

电动汽车直流充电站的低阶 RLC 阻抗电路模型

林刚¹, 戴宁怡^{2,✉}

(1. 珠海澳门大学 科技研究院智慧城市研发中心, 广东 珠海 519031;

2. 澳门大学 智慧城市物联网国家重点实验室, 澳门特别行政区 999000)

摘要: [目的] 虚拟惯性阻尼控制 (Virtual Inertia and Damping Control, VIDC) 潜在的正反馈可能加剧控制环路内部的相互作用进而引起母线电压低频振荡, 破坏电动汽车直流充电站 (Electric Vehicle DC Charging Station, EVCS) 的稳定性。虽然已有多时间尺度阻抗模型解释 VIDC 的稳定机制和 VIDC 控制下 EVCS 的低频振荡机理, 但其本质上是一个高阶传递函数, 获取阻尼控制策略的解析表达式。[方法] 针对这一问题, 文章对环路虚拟阻抗进行了详细的阻抗分析, 直观地揭示了每个控制环路阻抗高阶属性的根本原因。[结果] 通过伯德图近似提出了控制环路闭环增益的降阶拟合方法, 建立了低阶阻抗电路模型。[结论] 通过 Matlab/Simulation 仿真结果验证了所提出的多时间尺度低阶阻抗电路模型的有效性。

关键词: 电动汽车; 直流充电站; 多时间尺度交互; 低阶阻抗电路模型; 低频振荡机理分析

中图分类号: TM7; TM910.6

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)05-0080-07

开放科学 (资源服务) 二维码:



Reduced RLC Impedance Circuit Model of Electric Vehicle DC Charging Station

LIN Gang¹, DAI Ningyi^{2,✉}

(1. Zhuhai UM Science & Technology Research Institute (University of Macau), Zhuhai 519031, Guangdong, China;

2. State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City, University of Macau, Macao 999000, China)

Abstract: [Introduction] The potential positive feedback of virtual inertia and damping control (VIDC) may exacerbate the interaction within the control loop, causing low-frequency oscillation of bus voltage and disrupting the stability of electric vehicle DC charging station (EVCS). Although the existing multi-timescale impedance model explains the stability mechanism of VIDC and the low-frequency oscillation mechanism of VIDC-controlled-EVCS, it is essentially a high-order transfer function, making it difficult to obtain analytical expressions for damping control strategies. [Method] Therefore, a detailed impedance analysis of the virtual impedance of the loop was conducted to intuitively reveal the fundamental reasons for the higher-order properties of each loop impedance. [Result] A closed-loop gain fitting method for the control loop was proposed through Bode diagram approximation, and a low-order impedance circuit model was established. [Conclusion] The effectiveness of the proposed multi-timescale impedance model is verified through Matlab/Simulation.

Key words: electric vehicle; DC charging station; multi-timescale interaction; reduced-order impedance circuit model; low-frequency oscillation mechanism analysis

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

近年来, 为应对能源危机和气候变化等问题电动汽车 (Electric Vehicle, EV) 行业发展迅速^[1]。由直

流变换器组成的电动汽车直流充电站 (EV DC Charging Station, EVCS) 将成为智能电网的必要要素^[2-3]。EVCS 的不稳定风险将成为制约 EV 部署的主要因

收稿日期: 2023-06-20 修回日期: 2023-08-14

基金项目: 国家重点研发计划“战略性科技创新合作”重点专项“面向智慧城市的紧凑高效环保型配网柔性化关键技术研究及装备研发”(2022YFE0205100)

素,从学术和工程应用的角度都值得进一步研究^[4]。

在电压环带宽内表现为负阻抗的恒定功率负载 (Constant Power Load, CPL) 具有不稳定效应,是降低交互稳定性的一个主要因素^[5-6]。此外,电力电子变换器的低惯量特性和控制回路之间的交互作用也可能导致直流母线电压的剧烈波动^[7],降低 EVCS 的效率并对 EV 电池造成危害^[8-9]。尽管已提出虚拟惯性和阻尼控制 (Virtual Inertia and Damping Control, VIDC) 以抑制电压变化率 (Rate of Change of Voltage, RoCoV)^[7,10],但 VIDC 内部的环路交互仍然会引发低频振荡,在 VIDC 和 CPL 之间的动态相互作用以及 CPL 的负阻尼特性的影响,会加剧 EVCS 内部的低频振荡 (Low-Frequency Oscillation, LFO)^[11-12]。为了确保更好地动态响应,需要借助不同的分析工具对系统的动态性能进行分析以指导参数设计,如阶跃响应和阻抗模型^[10,13]。

