

基于无源控制的Buck变换器稳定性研究

段辰阳^{1,2}, 迟颂^{1,2}, Mustafa Alrayah^{1,2}, 李天航^{1,2}

(1. 河北工业大学 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300130;

2. 河北工业大学 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室, 天津 300130)

摘要: 直流微电网中存在大量的恒功率负载, 由于恒功率负载具有负阻抗特性, 会给电源系统的稳定运行带来不利影响, 不利于负荷的即插即用。通过分析带有恒功率负载的Buck变换器动态特性, 基于无源控制理论和系统的状态空间数学模型将传统无源控制器与比例积分调节器相结合, 得到自适应的无源反馈控制器, 用于消除由负载变动引起的稳态误差。利用Matlab/Simulink建立仿真模型, 仿真结果表明: 与传统无源控制相比, 在恒功率负载发生变化时, 改进后的无源控制器能对扰动快速响应, 输出电压无稳态误差, 具有更好的稳定性能。最后, 该控制策略的有效性在Opal-RT实时仿真机上得到了进一步验证。

关键词: 恒功率负载; 无源控制; Buck变换器; 稳定性; 实时仿真

中图分类号: TM71 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd19446

Research on Stability of Buck Converter Using Passivity-based Control

DUAN Chenyang^{1,2}, CHI Song^{1,2}, Mustafa Alrayah^{1,2}, LI Tianhang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology,

Tianjin 300130, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of

Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: DC microgrid contains a large number of constant power loads, which will adversely affect the stable operation of the power system due to the negative impedance characteristics. It is not conducive to the plug and play of the load. The dynamic characteristics of the Buck converter with constant power load was analyzed, the traditional passive controller and the proportional integral controller were combined to design an adaptive passive feedback controller based on the passive control theory and state space mathematical model of system, using to eliminate steady-state errors due to load variations. The simulation of the proposed controller was established in Matlab/Simulink, the results show that the improved passive controller can achieve fast response with better stability when the constant power load changes, and the output voltage has no steady-state error compared with the traditional passive control. Finally, the validity of the proposed control method was verified by the real-time simulation on Opal-RT platform.

Key words: constant power load(CPL); passivity-based control; Buck converter; stability; real-time simulation

近年来,随着人类社会的不断发展,人们对新能源的需求量越来越大。各国开始积极开展针对包含多种新能源的直流微电网的相关研究^[1-2], 新能源主要包括太阳能、风能、燃料电池等,随着这些分布式电源系统在直流微电网领域的应用,恒功率负载(constant power load, CPL)在系统中所占的比例越来越大^[3-4]。典型的直流微电网系

统结构图如图1所示,直流母线由分布式电源(光伏、蓄电池等)通过DC/DC变换器供电,再经由Buck变换器与负载母线相连以便提供适用于负载侧的电压等级。在负载侧,有75%~80%的负载为恒功率负载,20%~25%为电阻性负载。由于恒功率负载具有负阻抗特性,会对变换器输出电压稳定性产生影响,从而造成系统不稳定^[5-6]。

基金项目: 河北省高层次人才资助项目(E2015100007)

作者简介: 段辰阳(1994-),女,硕士,Email: 201621401022@stu.hebut.edu.cn

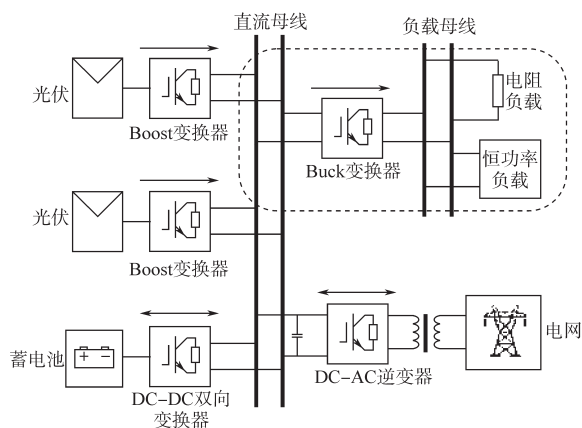


图1 典型直流微电网结构图

Fig.1 The structure of DC micro-grid

由于恒功率负载的负阻抗特性,使用传统的线性控制方法可能导致母线电压振荡甚至不稳定。因此,许多研究工作采用了协同控制^[7]、滑模控制^[8]或增加非线性干扰观测器^[9]等方法,此类非线性控制技术虽可以抵消恒功率负载的影响,但是其算法较为繁琐,计算量大,并且容易受系统中变换器参数的影响。后来有学者将无源控制应用于仅带有电阻负载的DC/DC变换器^[10]中,其优于其他非线性控制方法的地方是该方法利用了自身物理系统的结构特性使得其易于实现。但在实际应用中,由于负载侧的变化和不确定性,无源控制器中负载参数为初始固定值,这导致实际工作点和期望工作点之间存在偏差,尤其是当系统中存在大量的恒功率负载时,这种情况会更加严重。

