为电力系统提供惯量和阻尼支撑, 有助于提高电网的稳定性。本文在由虚拟同步发电机(VSG)模拟的电网与前级LVSM和后级EV电池充电变流器互联系统中, 提出了在恒流充电、恒压充电和恒流放电三种模式下适应电网频率变化的EV电池充放电策略及实现方法, 通过网-荷互动提高了电网频率的稳定性。仿真结果验证了所提出控制策略和实现方法的有效性和正确性。

关键词: 电动汽车充电; 负荷虚拟同步机; 网荷互动; 电网频率稳定性

DOI: 10.12067/ATEEE2012023

文章编号: 1003-3076(2021)06-0011-11

中图分类号: TM461

1 引言

近年来, 由于节能环保的优势, 电动汽车(Electric Vehicles, EV)引起了广泛的关注。按照充电速度划分, EV有慢速充电和快速充电两种充电模式, 且目前已有相关的EV充电标准, 例如SAE J1772^[1]。慢速充电可以在不需要配电网大容量的情况下对EV进行充电, 但是通常需要6~8 h才能为完全耗尽的标准EV电池充满电。因此, 快速充电更被用户所青睐, 仅需30 min即可从耗尽状态充电到电池容量的80%^[2]。另一方面, EV连接到电网的随机性使电网的规划和运营变得困难。并且, 相较于慢速充电, 快速充电需要电网提供更大容量的功率, 给电网的稳定运行带来了更多压力^[3]。

虚拟同步机(Virtual Synchronous Machine, VSM)控制通过电力电子装置模拟同步电机, 为电力系统提供惯量和阻尼支撑, 是一种解决大量电力电子装置接入电力系统, 造成稳定性问题的有效解决途径。VSM分为虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)和负荷虚拟同步机(Load-side

Virtual Synchronous Machine, LVSM)。VSG主要应用于新能源发电中^[4,5], 包括风电VSG和光伏VSG。LVSM包括采用VSM技术的各类用电设备, 例如含整流器的EV充电桩、变频设备和电子产品等^[6]。LVSM控制可以使整流器根据电网频率和电压实时调整负荷功率, 实现网-荷动态平衡。

将LVSM策略应用于整流器的控制中, 使EV与电网具有网-荷互动的功能, 通过虚拟惯性和阻尼提高电网电压和频率的稳定性, 可以减轻EV负荷对电网的影响。文献[7]提出了一种基于电流型负荷虚拟同步机的交流接口控制策略, 对恒定电压(Constant Voltage, CV)充电模式下EV负荷增加的工况进行了分析, 验证了虚拟惯性和阻尼可以实现柔性缓冲的功能, 但缺少对恒定电流(Constant Current, CC)模式的分析, 并且将EV负荷作为电阻负载进行分析, 这与EV负荷的实际特性不符。基于LVSM的EV充放电方法, 文献[8]中讨论了EV参与微电网的调频策略, 本质上是根据微电网的频率对EV负荷充电功率指令进行调整, 从而提升微电网的稳定性; 文献[9]中提出了一种自主降额运行

收稿日期: 2020-12-18

作者简介: 李秉宇(1981-), 男, 河北籍, 教授级高级工程师, 硕士, 研究方向为储能与电动汽车充放电技术;

芮月晨(1997-), 男, 四川籍, 硕士研究生, 研究方向为虚拟同步电机控制与电动汽车充电技术(通讯作者)。

的 LVSM 控制方法,减轻 LVSM 接入对电网频率的影响,但考虑的是无穷大电网,并用 LVSM 的虚拟频率代替电网频率分析,这并不是一种与电网频率实时交互的控制策略;文献[10]中提出了一种根据电网频率调节 PWM 整流器直流侧电压的网荷互动方法,但通常直流母线电压是不变的,且直流母线电压频繁波动会引起母线储能电容器发热。

EV 作为有源负荷,还可以提供 EV 入网 (Vehicle to Grid, V2G) 服务,通过 EV 电池储能改善电力系统的运行特性^[11]。文献[12]提出了一种基于单级式 EV 充电拓扑实现 V2G 功能的控制结构,实现了电网和 EV 之间的双向功率流动;文献[13]将 VSM 技术运用到单相单级式家用 EV 电池充电器的控制中,以提供更高质量的 V2G 服务,但该技术在三相两级式公共 EV 电池充电站中的可行性还有待研究。

本文在电压控制型 LVSM 的基础上,提出了一种后级 DC-DC 电动汽车充电变流器与电网频率实时交互的电动汽车快速充放电控制策略和实现方法,在 CC 充电、CV 充电和 CC 放电模式均能够根据电网频率的变化实时调整 EV 的充放电功率,有助于电网频率的恢复。而在 LVSM 虚拟惯性和阻尼的作用下,电网频率的变化率得到了有效衰减,电网频率的暂态和稳态稳定性均得到了提高。本文采用 VSG 模拟电网,通过本地负荷的变化影响电网频率,更加真实地反映了电网频率的变化过程。通过仿真,分析了采用本文所提控制策略前后电网频率随本地负荷变化的情况,验证了该策略和实现方法稳定电网频率的正确性和有效性。

2 电动汽车充放电控制策略

频率是衡量电能质量的一个重要指标,电力系统中频率的变化主要是由发电机损耗或负载增减引起的,而 3%~5% 的负载变化会对电力系统造成很大的干扰^[14]。为研究电动汽车负荷接入对电网的影响,本文考虑用 VSG 模拟电网,通过本地负载的增减来影响电网频率,相比于直接设定电网频率降低的方式,能够更加真实反映电网频率的变化过程。

2.1 系统模型

两级式 EV 充电桩与 VSG 模拟电网连接的拓扑及控制结构如图 1 所示。图 1 左侧的 DC-AC 变流器模拟电网、基于 VSG 控制,电网的有功功率指令 P_g^* 经过调速器生成机械功率 P_{mg} ,模拟了电力系统