基于阻抗的方法被广泛用于研究振荡机制,因为阻抗模型具有明确的物理意义、可直接测量等优势^[14-15]。在文献 [14] 中,阻抗模型揭示了负载侧虚拟同步机的低频负电阻会引起不稳定,并提出一个五维阻抗稳定性准则来研究虚拟同步机之间的相互作用并评估系统稳定性^[15]。然而,现有的阻抗模型缺乏对欠阻尼或失稳因素的内部根源进行系统和直观的辨识,本质仍是一个黑箱模型^[10]。难以直观地理解每个控制回路(特别是虚拟惯性回路)的阻抗特性以阐明低频振荡机理,无法确定潜在的不稳定因素^[16]。

针对上述 EVCS 低频振荡分析缺乏合适建模工具的问题,结合阻抗模型和状态空间模型的优点,提出了一种多时间尺度低阶阻抗电路模型,作为白箱模型和黑箱模型之间的桥梁。首先,文章对环路虚拟阻抗进行了详细分析,直观揭示了各个控制环路阻抗高阶属性的根本原因。随后,通过伯德图近似提出控制环路闭环增益的降阶拟合方法,建立多时间尺度低阶阻抗电路模型。最后,通过 Matlab/Simulation 仿真结果验证了所提出的多时间尺度低阶阻抗模型的正确性。

1 直流充电站及其多时间尺度阻抗模型

1.1 系统结构介绍

孤岛电动汽车直流充电站 (Electric Vehicle DC Charging Station, EVCS) 的典型结构如图 1^[17-18] 所示。主要包括 3 种不同类型的组件,即光伏 (Photovoltaic,

PV) 单元、储能系统 (Energy Storage System, ESS) 和恒功率负载 CPL。PV 通过 boost 变换器连接到 EVCS, P_{pv} 是其发电功率。CPL 通过 buck 变换器连接到 EVCS, P_{cpl} 是指其消耗的功率。ESS 由电池组成^[19-20], 采用双向直流变换器 (Bidirectional DC Converter, Bi-C) 进行充电和放电^[5]。 P_{out} 是 ESS 的输出功率,其正值分别代表放电/充电模式。buck 和 boost 变换器的电路结构和参数可从文献 [5] 中获得。

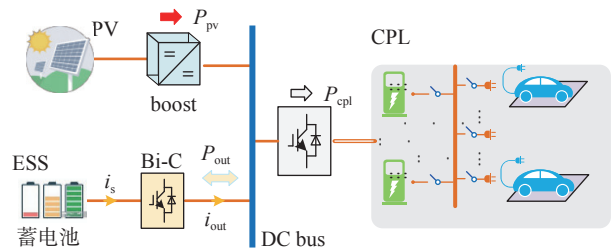


图 1 电动汽车直流充电站拓扑

Fig. 1 Topology of the studied EVCS

各个子系统通过电力电子变换器连接到直流母线,系统表现出低惯量和弱阻尼特征^[21-22]。当 EVCS 受到 PV 或 CPL 的功率波动时,直流电压会振荡甚至失稳^[23]。因此,提出了虚拟惯量和阻尼控制 VIDC 以充分利用 ESS 的惯量支持能力提高系统动态稳定性,降低 RoCoV^[21-22]。

1.2 虚拟惯量和阻尼控制

已提出的 VIDC 包括下垂控制、虚拟惯量环路和双环控制。图 2 描述了 Bi-C 的电路和 VIDC 的结构。 v_{in} 和 i_s 是输入电压和电流, v_{out} 和 i_{out} 是输出电压和电流。 L_s 和 R_s 是滤波电感器及其寄生电阻, C_{out} 是输出滤波电容。 $v_{dcn}=300$ V, 是直流母线电压额定值。 $G_v(s)=k_{vp}+k_{vi}/s$ 和 $G_i(s)=k_{ip}+k_{ii}/s$ 是电压和电流环路控制器,其中 k_{vp} 是电压环比例参数, k_{vi} 是电压环积分参数, k_{ip} 是电流环比例参数, k_{ii} 是电流环积分参数。惯性控制方程如式(1)~式(5)所示。 R_d 是下垂系数。 $G_{pwm}=1/300$, 是调制增益。 d 是占空比, v_{ref} 是电压环路参考。 J_{vir} 和 k_{vd} 是惯性系数和阻尼系数,以增大等效直流电容并改善耗散特性。此外,提出了二次电压恢复回路,如式(4)所示, k_{svr} 是刚度系数,以提高系统刚度并消除由 R_d 引起的稳态电压误差。Bi-C 的小信号模型如式(5)所示。 D 为占空比 d 的稳态值。电流环、电压环和惯量环的带宽分别为 $\omega_c=1160$ rad/s, $\omega_v=167$ rad/s, $\omega_{iner}\approx 10$ rad/s。控制和电路参数见参考文献 [5]。

