[文章编号] 1007－7405(2020)01－0057－06 DOI:10.19715/j.jmuzr.2020.01.09

带恒功率负载的 Boost 变换器建模与稳定性分析

古 强，王荣杰

（集美大学轮机工程学院，福建 厦门 361021）

[摘要] 为了分析恒功率负载对直流变换器稳定性能的影响，以恒功率负载的产生机理为切入点，并将 Boost 变换器作为研究对象，采用状态空间平均法，搭建带恒功率负载的 Boost 变换器模型。伯德图和仿真结果皆表明，恒功率负载会使 Boost 变换器不稳定。

[关键词] 恒功率负载；负阻抗特性；Boost 变换器；稳定性

[中图分类号] TM 461.3

Modeling and Stability Analysis on Boost Converter Feeding Constant Power Load

GU Qiang, WANG Rongjie

(School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The paper analyzes the effect of constant power load on the system stability performance. Taking the generation mechanism of constant power load as the starting point, and regarding Boost converter as the research object, it builds the Boost converter model with constant power load by the state space averaging method. Finally, the simulation tests verify that the Boost converter system is unstable when feeding constant power load. The Bode diagrams and simulation results show that the constant power load oscillates the output voltage of the Boost converter, making the system unstable.

Keywords: constant power load; negative impedance characteristic; Boost converter; stability

0 引言

近年来，分布式电力系统的迅速发展，使 DC/DC 变换器的应用呈指数增长且范围十分广泛。DC/DC 变换器作为电源与负载的必要处理接口，不仅提高了系统性能、自动化水平，而且便于功率调节、提高输出电能质量，起到了节约能源的作用。DC/DC 变换器经常应用在级联系统中，使后级变换器表现为恒功率负载（constant power load，CPL），严重时会影响系统的稳定性。CPL 广泛存在于纯电动或混合动力汽车、高铁、飞机、船舶舰艇、人造卫星的供电系统，以及分布式发电和微电网等领域。文献［1－2］说明了 CPL 是导致电压和电流振荡或系统不稳定的重要原因；文献［3］对电动车开关电源的 CPL 现象进行了研究；文献［4］采用大信号分析法，对海洋交通工具电力系统中的

[收稿日期] 2019－04－01

[基金项目] 国家自然科学基金项目（51879118）；福建省科技拥军项目（B19101）；福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划（B17159）；农业部渔业装备与工程技术重点实验室基金项目（2018001）；人工智能四川省重点实验室基金项目（2017RJY02）；江苏省输电配电装备技术重点实验室基金项目（2017JSSPD01）

[作者简介] 古强（1992—），男，硕士生，主要从事船舶电力系统直流变换器稳定性研究。通信作者：王荣杰（1981—），男，博士，副教授，硕士生导师，主要从事智能信息处理和电力电子系统故障诊断研究。E-mail:roger811207@163.com

CPL 特性进行分析；文献［5］采用电压型控制方法分析由 CPL 引起的船舶中压直流系统不稳定现象；文献［6］用区间鲁棒控制器去降低直流变换器系统中由 CPL 引起的振荡效应。此外，CPL 也存在于微电网系统[7-10]。带恒功率负载的直流变换器稳定性分析已经成为电力领域的一个研究热点，本文以带恒功率负载的 Boost 变换器为研究对象，构建了其小信号平均模型，并进行稳定性分析。

1 恒功率负载

1.1 恒功率负载的产生机理

为满足电力需求，电力系统各部分应用直流变换器，通常出现两个或多个直流变换器级联，变换器级联结构如图 1 所示。当后级变换器的输出电压受控性能良好且受到精确反馈控制时，那么后级变换器的输出功率视为恒量。

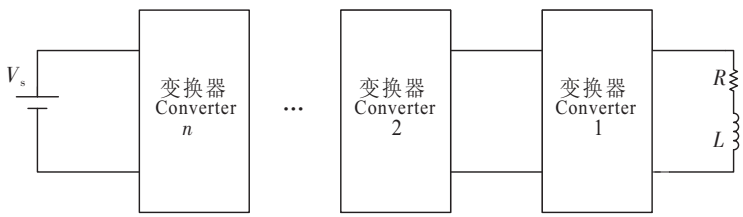


图 1 变换器级联结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of converter cascade structure