在直流微电网中,为提供适用于负载侧的电压等级,直流母线可通过Buck变换器与负载母线相连,再由负载母线向恒功率负载和电阻性负载供电。本文通过对带有恒功率负载的Buck变换器进行建模,根据系统的状态方程,向系统中注入虚拟阻尼,得到系统的无源控制律。此外将比例积分调节器添加到反馈回路中作为参数修正部分,通过闭环反馈实现系统的稳定控制,消除由于负载变动引起的稳态误差。当负载发生变化时,改进后的无源控制器能够快速响应,维持系统稳定运行,并对负载扰动下系统的动态响应进行了仿真验证和分析。

1 系统描述

1.1 恒功率负载的负阻抗特性

恒功率负载的负阻抗特性^[11]如图2所示,可以看到瞬时阻抗是正值,但阻抗的增量为负,相

当于向系统施加了负阻尼,会降低系统的稳定性。

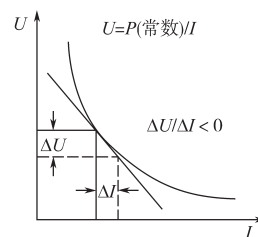


图2 恒功率负载的负阻抗特性

Fig.2 The negative impedance behavior of constant power loads

假设在稳态工作点恒功率负载的功率 P 为

$$P = UI \quad (1)$$

式中: U, I 分别为稳态工作点的电压和电流值。

加入小信号电压扰动 $\tilde{u}$ 和电流扰动 $\tilde{i}$ 后 P 如下式:

$$P = (U + \tilde{u})(I + \tilde{i}) \quad (2)$$

忽略系统的二阶分量,等式两边稳态量相互抵消,可得:

$$\frac{\tilde{u}}{\tilde{i}} = -\frac{U}{I} = -\frac{U^2}{P} = -R_{CPL} \quad (3)$$

式中: R_{CPL} 为恒功率负载的等效输出电阻。

由式(3)可知, R_{CPL} 的大小与其端口电压和功率的比值相关,当电压值一定时,功率越大,输出电阻值越小,负阻抗作用就越大,因此,系统受到的影响也就越大。

1.2 变换器建模

Buck变换器的电路拓扑如图3所示。

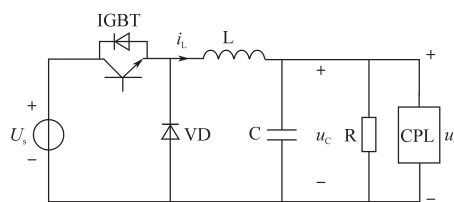


图3 带有恒功率负载和电阻负载的Buck变换器电路结构图

Fig.3 The circuit structure of Buck converter with constant power load and resistive load

图3中,变换器输入电压 U_s 为直流微电网的母线电压,输出电压 u_o 为负载侧母线电压。假定变换器工作在CCM模式下,选取电感电流和电容电压作为状态变量,则该电路的状态空间平均模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = DU_s - u_c \\ C \frac{du_c}{dt} = i_L - \frac{u_c}{R} - \frac{P}{u_c} \end{cases} \quad (4)$$

式中: i_L, u_c 为电感电流和电容电压; P 为恒功率负载的功率; D 为开关管的占空比; L 为电感; C 为电容; R 为电阻负载。

式(4)的初始条件为: $i_L \geq 0, U_c \geq \varepsilon$, ε 为一个很小的正值。当系统处于稳态时,系统的平衡点计算如下式:

$$\begin{cases} DU_s - U_c = 0 \\ I_L - \frac{U_c}{R} - \frac{P}{U_c} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: U_c 为稳态时电容两端的电压; I_L 为稳态时的电感电流。