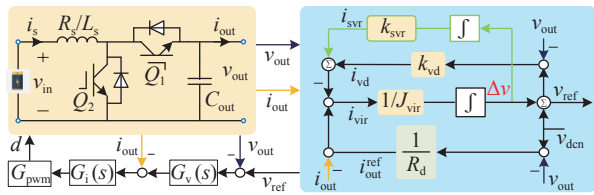


图 2 双向直流变换器电路及虚拟惯量和阻尼控制策略

Fig. 2 The circuit of Bi-C and its VIDC strategy

$$\frac{(v_{dcn} - v_{out})}{R_d} - i_{out} - i_{vd} - i_{svr} = J_{vir} \frac{d(v_{ref} - v_{dcn})}{dt} \quad (1)$$

$$\text{阻尼分量: } i_{vd} = k_{vd}(v_{ref} - v_{dcn}) \quad (2)$$

$$\text{惯性分量: } i_{iner} = J_{vir} \frac{d(v_{ref} - v_{dcn})}{dt} \quad (3)$$

$$\text{刚度分量: } i_{svr} = k_{svr} \int (v_{ref} - v_{dcn}) dt \quad (4)$$

$$G_{id}(s) = \frac{C_{out} v_{dcn} s + (1-D)I_s}{L_s C_{out} s^2 + R_s C_{out} s + (1-D)^2} \quad (5)$$

1.3 直流充电站多时间尺度阻抗电路模型

如图 3 所示,由多个环路虚拟阻抗(Loop Virtual Impedance, LVI)组成的多时间尺度阻抗模型可用于 LFO 和稳定性分析。PV 的数学模型是电流源 i_{pv} , CPL 由与负增量阻抗 $R_{cpl} = -V_{out}^2/P_{cpl}$ 并联的电流源 $I_{cpl} = P_{cpl}/V_{out}$ 表示, I_{cpl} 和 V_{out} 是其稳态电流和电压。 R_{cpl} 支路被调整到“源”端。“源”端的输出电流被重新定义为: $i_{out} = i_{load} = I_{cpl} - i_{pv}$ 。 $Z_{vcl}(s)$ 是电压环虚拟阻抗,而 $Z_{vir}(s)$ 则是惯量环虚拟阻抗。在下垂控制时间尺度内, Y_{vd} 是惯量环产生的导纳, Y_{cpl} 表示下垂控制和 CPL 之间的相互作用, Y_{droop} 是下垂控制虚拟导纳。详细表达式可以推导为式(6)~式(8)。

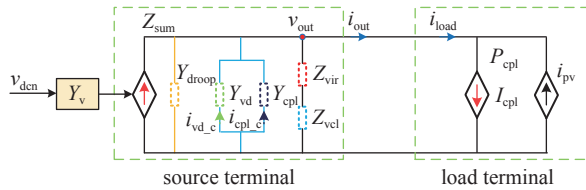


图 3 直流充电站的多时间尺度阻抗电路模型

Fig. 3 The multi-timescale impedance circuit model of EVCS.

$$Z_{vcl}(s) = \frac{1}{\mu k_{vp} G_{icl}(s) + \frac{\mu k_{vi} G_{icl}(s)}{s} + C_{out} s} \parallel R_{cpl} \quad (6)$$

$$Z_{vir}(s) = \frac{1}{\frac{s J_{vir}}{G_{vcl}(s)} + \frac{k_{vd}}{G_{vcl}(s)} + \frac{k_{svr}}{s G_{vcl}(s)}} = H_{vir}(s) G_{vcl}(s) \quad (7)$$

$$Y_{vd}(s) = -k_{vd} G_{vir}(s), Y_{cpl}(s) = G_{vir}(s)/R_{cpl}, \\ Y_{droop}(s) = G_{vir}(s)/R_d \quad (8)$$

式中:

$G_{icl}(s)$ —— 电流环闭环增益;

$G_{vcl}(s)$ —— 电压环闭环增益;

$G_{vir}(s)$ —— 惯量环闭环增益。

其详细表达式可见文献 [10]。从图 3 中可以看出,总系统阻抗 $Z_{sum}(s)$ 可以用式(9)表示, $Y_v(s)$ 是电压正向通道的传递函数,具有导纳的性质,如式(10)所示。

$$Z_{sum}(s) = 1/(Y_{cpl} + Y_{vd} + Y_{droop}) \parallel (Z_{vir}(s) + Z_{vcl}(s)) \quad (9)$$

$$Y_v = (1 + H_1) \left(\frac{1}{R_d} - k_{vd} + R_{cpl} \right) G_{vir} \quad (10)$$

$$H_1 = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_d} - k_{vd} + R_{cpl} \right) H_{vir}} + \frac{1}{\mu R_{cpl} \left(\frac{1}{R_d} - k_{vd} + R_{cpl} \right) H_{vir} G_v G_{icl}} \quad (11)$$