一次调频。

$$P_{mg} = P_g^* - K_\omega (\omega_g - \omega_0) \quad (1)$$

式中, K_ω 为一次调频系数; ω_g 为 VSG 的角频率; ω_0 为额定角频率, $\omega_0 = 100\pi \text{ rad/s}$ 。

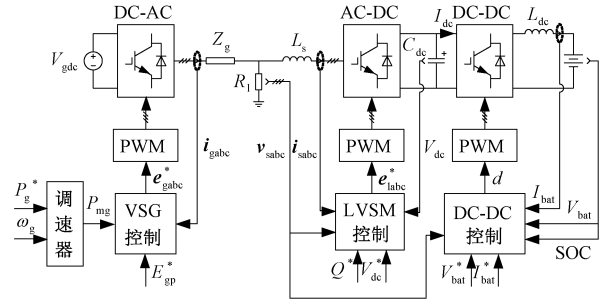


图 1 系统拓扑及控制结构

Fig.1 System topology and control structure

由于电网作为电源需要提供稳定的电压幅值,因此将传统 VSG 控制中的无功功率控制修改为电压幅值控制,具体的 VSG 控制框图如图 2 所示。图 2 中, E_g^* 为电网电压幅值给定, $M_{fg} i_{fg}$ 为 VSG 励磁磁链, P_{mg} 为 VSG 的机械功率指令, i_{gabc} 为电网三相电流, e_{gabc}^* 为 VSG 控制生成的三相电网电压指令。

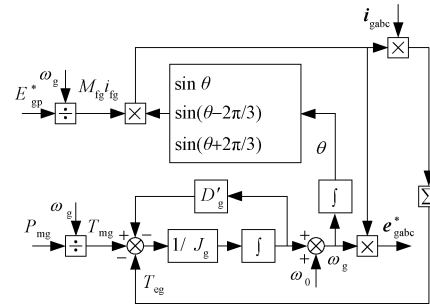


图 2 VSG 控制框图

Fig.2 VSG control block diagram

图 2 的下半部分是对同步发电机转矩方程的模拟。

$$T_{mg} - T_{eg} - D'_g (\omega_g - \omega_0) = J_g \frac{d\omega_g}{dt} \quad (2)$$

式中, T_{mg} 为 VSG 输入的机械转矩; T_{eg} 为 VSG 输出的电磁转矩; D'_g 为 VSG 的阻尼系数; J_g 为 VSG 的转动惯量。

考虑到机械功率 $P_{mg} = \omega_g T_{mg}$, 电磁功率 $P_{eg} = \omega_g T_{eg}$, 并将式(1)代入式(2)中,得到:

$$P_g^* - P_{eg} - \omega_g D'_g (\omega_g - \omega_0) = J_g \omega_g \frac{d\omega_g}{dt} \quad (3)$$

式中, $D_g = D'_g + K_\omega / \omega_g$ 。式(3)表明电网一次调频系数 K_ω 和阻尼系数 D'_g 可以合并为阻尼下垂系数

D_g , 考虑 $\omega_g \approx \omega_0$, 有 $D_g \approx D_g' + K_\omega/\omega_0$, 即这两个环节在功能上相同, 后续将采用 D_g 进行分析。

图 1 中, 本地负载 R_l 通过电网阻抗 Z_g 连接到电网, 同时两级式 EV 充电桩在 PCC 与 R_l 并联。 L_s 为前级 LVSM 的滤波电感, 其连接的 AC-DC 变流器基于 LVSM 控制, 具体的控制框图如图 3 所示。图 3 中, Q^* 和 Q 分别为 LVSM 无功功率给定和反馈值, $V_{sp(nom)}$ 和 V_{sp} 分别为 PCC 电压额定值和实际值, D_q 为无功下垂系数, K_q 为励磁磁链调节系数, $M_f i_f$ 为 LVSM 励磁磁链, V_{dc}^* 和 V_{dc} 分别为 LVSM 母线电压给定和反馈值, ω_m 为 LVSM 的角频率; i_{sabc} 为流过 LVSM 的三相电流, e_{labc}^* 为 LVSM 控制生成的三相虚拟内电势指令。

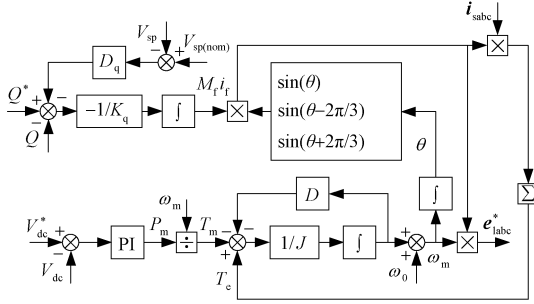


图 3 LVSM 控制框图

Fig.3 LVSM control block diagram

图 3 的下半部分是对同步电动机转矩方程的模拟。

$$T_e - T_m - D(\omega_m - \omega_0) = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (4)$$

式中, T_e 为 LVSM 输出的电磁功率; T_m 为 LVSM 的机械功率指令; D 为 LVSM 的阻尼系数; J 为 LVSM 的转动惯量。

基于 LVSM 的 AC-DC 变流器控制用于提供恒定的直流母线电压, 并使电动汽车负荷与电网在互动的过程中具备惯性和阻尼。

由于频率同步机制的存在, 电网中的同步发电机电源和同步电动机负荷能够根据电网频率调节自身的功率: 当电网频率升高, 输出或消耗的有功功率减少; 当电网频率降低, 输出或消耗的有功功率增加。借鉴这一运行经验, 基于 LVSM 控制的 EV 负荷在理论上具有一定的需求侧响应能力。但由于直流母线电压控制回路的存在, 当电网频率发生变化时, 仅依靠前级 AC-DC 变流器控制无法实现充放电功率的动态调节。

图 1 中, 后级 DC-DC 变流器基于双向 Buck-

Boost 拓扑, 用于实现 EV 充放电功率的控制和模式的切换, d 为后级 DC-DC 变流器的占空比。在通常采用的 CC/CV 充电模式中, 先通过 CC 模式充电至预定的电压, 此时电池的荷电状态(State of Charge, SOC)达到 80% 左右; 然后进入 CV 模式, 逐渐减小充电电流直至电量充满^[15]。整个充电过程中充电电流 I_{bat} 和电池电压 V_{bat} 的变化情况如图 4 所示, 电池电压建立后, 在很长一段时间内基本保持不变。

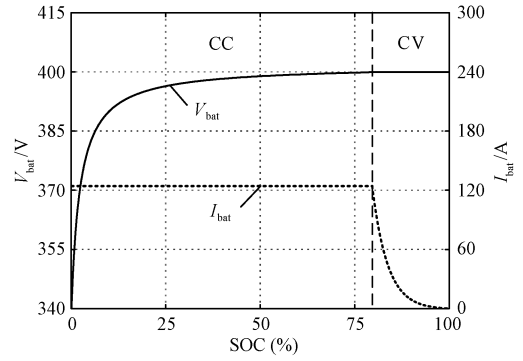


图 4 CC/CV 充电模式下的充电电流和电池电压

Fig.4 Charging current and voltage in CC/CV charging mode

2.2 网荷互动的充放电策略

当电力系统中负荷功率增加导致发电机出力与负荷功率不平衡时, 系统频率发生变化。虽然调速器具有一定的频率恢复功能, 但当仅依靠一次调频的作用已不能使频率保持在正常工作区域内时, 需要采取“低频减负荷”等措施维持系统安全稳定运行。

通过改变传统 DC-DC 变流器的控制方式, 使 EV 负荷与电网之间建立互动机制, 可以变传统的“切负荷”为实时的动态充放电功率调节, 使电网频率具有一定的自愈功能。本文所提出的具有网荷互动功能的 DC-DC 变流器控制框图如图 5 所示。

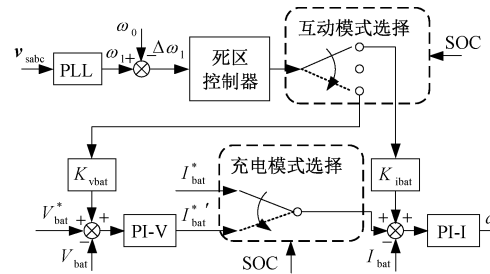


图 5 DC-DC 变流器控制框图

Fig.5 DC-DC converter control block diagram

图 5 中, v_{sabc} 为采样到的三相本地负载电压, 通过锁相环得到本地负载角频率 ω_1 , $\omega_1 \approx \omega_g$, ω_1 与额定角频率 ω_0 的差值 $\Delta\omega_1$ 为网荷互动所需的信息。

死区控制器可以设置网荷互动的条件,当 $|\Delta\omega_1|$ 未超过允许的角频率变化量 $\Delta\omega_{1(\max)}$ 时,互动模式选择模块中的开关与中间位置接通, EV 负荷与电网之间没有互动,避免了电池充电状态的频繁变化,有助于延长电池寿命。

当 $|\Delta\omega_1| > \Delta\omega_{1(\max)}$ 时,如果电池的 SOC 小于 80%, 充电模式选择模块中的开关接通 CC 充电指令 I_{bat}^* , 同时互动模式选择模块中的开关与上方位置接通, CC 充电模式下的实际电流指令被修改为 $I_{\text{bat}}^* + K_{\text{ibat}} \Delta\omega_1$ 。在闭环控制的作用下, 若 $\omega_1 < \omega_0$, 则充电电流减小, 反之充电电流增大; 当 SOC 大于 80%, 充电模式选择模块中的开关接通电池电压 PI 调节器的输出 I_{bat}^* , 同时互动模式选择模块中的开关与下方位置接通, CV 充电模式下的实际电压指令被修改为 $V_{\text{bat}}^* + K_{\text{vbat}} \Delta\omega_1$ 。在闭环控制的作用下, 若 $\omega_1 < \omega_0$, 则充电电压降低, 反之充电电压升高。所提出的控制策略实现了跟随频率动态变化的功率调节功能, 有助于电网频率恢复到额定值。

需要提供 EV 入网服务时, 各个模块开关的接法与 CC 充电模式相同, 不同之处仅在于 $I_{\text{bat}}^* < 0$ 。

3 参数的选取和设计

互联系统的主要参数见表 1。

表 1 系统主要参数

Tab.1 Main parameters of system

参数	数值
VSG 直流侧电压 V_{gdc}/V	700
VSG 各相内电势有效值 E_{g}/V	220
电网阻抗 Z_{g}/Ω	$0.12 + \text{j}0.63$
LVSM 直流侧电压给定值 V_{dc}^*/V	700
LVSM 直流侧电容 $C_{\text{dc}}/\mu\text{F}$	10 000
滤波电感 L_{s}/mH	2
直流侧电感 L_{dc}/mH	20
开关频率 f_{s}/kHz	10

3.1 模拟电网参数选取

设模拟电网容量 S_{g} 为 $100 \text{ kV} \cdot \text{A}$, 同步电机的惯性常数通常在 $2 \sim 10 \text{ s}$ 的范围内^[16], 取 VSG 的惯性常数 $H_{\text{g}} = 2 \text{ s}$ 。转动惯量与惯性常数的关系为:

$$J_{\text{g}} = \frac{2H_{\text{g}}S_{\text{g}}}{\omega_0^2} \quad (5)$$

由式(5)计算得到 $J_{\text{g}} = 4.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。实际中, 电网的转动惯量远大于 LVSM 的转动惯量。

阻尼下垂系数除了决定 VSG 的阻尼外, 还会影响 VSG 在本地负载变化后频率的稳态工作点, 通常

根据 100% 的有功功率变化对应于 $n\%$ 电网频率的变化来设计。

$$D_{\text{g}} = \frac{S_{\text{g}}}{\omega_0(\omega_0 \cdot n\%)} \quad (6)$$

参考输电网技术规范 EN 50438, 要求 100% 的有功功率变化对应于 2% 电网频率的变化^[17], 由式(6)计算得到 $D_{\text{g}} = 50.66 \text{ W} \cdot \text{s}^2/\text{rad}^2$ 。

3.2 电池参数选取

根据 SAE J1772, 用于 EV 快速充电的接口通常有 50 kW 和 100 kW 两种功率等级, 后级 DC-DC 电池充电变流器输出的直流电压范围在 208 ~ 600 V^[1]。本文选用 50 kW 的快充接口, 额定充电电流 $I_{\text{bat(nom)}} = 125 \text{ A}$ 。

准确的电池模型对于通过 EV 充放电过程的分析至关重要, 文献[18]中提出了用 SOC、端电压、开路电压、内阻和放电电流来描述电池电化学行为的模型。模型参数通过放电曲线计算, 并假定充电过程中参数相同。该电池模型计算数据与实际电池数据比较的结果表明, 该模型具有 90% 的准确度。本文拟采用文献[18]中介绍的模型, 电池参数见表 2。

表 2 电池参数

Tab.2 Battery parameters

参数	数值
完全充电电压 V_{full}/V	420
满容量 $Q_{\text{full}}/(\text{A} \cdot \text{h})$	50
指数电压 V_{exp}/V	400
指数电压容量 $Q_{\text{exp}}/(\text{A} \cdot \text{h})$	45
额定电压 V_{nom}/V	395
额定电压容量 $Q_{\text{nom}}/(\text{A} \cdot \text{h})$	10
电池内阻 R_{bat}/Ω	0.01

本文所采用的电池在额定放电电流下的放电曲线如图 6 所示。图 6 中包含指数区域、额定区域和建立区域。电池从完全放电的状态下开始充电时, 首先 CC 充电至接近额定区域的末端($\text{SOC} \approx 80\%$), 然后进行 CV 充电, 充电电流不断减小。

3.3 LVSM 参数设计

本文重点研究电动汽车负荷对电网频率的影响, 因此主要关注 LVSM 直流侧电压回路的参数设计。在 CC 充电模式下对 LVSM 进行参数设计, 设计结果适用于 CC 放电和 CV 充电模式。设直流侧电压 PI 调节器的比例系数为 K_{p} , 积分系数为 K_{i} , 直流侧电压的给定值和实际值分别为 V_{dc}^* 和 V_{dc} , 则直流侧电压 PI 调节器输出的机械功率指令 P_{m} 为:

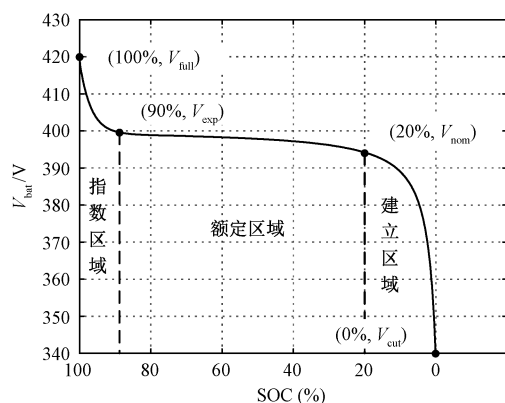


Fig.6 Battery constant current discharge curve

$$P_m = K_p (V_{dc}^* - V_{dc}) + K_i \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt \quad (7)$$

电网向 LVSM 传输的有功功率在直流侧被消耗, 且与 LVSM 相比, DC-DC 变流器的响应速度快得多, 因此在 LVSM 控制下可以认为 I_{bat} 能够对指令值 I_{bat}^* 进行实时跟踪, 则 LVSM 消耗的有功功率 P_c 为:

$$P_e = V_{dc} C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} + (I_{bat} + K_{ibat} \Delta \omega_l) V_{bat} \quad (8)$$

Fig.8 Frequency characteristics of LVSM
DC-link voltage loop (parameter 1)

当 $J=0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 、 $D=27 \text{ W} \cdot \text{s}^2/\text{rad}^2$ 时,为保证良好的控制性能,调整 $K_p=60 \text{ W/V}$ 、 $K_i=100 \text{ W/}$

(V · s), 此时相角裕度 $\gamma = 60.3^\circ$, 幅值裕度 $G_m = 15.4$ dB。将这组 LVSM 参数命名为参数 2。

3.4 DC-DC 变流器网荷互动参数设计

CC 充电时, 充电电流调节系数 K_{ibat} 反映了充电电流随电网频率变化的波动程度, 若电网频率下降 $n_i\%$ 时, LVSM 不再从电网吸收有功, 则 K_{ibat} 为:

$$K_{ibat} = \frac{I_{bat(nom)}}{\omega_0 \cdot n_i \%} \quad (13)$$

取 $n_i = 2$, 由式 (13) 得到 $K_{ibat} = 19.89$ A · s/rad。

CV 充电时, 电池电压过高不利于系统的安全运行, 电池电压过低会导致反向放电。因此, 考虑 CV 充电模式下电池电压允许的变化范围为 ΔV_{bat} 。设电网频率下降 $n_v\%$ 时, LVSM 电池电压达到最大允许跌落量, 则 K_{vbat} 为:

$$K_{vbat} = \frac{\Delta V_{bat}}{\omega_0 \cdot n_v \%} \quad (14)$$

取 $n_v = 2$, $\Delta V_{bat} = 10$ V, 由式 (14) 计算得到 $K_{vbat} = 1.59$ V · s/rad。

根据电力系统正常运行的频率范围来确定死区控制器的阈值 $\Delta\omega_{l(max)}$, 以华东电网为例, 允许的频率波动范围为 0.1 Hz^[21], 因此设置 $\Delta\omega_{l(max)} = 0.63$ rad/s。

4 仿真验证

当本地负载发生扰动时, 电网频率相应发生变化, LVSM 的虚拟惯量和阻尼承担起阻碍电网频率变化率 (Rate of Change of Frequency, RoCoF) 的作用, 而 DC-DC 变流器的频率-电流/电压调节系数能够减小电网频率的变化量, 二者共同对电网频率起到一定的支撑作用。直流母线电容作为能量的缓冲单元, 其电压会因为本地负载的变化而波动。此外, CC 模式的充放电电流和 CV 模式的充电电压也与电网频率息息相关。同时, 本节还将讨论 LVSM 虚拟频率的变化过程及其与电网频率的关系。

4.1 CC 充放电模式

首先验证所提出的控制策略在 CC 充电模式下对电网频率的影响。选择参数 1, 研究引入 $I_{bat}-\omega_l$ 控制对系统动态过程和稳态工作点的影响; 为了对比不同 J 的影响, 对参数 2 的情形也进行了仿真。在 $t=0$ s 时, 本地负载增加 24%; 在 $t=2$ s 时, 感知到本地负载的增加后, 电网有功功率指令相应地增加, 使输入功率和输出功率相匹配, 以模拟电网频率的恢复过程; 在 $t=4$ s 时, 本地负载减少 24%; 在 $t=6$ s 时, 电网有功功率指令相应减少, 使输入功率和

输出功率相匹配, 电网频率、LVSM 频率、LVSM 母线电压和充电电流的响应过程分别如图 9(a)、图 9(b)、图 9(c) 和图 9(d) 所示。

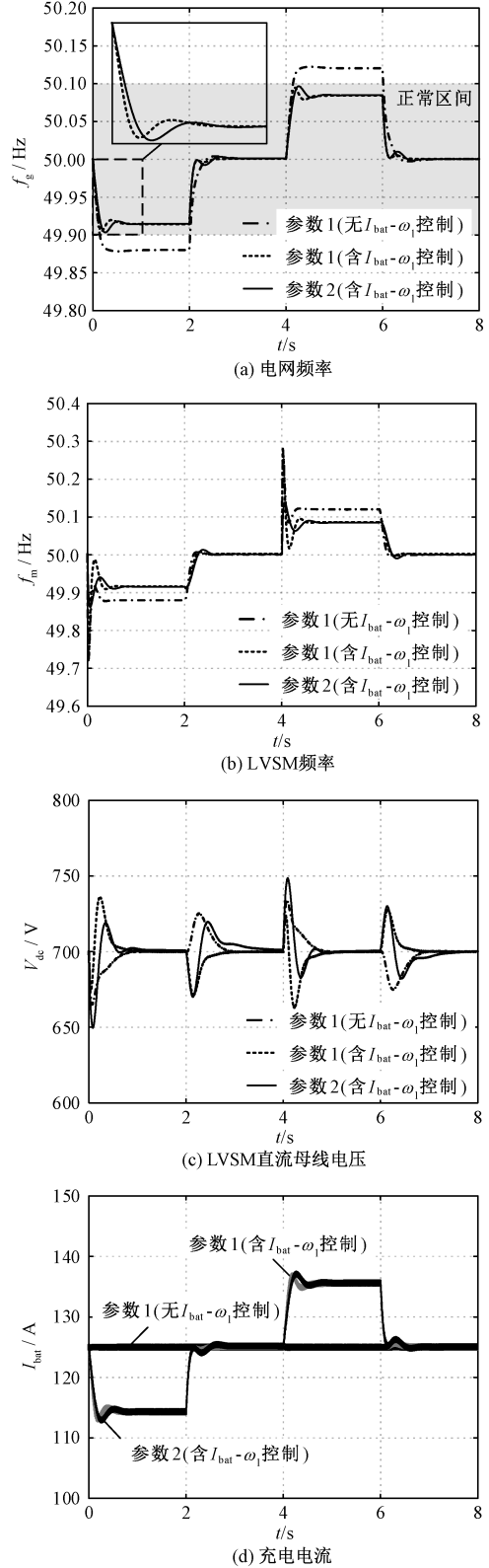


图9 CC 充电模式下系统各变量的响应过程
Fig.9 Response process of system variables in CC charging mode

对比图 9(a)中是否含 $I_{\text{bat}}-\omega_l$ 控制的曲线可知,引入 $I_{\text{bat}}-\omega_l$ 控制后,电网频率的变化量减少。当发生由负载增减引起的电网频率变化,引入 $I_{\text{bat}}-\omega_l$ 控制前 $\Delta f_g = 0.12 \text{ Hz}$,引入 $I_{\text{bat}}-\omega_l$ 控制后 $\Delta f_g = 0.08 \text{ Hz}$,所提出的控制策略使电网维持在正常工作区域内,保障了电网频率的稳定性。

同时,如图 9(b)中相应的两条曲线所示,在 0.5 s 前,电网频率和 LVSM 频率的动态变化过程存在较大差异。由于 LVSM 的转动惯量显著小于电网的转动惯量,在本地负载变化时刻附近 LVSM 频率的变化主要由于其自身的小惯量特性决定。在 0.5 s 后,电网频率和 LVSM 频率完成同步。图 9(c)中相应的两条曲线表明:引入 $I_{\text{bat}}-\omega_l$ 控制前,本地负载的突增和突减引起了大约 30 V 的母线电压幅值跌落;引入 $I_{\text{bat}}-\omega_l$ 控制后,本地负载的突增使直流母线电压幅值的跌落量减小,因为 $I_{\text{bat}}-\omega_l$ 控制使 LVSM 动态减载,减弱了本地负载对直流母线电压的影响,但同时这种动态减载也造成了一定的反向升压;在大约 1 s 后,母线电压恢复到额定值。图 9(d)中相应的两条曲线表明,电网频率变化使充电电流变化了约 9%,没有出现电流的过冲。

对比图 9(a)中两组不同参数下的曲线可知,选择较小的 LVSM 惯量(参数 1)时,电网 RoCoF=0.74 Hz/s;选择较大的 LVSM 惯量(参数 2)时,电网 RoCoF=0.53 Hz/s。LVSM 更大的转动惯量使电网 RoCoF 更低,提升了电网频率的暂态稳定性。当 RoCoF 值超过上限(例如 1 Hz/s)时,可能会导致保护继电器跳闸,对系统造成干扰^[22]。

同时,如图 9(b)中不同参数下的两条曲线所示,更大的转动惯量使 LVSM 的 RoCoF 更低,且降低了其最大的频率变化量(从 0.28 Hz 到 0.14 Hz)。图 9(c)中不同参数下的两条曲线表明,更大的转动惯量引发了更大的直流母线电压变化量(从 35 V 到 50 V),因此在获得较低的电网 RoCoF 与较低的直流母线电压变化量之间需要折中。图 9(d)中不同参数下的两条曲线表明,采用大惯量时充电电流变化更平缓。

电网有功功率指令相应变化后,如图 9(a)所示,电网频率均在 1 s 内就恢复到 50 Hz,引入 $I_{\text{bat}}-\omega_l$ 控制后,表现出轻微的振荡。由图 9(b)可知,1 s 后 LVSM 的频率也稳定在 50 Hz,但更大的转动惯量使调节过程中的超调更大。由图 9(c)可知,电网频率恢复过程中直流母线电压存在暂升或暂降现象,但

波动在可接受的范围内,且在 1 s 后恢复至额定值。图 9(d)表明,充电电流随着电网频率的恢复而恢复到额定值。

本地负载功率和电网有功功率指令变化后,CC 放电模式的电网频率、LVSM 频率、LVSM 直流母线电压波形与 CC 充电模式类似,仅充电电流波形沿纵轴平移至小于 0 处,能量由 EV 向电网流动,实现了 V2G 功能。

4.2 CV 充电模式

当 SOC 在 CC 模式下充电至 80%时,切换为 CV 充电。在 CC 充电模式下,电池主要工作在如图 6 所示的额定区域,电池电压基本保持不变,充电装置可近似看作恒功率负载;而在 CV 充电模式下,充电电流不断降低,充电装置吸收的功率不断减小。由于 CV 充电模式下充电功率不断降低,需要不断调整电网的有功功率给定才能维持电网频率的稳定,为了体现所提控制策略稳定电网频率的效果,将电网的初始有功功率给定设为与引入 $V_{\text{bat}}-\omega_l$ 控制前一致。为了使所提控制策略对电网频率影响的效果更明显,将表 2 中与电池容量有关的参数(Q_{full} 、 Q_{exp} 和 Q_{nom})成比例地减小,使 CV 充电在 5 min 内完成。本地负载在 $t=0 \text{ s}$ 增加 24%,电网有功功率指令在 $t=2 \text{ s}$ 相应地增加,本地负载在 $t=4 \text{ s}$ 减少 24%,电网有功功率指令在 $t=6 \text{ s}$ 相应地减少。电网频率、LVSM 频率、LVSM 直流母线电压、充电电流和电池电压的响应过程分别如图 10(a)~图 10(e)所示。

由图 10(a)~图 10(c)可知,CV 充电与 CC 充电模式下电网频率、LVSM 频率和 LVSM 直流母线电压响应波形类似。由图 10(d)和图 10(e)可知,电池电压升高或降低后,充电电流也相应地增加或减小,电池整体的充电功率也随之增加或减小。

4.3 关键参数灵敏度分析

两级式 EV 充电桩的关键参数主要有前级 LVSM 的转动惯量 J 和阻尼系数 D ,以及后级 DC-DC 变流器的网荷互动系数 K_{ibat} 和 K_{vbat} ,主要关注的输出变量为电网频率 f_g 和直流母线电压 V_{dc} 。考虑到 CC 充电和 CV 充电模式下变功率对 f_g 和 V_{dc} 影响的相似性,以 CC 模式为例,分析本地负载突增时, f_g 和 V_{dc} 对 J 、 D 和 K_{ibat} 变化的敏感度。

保持其他参数不变,选取不同的 K_{ibat} 、 f_g 和 V_{dc} 在本地负载突增 24%后变化的情况分别如图 11(a)和图 11(b)所示。由图 11(a)可知,随着 K_{ibat} 的增加, f_g 变化 EV 充电功率的影响增加,稳态时电网频

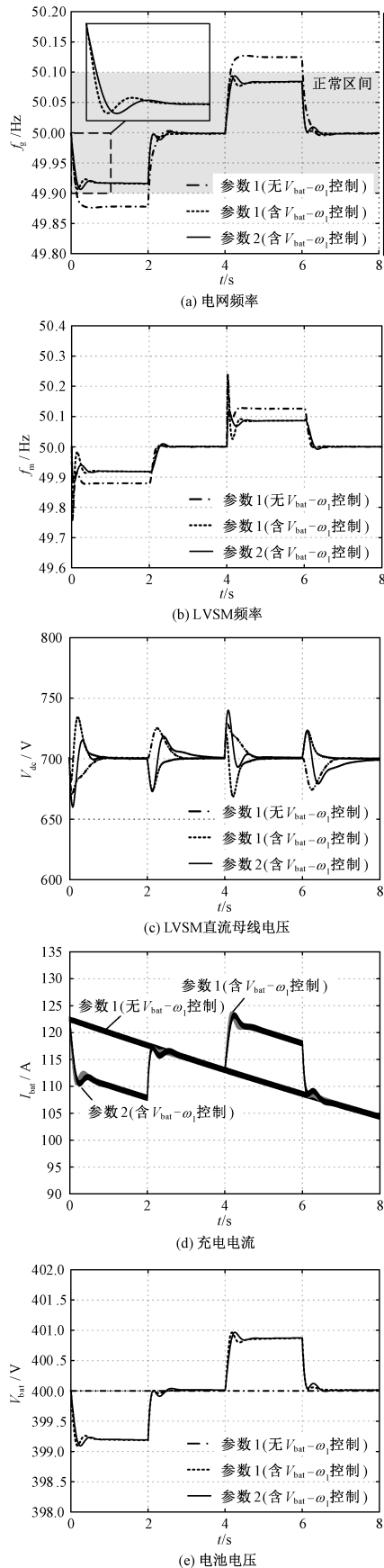
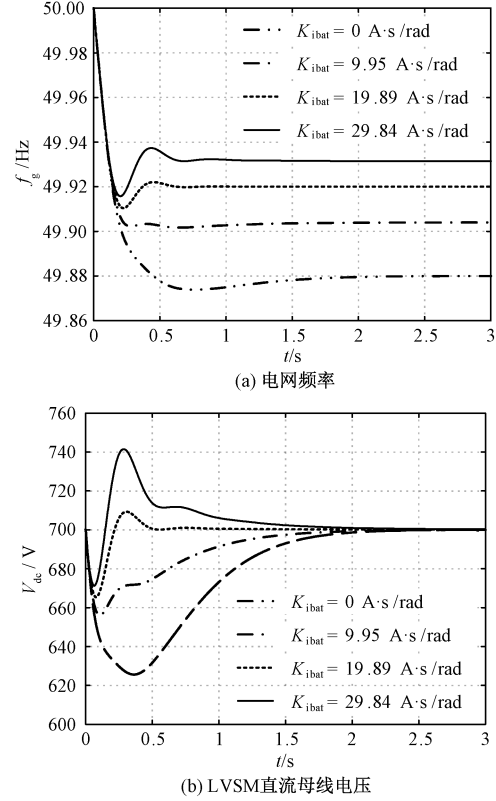