求解式(5)可得:

$$\begin{cases} U_c = DU_s \\ I_L = \frac{U_c}{R} + \frac{P}{U_c} \end{cases} \quad (6)$$

则 $[I_L, U_o]^T = [I_L, U_c]^T$ 即为系统的平衡点的期望值,其中 U_o 为负载侧输出电压稳态值。

系统方程式(4)可以写作:

$$A\dot{x} + (B + R)x = U \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L \\ u_o \end{bmatrix} & A &= \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} & R &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R} + \frac{P}{u_c^2} \end{bmatrix} \\ U &= \begin{bmatrix} DU_s \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

图4为开环状态下Buck变换器的动态特性, $0 \sim 0.2$ s时 R (阻性负载) $> R_{CPL}$ (恒功率负载), CPL起主导作用,系统通过电容和电感之间的循环电路使能量产生振荡,从而产生具有不稳定平衡点的极限循环特性。在 0.2 s改变负载使得 $R < R_{CPL}$,此时 R 占主导地位,输出端将提供更多机会消耗能量,使系统变得稳定。也就是说,母线电压一定的情况下,当电路中电阻负载占主导地位时,系统更容易稳定。

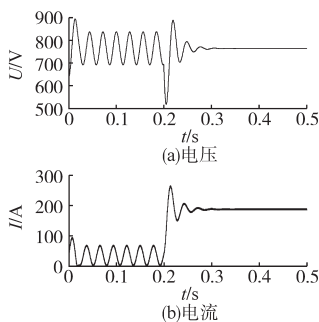


图4 不同负载状态时开环控制下Buck变换器的动态特性

Fig.4 Dynamic characteristics of Buck converter under open-loop control with different load conditions

2 无源反馈控制器设计

由图4可知,当系统的阻性负载占主导地位时,系统变得稳定,但会导致系统输出端消耗能量增加。为了节约能量的消耗,我们可以通过闭环反馈控制器在电感回路中串联虚拟电阻和在电容回路中并联虚拟电阻,这种方式既可使系统稳定又不消耗能量,即为无源控制的主要思想。

无源控制器的主要作用是快速实现 $i_L \rightarrow I_L, u_o \rightarrow U_o$,令 $x = \bar{x} + \tilde{x}$,其中 $\tilde{x}$ 为误差, $\bar{x}$ 为平衡点的期望值,代入式(7),得到:

$$(A\tilde{x} + A\bar{x}) + (B\bar{x} + B\tilde{x}) + (R\bar{x} + R\tilde{x}) = U \quad (8)$$

整理得:

$$\dot{\tilde{x}} + (B + R)\tilde{x} = U - [\dot{\tilde{x}} + (\bar{x} + \tilde{x})] \quad (9)$$

在式(9)的两侧添加虚拟阻尼矩阵 $R_d\tilde{x}$,得到:

$$A\dot{\tilde{x}} + (B + R)\tilde{x} + R_d\tilde{x} = U - [A\dot{\tilde{x}} + (B\bar{x} + R\bar{x}) - R_d\tilde{x}] \quad (10)$$

其中

$$R_d = \begin{bmatrix} R_{1d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{2d}} \end{bmatrix} \quad \tilde{x} = x - \bar{x} = \begin{bmatrix} i_L - I_L \\ u_o - U_o \end{bmatrix}$$

式中: R_{1d} , R_{2d} 分别为电感支路串联和电容支路并联的虚拟电阻值。

假设系统的误差 $\tilde{x}$ 为0时,式(10)左侧为0,即

$$A\dot{\tilde{x}} + (B + R)\tilde{x} + R_d\tilde{x} = 0 \quad (11)$$

定义系统的误差能量存储函数 $H(x)$ 为

$$H(x) = \frac{1}{2} \tilde{x}^T A \tilde{x} \quad (12)$$

式中:矩阵 A 为正定矩阵。

可得 $H(x) > 0$ 。而 $H(x)$ 对时间的导数为

$$\dot{H}(x) = \frac{1}{2} \tilde{x}^T (A + A^T) \dot{\tilde{x}} = \tilde{x}^T A \dot{\tilde{x}} \quad (13)$$

由式(11)可得 $A\dot{\tilde{x}} = -[(B + R)\tilde{x} + R_d\tilde{x}]$,代入式(13)得:

$$\begin{aligned} \dot{H}(x) &= -\tilde{x}^T [(B + R)\tilde{x} + R_d\tilde{x}] \\ &= -[\tilde{x}^T B \tilde{x} + \tilde{x}^T (R + R_d) \tilde{x}] \\ &= -[m + n] \end{aligned} \quad (14)$$