若定义后级变换器为负载变换器，那么具备这一类型的功率与电压关系的负载称作恒功率负载，其表达式为 $P = v_{in} \cdot i_{in}$。式中：P 为 CPL 的输入功率；v_{in} 为 CPL 的输入电压；i_{in} 为 CPL 的输入电流。

将输入电压的变化量记为 $\mathrm{d}v_{in}$，输入电流的变化量记为 $\mathrm{d}i_{in}$，那么 CPL 的小信号增量电阻可通过 $R_{CPL} = \mathrm{d}v_{in}/\mathrm{d}i_{in} = \mathrm{d}v_{in}/\mathrm{d}(P/v_{in}) = -v_{in}^2/P$ 求得。

CPL 的伏安特性曲线如图 2 所示：

1.2 恒功率负载的负阻抗特性

根据 CPL 的伏安特性曲线，分析带 CPL 电路平衡点处的稳定性，电源和负载的伏安特性如图 3 所示。A 点为系统平衡点，当系统某一时刻受到扰动，使电流减小 Δi，此时 CPL 电压 V_{CPL} 大于电源电压 v_s，因为 CPL 的功率恒定，从而使 CPL 电流 I_{CPL} 减小，偏离平衡点，使系统趋于不稳定，反之亦然。

若负载为纯阻性时，电源和负载的伏安特性如图 4 所示。B 点为系统平衡点，当系统某一时刻受到扰动，使电流增大 Δi，此时电阻电压 $V_R > v_s$，从而使电阻电流 I_R 受到电源影响而逐渐减小，回到平衡点，使系统趋于稳定，反之亦然。

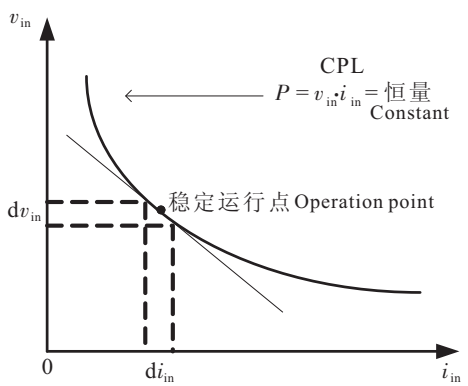


图 2 CPL 的伏安特性曲线

Fig.2 Volt-Ampere characteristic curve of CPL

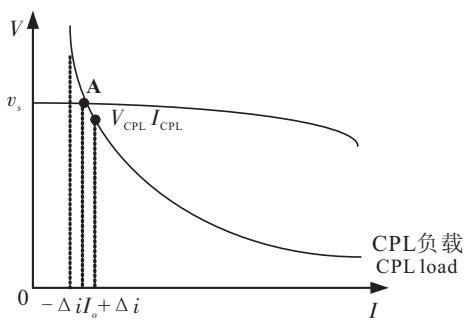


图 3 负载为 CPL 时的电压与负载关系图

Fig.3 Relationship between voltage and load when the load is CPL

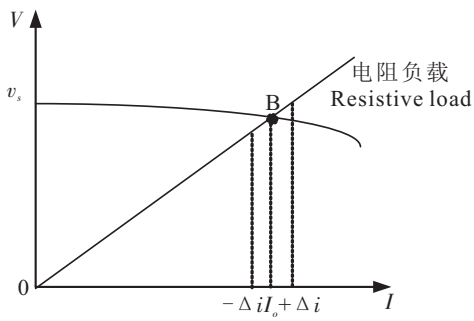


图 4 负载为电阻时的电压与负载关系图

Fig.4 Relationship between voltage and load when the load is resistance

2　带恒功率负载的 Boost 变换器建模

2.1　带恒功率负载的 Boost 变换器的开关模型

本文以带 CPL 的 Boost 变换器为分析对象，电路原理图如图 5 所示。

在连续导通模式下，选用开关变量的方法构建电路的开关模型，根据基尔霍夫定律，得到状态方程如下：

$$\begin{cases} \dot{i}_L = -(1-u)v_c/L + E/L; \\ \dot{v}_c = (1-u)i_l/C - v_c/R_{CPL}C。 \end{cases} \tag{1}$$