图10 CV充电模式下系统各变量的响应过程

Fig.10 Response process of system variables in CV charging mode

率与额定值的偏差减小;同时,由于动态减载程度的加剧,从图 11(b)中可以观察到直流母线电压的跌落量减小,甚至出现了短暂的反向上升。

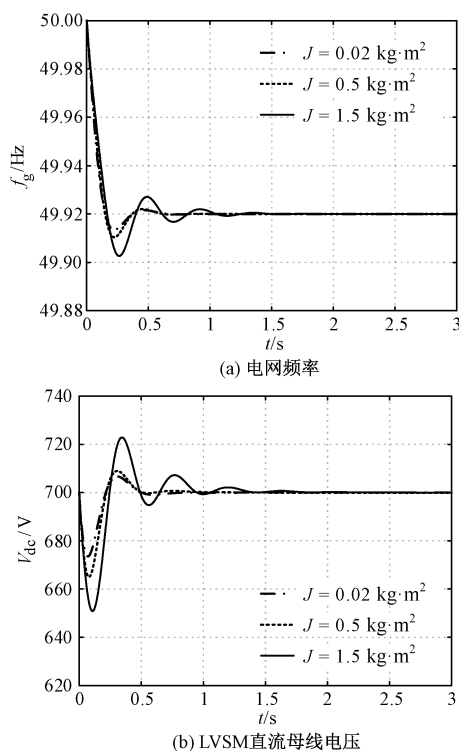
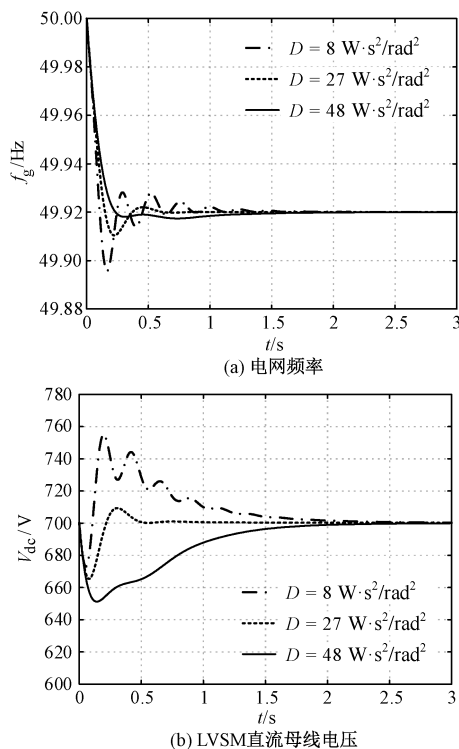
图11 系统变量对 K_{ibat} 变化的敏感度Fig.11 Sensitivity of system variables to K_{ibat} changes

保持其他参数不变,选取不同的 Jf_g 和 V_{dc} 在本地负载突增24%后变化的情况分别如图12(a)和图12(b)所示。由图12(a)和图12(b)可知,随着 J 的增加, f_g 和 V_{dc} 的振荡现象均更加明显;由图12(a)可知,由于缺少直流母线电压PI调节器参数的匹配,更大的 J 并没有显著降低 f_g 的RoCoF。

保持其他参数不变,选取不同的 Df_g 和 V_{dc} 在本地负载突增24%后变化的情况分别如图13(a)和图13(b)所示。由图13(a)和图13(b)可知,随着 D 的增加, f_g 和 V_{dc} 的振荡程度逐渐减弱;图13(a)表明由于直流母线电压控制回路的存在, D 不会影响 f_g 的稳态值,这是LVSM控制与VSG控制的不同点之一。

5 结论

基于负荷虚拟同步机(LVSM)控制技术,本文提出了一种适应电网频率变化的电动汽车充放电控制策略,通过网-荷互动提高了电网频率的稳定性。

图 12 系统变量对 J 变化的敏感度Fig.12 Sensitivity of system variables to J changes图 13 系统变量对 D 变化的敏感度Fig.13 Sensitivity of system variables to D changes