其中

$$m = \tilde{x}^T B \tilde{x} \quad n = \tilde{x}^T (R + R_d) \tilde{x}$$

由于矩阵 B 为反对称矩阵,故 $m=0$,而阻尼矩阵 $R_a = R + R_d$ 为正定对角阵,则 $n > 0$,因此可得 $\dot{H}(x) = -n < 0$ 。

根据李雅普诺夫(Lyapunov)稳定性定理,当能量存储函数满足 $H(x) > 0, \dot{H}(x) < 0$ 时,系统的误差 $\tilde{x}$ 将会收敛到0,即式(11)定义的误差系统

零点是一个渐近的稳定点。换言之,如果满足条件使得式(10)右侧恒等于零,则误差“零”点 $\tilde{x}=0$ 将成为整个系统的固有稳定点,即

$$U - [A\dot{\tilde{x}} + (B\tilde{x} + R\tilde{x}) - R_d\tilde{x}] = 0 \quad (15)$$

式(15)即为系统的无源控制律,将各个矩阵代入整理得到:

$$\begin{cases} DU_s - U_o + R_{ld}(i_L - I_L) = 0 \\ I_L - \frac{U_o}{R} - \frac{P}{U_o} + \frac{1}{R_{2d}}(u_o - U_o) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

可得占空比 D 和电路电流 I_L 的计算公式如下:

$$D = \frac{1}{U_s} [U_o + R_{ld}(I_L - i_L)] \quad (17)$$

$$I_L = \frac{U_o}{R} + \frac{P}{U_o} + \frac{1}{R_{2d}}(U_o - u_o) \quad (18)$$

式(17)和式(18)即为无源控制器的控制公式,开关管的控制信号 D 由电感电流反馈内环得到,电感电流 I_L 通过电压反馈外环获得。

从理论上讲,如果系统负载无变动,则可以通过上述控制公式将变换器的输出电压精确地控制在所需的值。然而,由于系统参数和操作条件的变化和不确定性,当负载功率变化时,将导致稳态时输出电压存在误差 e_u ($e_u = U_o - u_o$)。为了消除稳态误差 e_u ,在原有无源控制器上添加了一个互补的比例积分调节器作为负载变化的反馈修正值。无源反馈如图5所示,互补比例积分调节器使用变换器的输出电压作为反馈信号,与期望输出电压 U_{ref} 进行比较得到电压误差 e_u ,再经由比例积分调节器,产生的补偿功率 ΔP 如下式所示:

$$\Delta P = k_p \cdot e_u + \int k_i \cdot e_u \cdot dt \quad (19)$$

式中: k_p , k_i 分别为比例积分调节器的比例和积分增益。

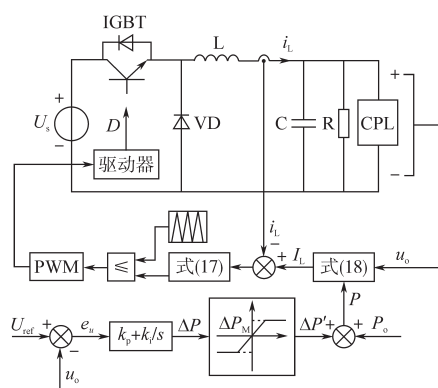


图5 无源反馈控制器框图

Fig.5 Block diagram of passive feedback controller

ΔP 的值受功率限制器的限制,其输出 $\Delta P'$

用作无源控制器的补偿功率值以考虑负载变化。 ΔP_M 为补偿功率的最大值,用于避免比例积分调节器的饱和。

3 仿真结果及分析

3.1 Simulink 仿真

为了验证本文所提出的控制策略,根据图5所示的电路在Matlab/Simulink中搭建仿真模型。本文将改进后的无源控制与传统无源控制在相同工况下进行对比仿真,输入电压 $U_s=750$ V,开关频率 $f_s=20$ kHz,虚拟电阻值 $R_{ld}=1e^6$ Ω , $R_{2d}=0.5$ Ω ;补充比例积分增益为: $k_p=20$, $k_i=5e^4$;Buck变换器的电路仿真参数设置为:输入电压 $U_s=750$ V,输出电压参考值 $U_{ref}=375$ V,电感 $L=2$ mH,电容 $C=1\ 000$ μ F,电阻负载 $R=60$ Ω ,恒功率负载功率 $P_o=2$ kW。