其中：E 为电压源电压；u 为开关函数，取值为 1 或 0。

由式（1）得出带 CPL 的 Boost 变换器的开关模型等效电路图如图 6 所示：

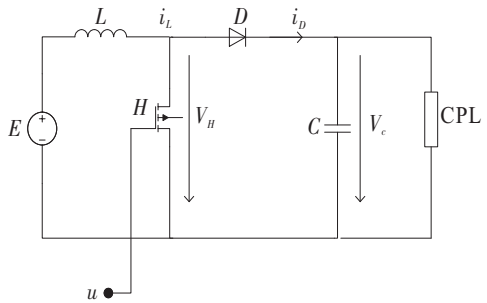


图 5　带 CPL 的 Boost 变换器主电路

Fig.5　Main circuit of Boost converter with CPL

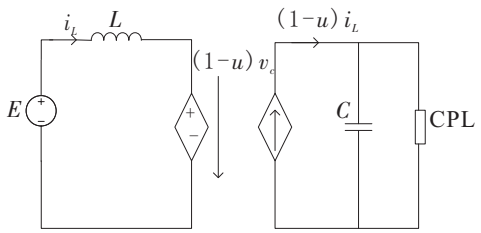


图 6　带 CPL 的 Boost 变换器开关模型等效电路图

Fig.6　Exact equivalent circuit diagram of Boost converter with CPL

2.2　带恒功率负载的 Boost 变换器的平均模型

因为平均模型精度优于开关模型，且更方便进行电路分析，故将开关模型转换成平均模型。为了表述方便，对变量平均值进行代换，定义 $x_1\langle i_L\rangle$ 表示电感电流平均值，$x_2 = \langle v_c\rangle_0$ 表示电容电压平均值。式中“$\langle\rangle_0$”符号表示变量平均值，那么电路的大信号平均模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = [E - x_2(1-\alpha)]/L; \\ \dot{x}_2 = [x_1(1-\alpha) - x_2/(R_{\mathrm{CPL}}C)]C。 \end{cases} \tag{2}$$

式中：α 表示对应于开关函数 u 的平均占空比。

将式（2）导数项置零，得到电路平衡点，并用下标“e”表示。

$$\begin{cases} x_{1e} = E/[(1-\alpha_e)^2 \cdot R_{\mathrm{CPL}}C]; \\ x_{2e} = E/(1-\alpha_e)。 \end{cases} \tag{3}$$

为了得到电路小信号模型，引入

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_e + \tilde{\alpha}; \\ x_1 = x_{1e} + \tilde{x}_1; \\ x_2 = x_{2e} + \tilde{x}_2。 \end{cases} \tag{4}$$

“~”表示平衡点处的扰动，联立式（2）~式（4），得到电路小信号平均模型，其双线性形式为：

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}}_1 \\ \dot{\tilde{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -(1-\alpha_e)/L \\ (1-\alpha_e)/C & -1/(R_{\mathrm{CPL}}C) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E/[L\cdot(1-\alpha_e)] \\ -E/[(1-\alpha_e)^2 \cdot R_{\mathrm{CPL}}C] \end{bmatrix} \tilde{\alpha}。 \tag{5}$$

式（5）的等效电路如图 7 所示。

令模型中耦合元件的传输效率为 α_e，$\alpha'_e = 1-\alpha_e$，则式（5）描述小信号电路的状态空间表达式如下：

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\boldsymbol{x}}} = \boldsymbol{A}\tilde{x} + \boldsymbol{B}\tilde{\alpha}, \\ \tilde{\boldsymbol{y}} = \boldsymbol{C}\tilde{x}。 \end{cases} \tag{6}$$

其中：

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{x}}} = \begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}}_1 \\ \dot{\tilde{x}}_2 \end{bmatrix}; \boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & -(1-\alpha_e)/L \\ (1-\alpha_e)/C & -1/(R_{\mathrm{CPL}}C) \end{bmatrix}; \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} E/(L\cdot(1-\alpha_e)) \\ -E/[(1-\alpha_e)^2\cdot R_{\mathrm{CPL}}C] \end{bmatrix}; \boldsymbol{C} = [1,0]。$$

将状态空间转换为频域的经典模型：

$$H_{\alpha\to v_c}(s) = \tilde{y}(s)/\tilde{\alpha}(s) = \boldsymbol{C}(sI - A)^{-1}\boldsymbol{B} + \boldsymbol{D}。 \tag{7}$$