多时间尺度阻抗模型反映了控制环路的阻抗重塑效应。LFO 机理可通过不同时间尺度的 LC 交互作用和不同时间尺度之间的动态耦合阐明。电压环时间尺度内,积分环节与输出电容之间的交互会产生电压环时间尺度内的低频振荡,而惯量参数和刚性参数之间的交互作用会引发惯量环时间尺度内的低频振荡。应该注意的是,由于受到控制环路闭环增益的约束,每个 LVI 和 Z_{sum} 都是高阶函数。LFO 现象和参数的物理意义只能借助阻抗电路图和数值结果来讨论或识别。在多时间尺度阻抗模型的基础上,文章将设计一个通用的低阶 RLC 阻抗模型来拟合高阶 LVI,利用该模型可以很容易地求解阻尼控制策略的解析表达式,更便于实际工程应用。

2 低阶 RLC 阻抗电路模型

根据式(6)~式(8)可知,电压环虚拟阻抗 $Z_{vcl}(s)$ 、惯量环虚拟阻抗 $Z_{vir}(s)$ 和下垂控制环虚拟导纳 Y_{vd} 、 Y_{cpl} 、 Y_{droop} 分别受到电流环闭环增益 $G_{icl}(s)$ 、电压环闭环增益 $G_{vcl}(s)$ 和惯量环闭环增益 $G_{vir}(s)$ 的约束。这也是环路阻尼阻抗和导纳呈现高阶属性的根本原因。注意,由于电流环控制带宽最大,所以 $G_{icl}(s)$ 可以在整个控制带宽内等效为单位环路增益,因此 $Z_{vcl}(s)$ 可在控制带宽内简化为二阶 RLC 并联电路。电压环闭环增益 $G_{vcl}(s)$ 和惯量环闭环增益 $G_{vir}(s)$ 则不能直

接简化为单位环路增益, 依然是高阶传递函数。惯量环虚拟阻抗 $Z_{vir}(s)$ 是受 $G_{vcl}(s)$ 约束的广义 RLC 并联电路, 下垂控制环虚拟导纳 Y_{vd} 、 Y_{cpl} 、 Y_{droop} 是受 $G_{vir}(s)$ 约束的虚拟导纳。这为求解阻尼控制策略的解析解带来了额外的困难。因此, 本节主要讨论 $G_{vcl}(s)$ 和 $G_{vir}(s)$ 的降阶方法。

2.1 惯量环低阶虚拟阻抗

根据式(7)可知, 惯量环虚拟阻抗是一个高阶传递函数, 其高阶属性源自电压环传递函数 $G_{vcl}(s)$, 因此只需对 $G_{vcl}(s)$ 进行降阶拟合便可以获得惯量环低阶虚拟阻抗。如图 4 所示, 可以根据 $G_{vcl}(s)$ 的伯德图对其进行降阶拟合, 求得一个详细的解析表达式, 具体流程如下:

1) 根据伯德图形状判断其本质上可以用一个二阶环节近似, 如式(12)所示。在相位响应穿越 -90° 处确定 $\omega_v=26.4$ rad/s。

2) 带宽 I 内, 幅值响应斜率为 -20 dB/dec 且相位响应趋向 -90° , 说明存在一个超前环节, 如式(13)所示。在相位曲线第二次穿越 -135° 时确定超前环节转折频率 $\omega_{v1}=252$ rad/s。

3) 带宽 II 内, 幅值响应斜率为 -40 dB/dec 且相位曲线逐渐向 -180° 靠近, 说明存在一个滞后环节, 如式(14)所示。在相位曲线第三次穿越 -135° 时确定滞后环节转折频率 $\omega_{v2}=3e5$ rad/s。

4) 最后通过谐振峰值确定阻尼参数 $\zeta_v=0.011$ 。最终得到 $G_{vcl}(s)$ 的近似解析式 $G_{vcl_app}(s)$, 如式(15)所示。其 bode 图如图 4 所示, 基本与 $G_{vcl}(s)$ 重合。

$$G_1(s) = \frac{\omega_v^2}{s^2 + \xi_v \omega_v s + \omega_v^2} \quad (12)$$

$$G_{1_lead}(s) = \frac{s + \omega_{v1}}{\omega_{v1}} \quad (13)$$

$$G_{1_lag}(s) = \frac{\omega_{v2}}{s + \omega_{v2}} \quad (14)$$

$$G_{vcl_app}(s) = \frac{3e5}{252} \times \frac{26.4^2}{s^2 + 0.011 \times 26.4s + 26.4^2} \times \frac{s + 252}{s + 3e5} \quad (15)$$

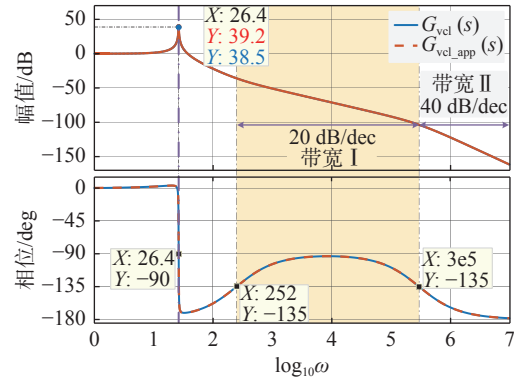


图 4 电压闭环增益 bode 图近似曲线求解

Fig. 4 Approximate curve of closed voltage-loop gain bode diagram

2.2 下垂控制环低阶虚拟阻抗

根据式(7)可知, 下垂控制环虚拟导纳 Y_{vd} 、 Y_{cpl} 、 Y_{droop} 是 高阶传递函数, 其高阶属性源自惯量环传递函数 $G_{vir}(s)$, 因此只需对 $G_{vir}(s)$ 进行降阶等效便可得到下垂控制环低阶虚拟导纳。通过图 5 对 $G_{vir}(s)$ 伯德图降阶拟合得到详细的解析表达式, 流程如下:

1) 根据伯德图形状判断其本质上可以用一个无谐振峰的二阶环节近似, 如式(16)所示。因此在 -3 dB处确定 $\omega_{vir}=1.1$ rad/s。

2) 带宽 I 内, 幅值响应斜率为 -20 dB/dec 说明存在一个超前环节且其转折频率在 ω_{vir} 之前, 如式(17)所示。在相位曲线穿越 30° 时确定 $\omega_{vir1}=0.64$ rad/s。

3) 带宽 II 内, 幅值响应斜率为 -40 dB/dec 且相位曲线逐渐向 -180° 靠近, 说明存在一个滞后环节, 如式(18)所示。在相位曲线穿越 -135° 时确定滞后环节转折频率 $\omega_{vir2}=3e5$ rad/s。

4) 如图 5 所示, k_{svr} 导致稳态幅值响应偏差, 因此引入偏差系数 $G_{vir0}=0.527$ 进行幅值响应校正。最后通过谐振峰值确定阻尼参数 $\zeta_{vir}=2.5$ 。得到 $G_{vir}(s)$ 的近似解析式 $G_{vir_app}(s)$, 如式(19)所示。其 bode 图如图 5 所示, 基本与 $G_{vir}(s)$ 重合。

$$G_2(s) = \frac{\omega_{vir}^2}{s^2 + \xi_{vir} \omega_{vir} s + \omega_{vir}^2} \quad (16)$$

$$G_{2_lead}(s) = \frac{s + \omega_{vir1}}{\omega_{vir1}} \quad (17)$$

$$G_{2_lag}(s) = \frac{\omega_{vir2}}{s + \omega_{vir2}} \quad (18)$$

$$G_{vir_app}(s) = 0.527 \times \frac{3e5}{0.64} \times \frac{1.1^2}{s^2 + 2.5 \times 1.1s + 1.1^2} \times \frac{s + 0.64}{s + 3e5} \quad (19)$$

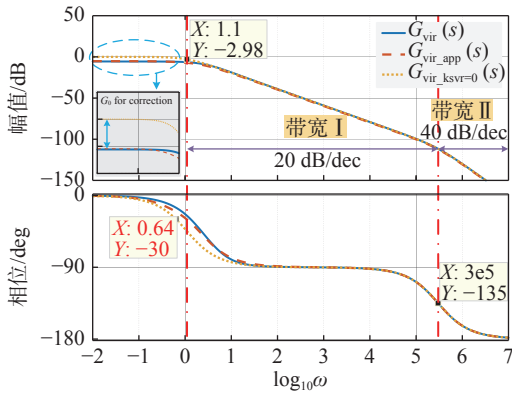


图 5 惯量环闭环增益 bode 图近似曲线求解
Fig. 5 Approximate curve of closed inertia-loop gain bode diagram

通过 bode 图设计的低阶阻抗解析式可以为求解阻尼控制策略的解析表达式提供便利。

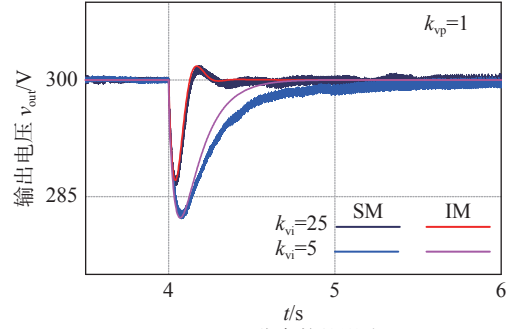
3 验证与分析

基于图 1 和图 2 中系统拓扑和控制结构,在 MATLAB 中建立电动汽车直流充电站的开关模型 (Switching Model, SM) 仿真,并在以下工况运行:恒功率负载增加 1 kW。同时获得同等条件下相应阻抗模型 (Impedance Model, IM) 的阶跃响应。在双环控制下验证了电压环阻抗模型,在虚拟惯量和阻尼控制下验证了惯量环阻抗模型。系统参数与控制参数见文献 [10]。开关模型和阻抗模型的阶跃响应如图 6 和图 7 所示。SM 结果与 IM 结果基本一致。此外,各参数的控制效果也与基于多时间尺度阻抗模型的分析一致。

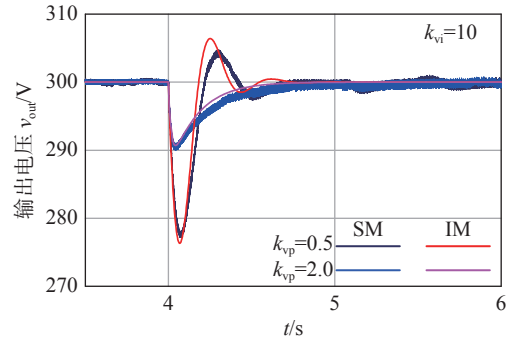
双环控制下的仿真结果如图 6 所示,在 $t=4$ s 时,负荷增加 1 kW。 k_{vp} 和 k_{vi} 在电压环时间尺度上影响电压超调和调整时间。增大 k_{vi} 可将电压恢复时间由 0.7 s 缩至 0.3 s。增大 k_{vp} 后电压波动幅值由 22 V 减小至 10 V。

虚拟惯量和阻尼控制下的仿真结果如图 7 所示,在 $t=4$ s 时,负荷增加 1 kW。 J_{vir} 、 k_{svr} 和 k_{vd} 确定了惯量环时间尺度上的振荡频率和振幅,代表了系统的惯性、刚度和耗散特性。从图 7(a)和图 7(b)中可知, k_{vp} 和 k_{vi} 在电压环时间尺度上影响电压超调和调整时间,与图 6 中的结果一致。增大 J_{vir} 主要通过降低振荡频率和幅值,减小电压变化率。由于 k_{vd} 在下垂环节的负阻尼效应,增大 k_{vd} 反而增大了波动幅值

(12 V 降低至 7.5 V)。 k_{svr} 则通过与 J_{vir} 的交互影响振荡频率和电压恢复时间。以上结果验证了多时间尺度阻抗模型及其低阶模型的正确性。