图6为恒功率负载由2 kW跳变为1 kW时的输出电压波形图。在0.1 s时,恒功率负载的功率由初始的2 kW降低至1 kW, $\Delta P=1$ kW,传统无源控制由于参数固定,控制器中参数仍为2 kW,因此输出电压升高,存在电压误差;改进后经过比例积分控制器的修正,此时进入无源控制器的负载功率参数值为1 kW,输出电压恢复到原有水平。

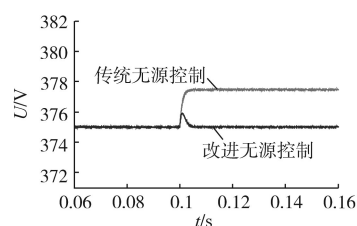


图6 恒功率负载由2 kW跳变为1 kW时输出电压波形

Fig.6 The waveforms of output voltage when the constant power load varies from 2 kW to 1 kW

图7为恒功率负载由2 kW跳变为4 kW时的输出电压波形图。在0.1 s时,恒功率负载的功率

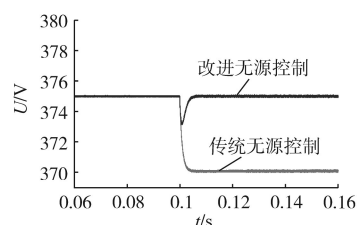


图7 恒功率负载由2 kW跳变为4 kW时输出电压波形

Fig.7 The waveforms of output voltage when the constant power load varies from 2 kW to 4 kW

由初始的2 kW升高至4 kW, $\Delta P=2$ kW,传统无源控制下输出电压下降,随着 ΔP 增大,电压误差也随之增大;改进后的控制器输出电压仍可以恢复到原有水平。

表1和表2为恒功率负载变化前后2种控制方法下的电压值对比。可以看出,传统无源控制下的稳态电压误差随着 ΔP 增大而增大,改进后的无源控制输出电压在功率突变瞬间经过短暂瞬态过程后恢复稳定,无稳态误差。

表1 $\Delta P=1$ kW时2种控制方式下电压值

Tab.1 Voltage values under two control modes when $\Delta P=1$ kW

控制方式	$P=2$ kW时 输出电压/V	$P=1$ kW时 稳定电压/V	瞬态最大 误差/V	稳态误差/ V
传统无源	375.0	377.5	2.5	2.5
改进无源	375.0	375.0	0.9	0

表2 $\Delta P=2$ kW时2种控制方式下电压值

Tab.2 Voltage values under two control modes when $\Delta P=2$ kW

控制方式	$P=2$ kW时 输出电压/V	$P=1$ kW时 稳定电压/V	瞬态最大 误差/V	稳态误差/ V
传统无源	375.0	370.0	5	5
改进无源	375.0	375.0	1.8	0

3.2 Opal-RT实时仿真

将3.1节中建立的Matlab/Simulink模型放到Opal-RT实时仿真机进行实时仿真,使用该平台可以得到更加实际可靠的仿真实验结果,如图8所示,Opal-RT实时仿真平台由上位机和下位机构成^[12],上位机使用的是普通PC机,运行Windows操作系统及配套的RT-LAB相关软件;下位机使用加拿大Opal-RT公司生产的并行计算机OP5600模块,该机型包含32路数字量输入输出接口,16路模拟量输入输出接口,运行Red Hawk Linux实时操作系统。上位机与下位机之间通过TCP/IP进行通信,可通过PC机的人机交互界面实时调整模型参数。

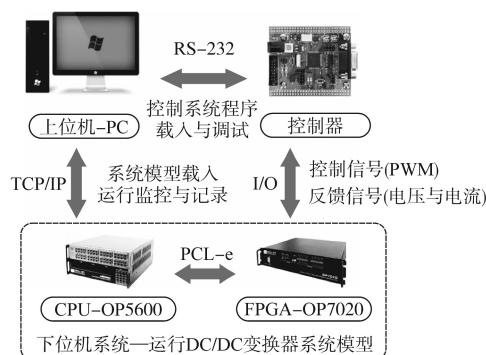


图8 Opal-RT实时仿真平台

Fig.8 Platform of Opal-RT real-time simulation

实时仿真流程图如图9所示。首先在Simulink下建立系统的离线模型,通过重新划分子系统等操作将模型转换为可以在RT-LAB中运行的实时模型。RT-LAB软件可以对实时模型进行识别,转换为下位机可以识别的代码后,使其在下位目标机中实时运行,并且RT-LAB软件可以跟踪模型的瞬时更改,以实现实时仿真。将输出电压信号从仿真机的I/O接口引出到示波器上进行观测。