其中：$D=0$，求得控制输入 $\tilde{\alpha}$ 到输出电压 $\langle\tilde{v}_c\rangle_0$ 的传递函数为：

$$H_{\alpha\to v_c}(s) = \langle\tilde{v}_c\rangle_0/\tilde{\alpha} = x_{2e}/\alpha_e^2\cdot\{[1 - s\cdot Lx_{1e}/(x_{2e}\alpha'_e)]/[s^2\cdot LC/\alpha'^2_e + s\cdot L/(R_{\mathrm{CPL}}\alpha'^2_e) + 1]\}。 \tag{8}$$

由式（8）得出该电路对应于最小相位系统，且电路极点为：

$$s_{1,2} = [(-1/R_{\mathrm{CPL}}) \pm \sqrt{(1/R_{\mathrm{CPL}}^2) - (4C\alpha'^2_e/L)}]/2C。 \tag{9}$$

由于 R_{CPL} 表现负阻抗特性，即 $R_{\mathrm{CPL}} < 0$，电路极点分布在右半复平面，故 Boost 变换器在开环状态下是不稳定的。

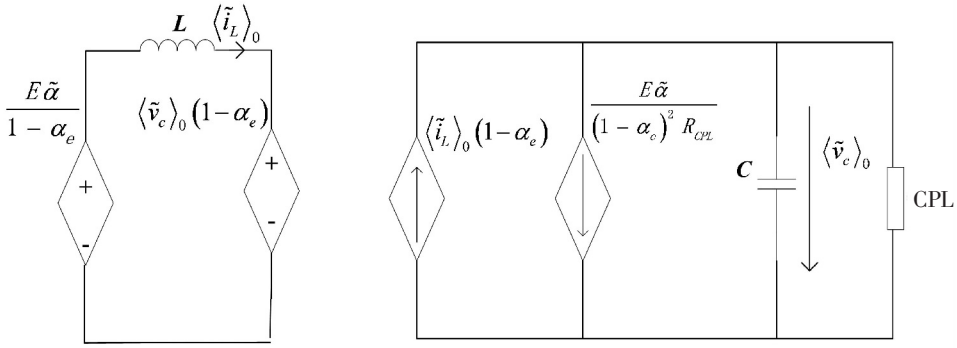


图 7 带 CPL 的 Boost 变换器的小信号平均模型的等效电路

Fig.7 Equivalent circuit of the small-signal average model of a Boost converter with CPL

3 带恒功率负载的 Boost 变换器仿真

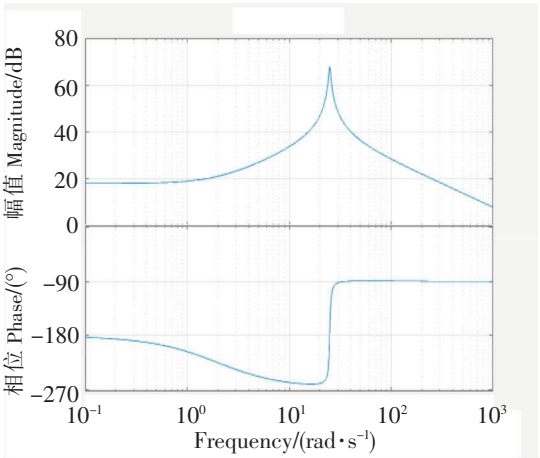
为了更好地表现出 CPL 的负阻抗特性给系统带来的振荡或失稳，本文采用仿真实验来说明带 CPL 的 Boost 变换器电路的不稳定性。电路参数分别为：$E=100$ V，占空比 $d=0.5$，$L=0.08$ H，$C=0.005$ F，CPL 功率为 200 W，$R=50\ \Omega$，$f=10$ kHz。负载分别为 CPL 和纯电阻，Boost 变换器从系统输入 $\tilde{\alpha}$ 到输出电压 $\langle\tilde{v}_c\rangle_0$ 的传递函数的伯德图如图 8 所示。