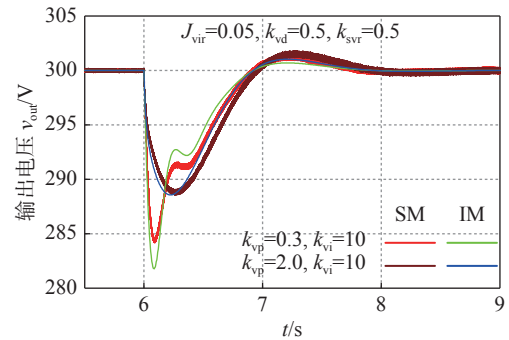
(a) 积分参数的影响



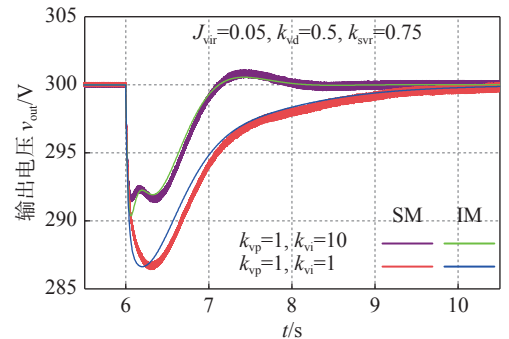
(b) 比例参数的影响

图 6 电压环阻抗模型验证

Fig. 6 Verification of voltage-loop impedance model



(a) 比例参数的影响



(b) 积分参数的影响

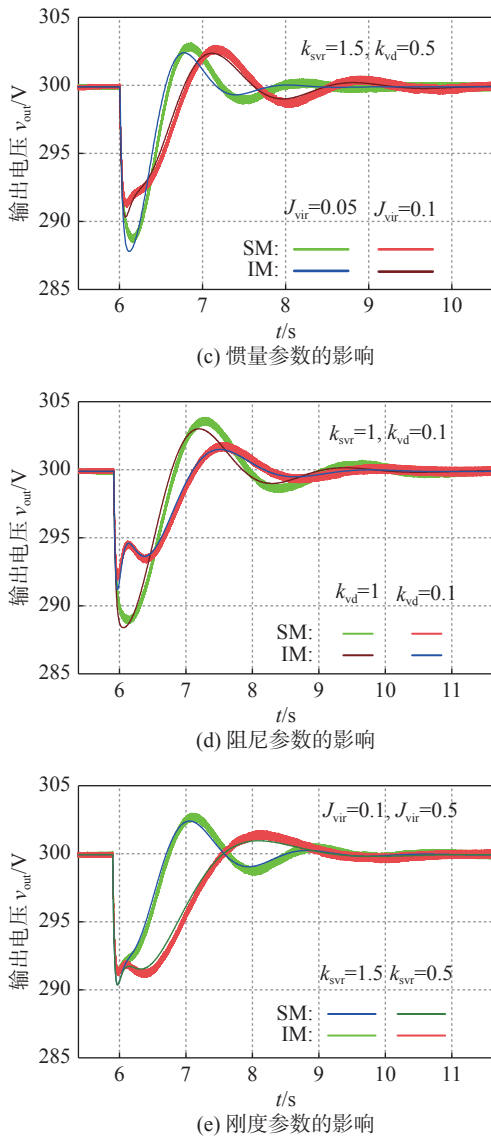


图7 惯量环阻抗模型验证

Fig. 7 Verification of inertia-loop impedance model

4 结论

为克服现有多时间尺度阻抗模型高阶传递函数属性在求解阻尼控制策略解析表达式时带来的不便。文章首先对环路虚拟阻抗进行了详细的阻抗分析, 直观地揭示了每个控制环路阻抗高阶属性的根本原因。随后, 通过伯德图近似提出了控制环路闭环增益的降阶拟合方法, 建立了低阶阻抗电路模型。最后, 通过 Matlab/Simulation 仿真结果验证了所提出的多时间尺度低阶阻抗电路模型的有效性。

参考文献:

- [1] HE P W, KHALIGH A. Comprehensive analyses and comparison of 1 kW isolated DC-DC converters for bidirectional EV charging systems [J]. *IEEE transactions on transportation electrification*, 2017, 3(1): 147-156. DOI: 10.1109/TTE.2016.2630927.
- [2] DU W J, FU Q, WANG H F. Small-signal stability of a DC network planned for electric vehicle charging [J]. *IEEE transactions on smart grid*, 2020, 11(5): 3748-3762. DOI: 10.1109/TSG.2020.2982431.
- [3] REHMAN W U, KIMBALL J W, BO R. Multi-layered energy management framework for extreme fast charging stations considering demand charges, battery degradation, and forecast uncertainties [J]. *IEEE transactions on transportation electrification*, 2023. DOI: 10.1109/TTE.2023.3275110.
- [4] FU Q, DU W J, WANG H F. Planning of the DC system considering restrictions on the small-signal stability of EV charging stations and comparison between series and parallel connections [J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2020, 69(10): 10724-10735. DOI: 10.1109/TVT.2020.3006480.
- [5] LIU Z J, SU M, SUN Y, et al. Existence and stability of equilibrium of DC microgrid with constant power loads [J]. *IEEE transactions on power systems*, 2018, 33(6): 6999-7010. DOI: 10.1109/TPWRS.2018.2849974.
- [6] LIN G, LIU J Y, REHTANZ C, et al. Inertia droop control and stability mechanism analysis of energy storage systems for DC-Busbar electric vehicle charging station [J]. *IEEE transactions on transportation electrification*, 2023, 9(1): 266-282. DOI: 10.1109/TTE.2022.3192921.
- [7] LIN G, MA J J, LI Y, et al. A virtual inertia and damping control to suppress voltage oscillation in islanded DC microgrid [J]. *IEEE transactions on energy conversion*, 2021, 36(3): 1711-1721. DOI: 10.1109/TEC.2020.3039364.
- [8] LONG B, ZENG W, RODRÍGUEZ J, et al. Stability enhancement of battery-testing DC microgrid: an ADRC-based virtual inertia control approach [J]. *IEEE transactions on smart grid*, 2022, 13(6): 4256-4268. DOI: 10.1109/TSG.2022.3184985.
- [9] YANG H Q, LI T S, LONG Y, et al. Distributed virtual inertia implementation of multiple electric springs based on model predictive control in DC microgrids [J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2022, 69(12): 13439-13450. DOI: 10.1109/TIE.2021.3130332.
- [10] LIN G, LIU J Y, WANG P C, et al. Low-frequency oscillation analysis of virtual-inertia-controlled DC microgrids based on multi-timescale impedance model [J]. *IEEE transactions on sustainable energy*, 2022, 13(3): 1536-1552. DOI: 10.1109/TSTE.2022.3157473.
- [11] LONG B, ZENG W, RODRÍGUEZ J, et al. Enhancement of Voltage Regulation capability for DC-microgrid composed by battery test system: a fractional-order virtual inertia method [J].

- IEEE transactions on power electronics, 2022, 37(10): 12538-12551. DOI: [10.1109/TPEL.2022.3171556](https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3171556).
- [12] WANG J, HUANG W T, TAI N L, et al. A bidirectional virtual inertia control strategy for the interconnected converter of standalone AC/DC hybrid microgrids [J]. IEEE transactions on power systems, 2023. DOI: [10.1109/TPWRS.2023.3246522](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3246522).
- [13] LIN G, LIU J Y, REHTANZ C, et al. A comprehensive stability assessment system for EV DC charging station based on multi-timescale impedance model [J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2023. DOI: [10.1109/TTE.2023.3262629](https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3262629).
- [14] GUO J, CHEN Y D, LIAO S H, et al. Analysis and mitigation of low-frequency interactions between the source and load virtual synchronous machine in an islanded microgrid [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2022, 69(4): 3732-3742. DOI: [10.1109/TIE.2021.3075847](https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3075847).
- [15] LENG M R, ZHOU G H, LI H Z, et al. Impedance-based stability evaluation for multibus DC microgrid without constraints on subsystems [J]. IEEE transactions on power electronics, 2022, 37(1): 932-943. DOI: [10.1109/TPEL.2021.3093372](https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3093372).
- [16] PARK D, ZADEH M. Dynamic modeling and stability analysis of marine hybrid power systems with DC grid: a model-based design approach [J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2023. DOI: [10.1109/TTE.2023.3296099](https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3296099).
- [17] SAHOO S, MISHRA S, JHA S, et al. A cooperative adaptive droop based energy management and optimal voltage regulation scheme for DC microgrids [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2020, 67(4): 2894-2904. DOI: [10.1109/TIE.2019.2910037](https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2910037).
- [18] KO B S, LEE G Y, CHOI K Y, et al. A coordinated droop control method using a virtual voltage axis for power management and voltage restoration of DC microgrids [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2019, 66(11): 9076-9085. DOI: [10.1109/TIE.2018.2877135](https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2877135).
- [19] XIAO J F, WANG P, SETYAWAN L. Multilevel energy management system for hybridization of energy storages in DC microgrids [J]. IEEE transactions on smart grid, 2016, 7(2): 847-856. DOI: [10.1109/TSG.2015.2424983](https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2424983).
- [20] KIM S H, BYUN H J, JEONG W S, et al. Hierarchical control with voltage balancing and energy management for bipolar DC microgrid [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2023, 70(9): 9147-9157. DOI: [10.1109/TIE.2022.3210517](https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3210517).
- [21] ZHU X R, MENG F Q, XIE Z Y, et al. An inertia and damping control method of DC-DC converter in DC microgrids [J]. IEEE transactions on energy conversion, 2020, 35(2): 799-807. DOI: [10.1109/TEC.2019.2952717](https://doi.org/10.1109/TEC.2019.2952717).
- [22] ZHI N, DING K, DU L, et al. An SOC-based virtual DC machine control for distributed storage systems in DC microgrids [J]. IEEE transactions on energy conversion, 2020, 35(3): 1411-1420. DOI: [10.1109/TEC.2020.2975033](https://doi.org/10.1109/TEC.2020.2975033).
- [23] JIANG Y J, YANG Y, TAN S C, et al. Distribution power loss mitigation of parallel-connected distributed energy resources in low-voltage DC microgrids using a Lagrange multiplier-based adaptive droop control [J]. IEEE transactions on power electronics, 2021, 36(8): 9105-9118. DOI: [10.1109/TPEL.2021.3050506](https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3050506).

作者简介:



林刚

林刚 (第一作者)

1994-, 男, 电气工程博士, 主要从事电力电子化电力系统稳定性分析方面的研究(e-mail)ganglin.me@qq.com。



戴宁怡

戴宁怡 (通信作者)

1979-, 女, 副教授, 主要研究方向为电力电子与电能质量补偿(e-mail)nydai@um.edu.mo。

(编辑 叶筠英)