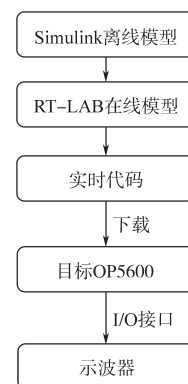


图9 实时仿真流程框图

Fig.9 Flowchart of real-time simulation

图10、图11分别为实时仿真机中恒功率负载改变时输出电压的波形,与Simulink软件仿真结果变化趋势一致,进一步验证了改进后无源控制器的可靠性。

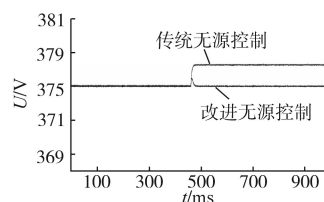


图10 恒功率负载由2 kW跳变为1 kW时
输出电压实时仿真波形

Fig.10 The real-time simulated waveforms of output voltage when the constant power load varies from 2 kW to 1 kW

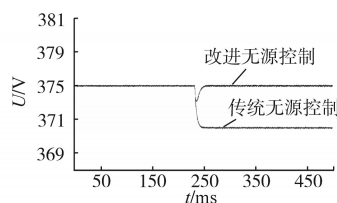


图11 恒功率负载由2 kW跳变为4 kW时
输出电压实时仿真波形

Fig.11 The real-time simulated waveforms of output voltage when the constant power load varies from 2 kW to 4 kW

4 结论

本文研究了直流微电网中负载侧带有恒功率负载的Buck变换器的稳定控制问题,根据系统的状态空间方程和李雅普诺夫定理得到无源控制律,通过注入虚拟阻尼的方法来提高带恒功率负载的变换器系统稳定性,同时添加了比例积分调节器与无源控制互补工作。当恒功率负载变化时,可以快速跟踪系统的状态,消除输出电压稳态误差,具有良好的抗干扰能力,提高系统稳定性。该控制器的可靠性已在Matlab/Simulink软件和Opal-RT实时仿真机中进行了验证。该控制策略不仅适用于Buck变换器,对其他DC/DC变换器也同样适用。

参考文献

- [1] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
- [2] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):4999-5008.
- [3] 王建华,张方华,龚春英,等. 带恒功率负载的DC/DC变换器阶跃响应过程分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(30):7-11.
- [4] Loughanski K P. Modeling and Analysis of a DC Power Distribution System in 21st Century Air Lifters[D]. VA: Virginia Tech,1999.
- [5] Singh S, Gautam A R, Fulwani D. Constant Power Loads and Their Effects in DC Distributed Power Systems: A Review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 72: 407-421.
- [6] Cespedes M, Xing Lei, Sun Jian. Constant-power Load System Stabilization by Passive Damping[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(7): 1832-1836.
- [7] Kondratiev I, Santi E, Dougal R, et al. Synergetic Control for DC-DC Buck Converters with Constant Power Load[C]// 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, 2004:3758-3764.
- [8] Fulwani D K, Singh S. Mitigation of Negative Impedance Instabilities in DC Distribution Systems[M]. Singapore: Springer, 2017.
- [9] Xu Q, Zhang C, Wen C, et al. A Novel Composite Nonlinear Controller for Stabilization of Constant Power Load in DC Microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 752-761.
- [10] 吴磊涛,杨兆华,胥布工. DC/DC开关变换器的无源控制方法[J]. 电工技术学报,2004,19(4):66-69.
- [11] 高朝晖,林晖,张晓斌. Boost变换器带恒功率负载状态反馈精确线性化与最优跟踪控制技术研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(13):70-75.
- [12] 董建政,李征,蔡旭. 基于RT-LAB的双馈风电场动态建模[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(7):83-89.

收稿日期:2018-08-25

修改稿日期:2018-10-25