上文指出带 CPL 的 Boost 变换器是一个最小相位系统。由图 8a 可知：当频率逐渐增大，电路幅频特性 $L(\omega)$ 始终大于 0，且电路相频特性 $\varphi(\omega)$ 穿越 $-\pi$ 线，由此判定图 8a 电路是不稳定的；由图 8b 可知，当频率逐渐增大，电路幅频特性 $L(\omega)$ 始终大于 0，且电路相频特性 $\varphi(\omega)$ 未穿越 $-\pi$ 线，由此判定图 8b 电路是稳定的。

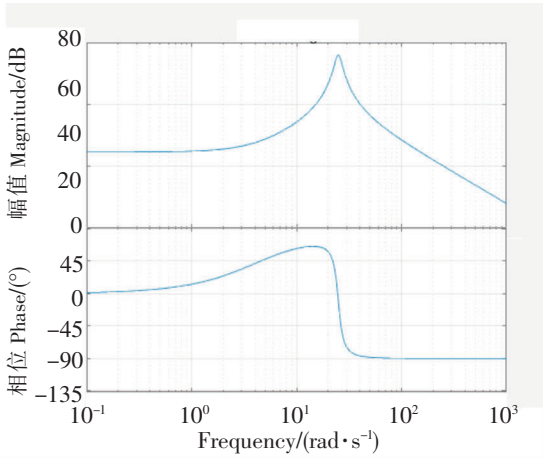
若将阶跃信号作为 Boost 变换器的激励源，得到阶跃响应曲线如图 9 所示。图 9a 的输出电压发散，即电路是不稳定的；图 9b 的输出电压最终收敛，即电路是稳定的。

最后，在 Simulink 上搭建 Boost 变换器仿真模型，仿真波形如图 10 所示。

结果表明：带 CPL 的 Boost 变换器的输出电压始终保持上升趋势，即输出电压发散，所以电路是不稳定的；带电阻性负载的 Boost 变换器的输出电压最终收敛，即电路是稳定的。



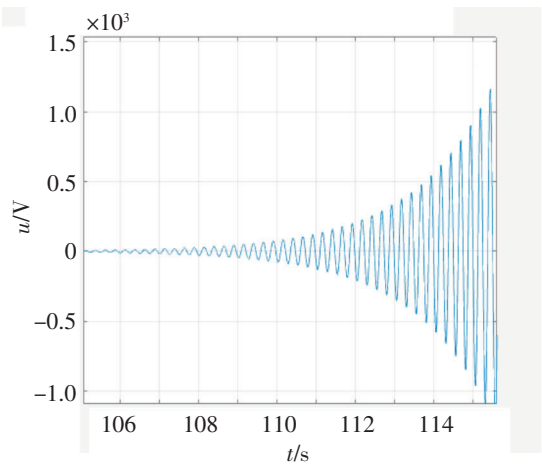
a) 带 CPL 的 Boost 变换器
Boost converter with CPL



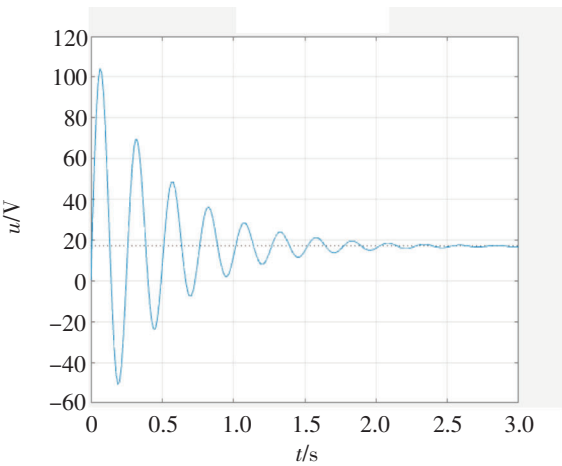
b) 负载为纯电阻的 Boost 变换器
Boost converter with pure resistance

图 8 不同负载下占空比–输出电压的传递函数的伯德图

Fig.8　Bode diagram of the transfer function of duty cycle to output voltage under different loads