仿真结果表明,引入本文所提的控制策略后,在电动汽车 CC 充-放电和 CV 充电的情况下,通过适当调

整充/放电的电流或电压值均能降低本地负载突变引起的电网频率变化量,使电网频率保持在正常工作区域内。此外,LVSM 转动惯量更大时,电网频率的变化率更低,但由于大转动惯量更易诱发振荡特性,需要其他控制参数的匹配。分析直流母线电压波形可知,在获得较低的电网频率变化率与较低的直流母线电压变化量之间存在折中,需要进一步优化。本文的研究对提高电网对大规模电动汽车接入的适应性,使电动汽车负荷具有一定的需求侧响应调节能力,减轻大功率电动汽车负荷对电网的影响具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] SAE J1772. SAE Electric Vehicle and Plug-in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler [S]. 2011.
- [2] Dharmakeerthi C H, Mithulananthan N, Saha T K. Modeling and planning of EV fast charging station in power grid [A]. 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting [C]. San Diego, USA, 2012. 1-8.
- [3] 刘明志, 张军, 于建成, 等 (Liu Mingzhi, Zhang Jun, Yu Jiancheng, et al.). 电动汽车充电设施的接入对电网稳态运行影响分析 (Impact of electric vehicle charging facilities on power grid steady state) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2013, 32 (1): 71-75.
- [4] 杜燕, 赵韩广, 张显创, 等 (Du Yan, Zhao Hanguang, Zhang Xianchuang, et al.). 一种无锁相环动态阻尼的虚拟同步发电机 (Virtual synchronous generator adopting dynamic damping without frequency detection) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (7): 10-19.
- [5] 周宁博, 叶佳卓, 邓双喜, 等 (Zhou Ningbo, Ye Jiazhuo, Deng Shuangxi, et al.). 孤岛微网中 VSG 并联运行功率精确分配控制策略 (Accurate power distribution control strategy for VSG parallel operation in island microgrid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (8): 47-55.
- [6] 吕志鹏, 盛万兴, 刘海涛, 等 (Lü Zhipeng, Sheng Wanxing, Liu Haitao, et al.). 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战 (Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2017, 37 (2): 349-359.
- [7] 吕志鹏, 梁英, 曾正, 等 (Lü Zhipeng, Liang Ying, Zeng Zheng, et al.). 应用虚拟同步电机技术的电动汽

- 车快充控制方法 (Virtual synchronous motor based control scheme of fast charger for electric vehicle application) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (25): 4287-4294.
- [8] 刘其辉, 逯胜建 (Liu Qihui, Lu Shengjian). 参与微电网调频的电动汽车虚拟同步机充放电控制策略 (Charging and discharging control strategy based on virtual synchronous machine for electrical vehicles participating in frequency regulation of microgrid) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2018, 42 (9): 171-179.
- [9] 刘海涛, 吕志鹏, 吴争, 等 (Liu Haitao, Lü Zhipeng, Wu Zheng, et al.). 一种自主降额运行的负荷虚拟同步机控制方法 (A load virtual synchronous machine control method for autonomous derating operation) [J]. 可再生能源 (Renewable Energy Resources), 2019, 37 (8): 1179-1184.
- [10] 郝振洋, 徐健, 王雪瑞, 等 (Hao Zhenyang, Xu Jian, Wang Xuerui, et al.). 一种具备友好网荷交互功能的三相 PWM 整流器控制方法 (A control method for three-phase PWM rectifier with function of friendly interaction between grid and load) [J]. 南京航空航天大学学报 (Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics), 2020, 52 (2): 199-206.
- [11] Tan Kangmiao, Ramachandaramurthy V K, Yong Jiaying. Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 720-732.
- [12] Kesler M, Kisacikoglu M C, Tolbert L M. Vehicle-to-grid reactive power operation using plug-in electric vehicle bi-directional offboard charger [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61 (12): 6778-6784.
- [13] Suul J A, D'Arco S, Guidi G. Virtual synchronous machine-based control of a single-phase bi-directional battery charger for providing vehicle-to-grid services [J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2016, 52 (4): 3234-3244.
- [14] Delille G, Francois B, Malarange G. Dynamic frequency control support by energy storage to reduce the impact of wind and solar generation on isolated power system's inertia [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3 (4): 931-939.
- [15] Bao Ke, Li Shuhui, Zheng Huiying. Battery charge and discharge control for energy management in EV and utility integration [A]. 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting [C]. San Diego, USA, 2012. 1-8.
- [16] Alipoor J, Miura Y, Ise T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 3 (2): 451-458.
- [17] EN 50438. Requirements for the Connection of Micro Generators in Parallel with Public Low-voltage Distribution Networks [S]. 2008.
- [18] Tremblay O, Dessaint L A. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications [J]. World Electric Vehicle Journal, 2009, 3 (1): 289-298.
- [19] Yong Jiaying, Ramachandaramurthy V K, Tan Kangmiao, et al. Bi-directional electric vehicle fast charging station with novel reactive power compensation for voltage regulation [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2015, 64: 300-310.
- [20] 吴恒, 阮新波, 杨东升, 等 (Wu Heng, Ruan Xinbo, Yang Dongsheng, et al.). 虚拟同步发电机功率环的建模与参数设计 (Modeling of the power loop and parameter design of virtual synchronous generators) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (24): 6508-6518.
- [21] Li Dongdong, Zhu Qianwei, Lin Shunfu, et al. A self-adaptive inertia and damping combination control of VSG to support frequency stability [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32 (1): 397-398.
- [22] Fang Jingyang, Li Hongchang, Tang Yi, et al. Distributed power system virtual inertia implemented by grid-connected power converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33 (10): 8488-8499.

Charge and discharge strategy based on load-side virtual synchronous machine for electric vehicles participating in grid frequency regulation and its realization

LI Bing-yu¹, DU Xu-hao¹, ZENG Si-ming¹, YIN Li-ke², RUI Yue-chen³, XIAO Guo-chun³

(1.State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;2.Hebei Top Architectural Design Co., Ltd, Shijiazhuang 050000, China;3.School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710048, China)

Abstract: With a large number of electric vehicle (EV) charging interfaces connected to the grid, the stable operation of the power system is challenged. Load-side virtual synchronous machine (LVSM) technology emerged at the historic moment, which can provide inertia and damping support for the power system and help to improve the stability of the power grid. In the interconnection system of the power grid simulated by the virtual synchronous generator (VSG), the front-stage LVSM and the rear-stage EV battery charging converter, a charging and discharging strategy and implementation method for EV batteries that adapts to changes in grid frequency under three modes of constant current charging, constant voltage charging and constant current discharge are proposed in this paper. The grid frequency stability is improved through grid-load interaction. The effectiveness and correctness of the proposed control strategy and implementation method are verified by the simulation results.

Key words: electric vehicle charging; load-side virtual synchronous machine; grid-load interaction; grid frequency stability