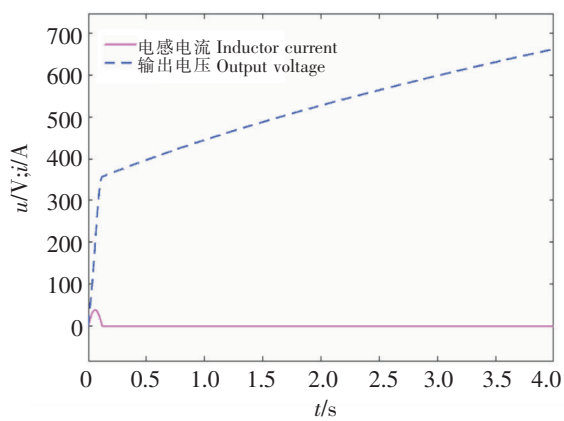
a) 带 CPL 的 Boost 变换器
Boost converter with CPL



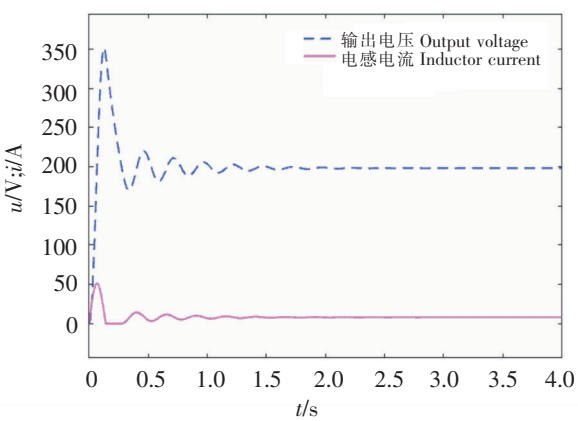
b) 负载为纯电阻的 Boost 变换器
Boost converter with pure resistance

图 9　不同负载下的电路阶跃响应曲线

Fig.9　Circuit step response curve under different loads



a) 带 CPL 的 Boost 变换器
Boost converter with CPL



b)负载为纯电阻的 Boost 变换器
Boost converter with pure resistance

图 10　不同负载下的电路电感电流和输出电压波形图

Fig.10　Simulation waveform of circuit inductor current and output voltage under different loads

4 结语

为了分析 CPL 对直流变换器稳定性能的影响，建立带 CPL 的 Boost 变换器的开关模型和小信号平均模型。由伯德图判断，带有电阻性负载的 Boost 变换器是稳定的，而带 CPL 的 Boost 变换器则是不稳定的。仿真结果也表明，CPL 会使 Boost 变换器的输出电压发散，使系统不稳定。

[参 考 文 献]

[1] KWASINSKI A, ONWUCHEKWA C N. Dynamic behavior and stabilization of DC microgrids with instantaneous constant-power loads [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 822-834.

[2] SULLIGOI G, BOSICH D, GIADROSSI G. Multiconverter medium voltage DC power systems on ships: constant-power loads instability solution using linearization via state feedback control [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 5(5): 2543-2552.

[3] SMITHSON S C, WILLIAMSON S S. Constant power loads in more electric vehicles - an overview [C] //38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, Canada: IEEE, 2012: 2914-2922. DOI:10.1109/IECON.2012.6389432.

[4] RIVETTA C, WILLIAMSON G A, EMADI A. Constant power loads and negative impedance instability in sea and undersea vehicles: Statement of the problem and comprehensive large-signal solution [C] //IEEE Electric Ship Technologies Symposium. 2005. Chicago USA: IEEE, 2005: 313-320. DOI:10.1109/ESTS.2005.1524694.

[5] 原永滨，徐滨海，张晓峻. 船舶电力系统恒功率负载稳定性仿真研究 [J]. 船舶工程，2011，33(6)：49-52.

[6] MARCILLO K E L, GUINGLA D A P, BARRA W, et al. Interval robust controller to minimize oscillations effects caused by constant power load in a DC multi-converter buck-buck system [J]. IEEE Access, 2019, 7: 26324-26342.

[7] RASHIDIRAD N, HAMZEH M, SHESHYEKANI K. High-frequency oscillations and their leading causes in DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(4): 1479-1491.

[8] LI G, ZHANG S, LI X, et al. Stability analysis and damping enhancement based on frequency dependent virtual impedance for DC microgrids [J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(1): 338-350.

[9] 李玉梅，查晓明，刘飞. 带恒功率负荷的直流微电网母线电压稳定控制策略 [J]. 电力自动化设备，2014，34(8)：57-64.

[10] LU X, KAI S, GUERRERO J M. Stability enhancement based on virtual impedance for DC microgrids with constant power loads [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 6(6): 2770-2783.

（责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕）