

带恒功率负载的机载直流电源系统稳定性分析

刘晓倩 黄建 全应栓

(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100191)

摘要: 恒功率负载特性是多电飞机电源系统的典型特性之一,将飞机的电源系统和恒功率负载结合,为了得到带恒功率负载的机载电源系统的稳定性条件,以机载直流稳压电源系统为研究对象,将其简化为相应的等效电路,建立恒功率特性载荷模型,通过全系统的理论分析、数学建模,依据劳斯判据,得到对于给定的恒功率负载的机载直流电源系统,通过增大电机补偿电容可以提高其稳定性的结论。并且通过仿真以及实验对得到的稳定性条件进行验证。结果可用于电路的设计以及优化。

关键词: 恒功率负载;电源系统;等效电路;建模;稳定性

中图分类号: TN710 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470

Analyze the stability of aircraft DC power supply system with constant power loads

Liu Xiaoqian Huang Jian Quan Yingshuan

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The characteristic of constant power loads is one of the typical characteristics of more electric aircraft power supply system. Combining of aircraft power supply system with constant power load. In order to get the stability condition of the power system with constant power load, as the research object, DC regulated power supply system in airborne is simplified equivalent circuit. The equivalent mathematical model is developed for the constant power loads, and analyzes its theories. According the Routh criterion of automatic control principle, the conclusion which increasing motor compensation capacitance can improve the stability of the power system with constant power load is obtained. Through the simulation and experiments can prove the accuracy of these conditions. The results can be used in the design and optimization of the circuit.

Keywords: constant power loads; power supply system; equivalent circuit; modeling; stability

1 引言

随着多电/全电飞机技术的发展,恒功率特性的机载用电设备所占比重越来越高。恒功率的负载具有负阻抗特性,其与飞机电源系统恒压控制之间的耦合关系会带来稳定性问题^[1-4]。国内主要集中于对变换器带恒功率负载启动过程及性能分析的研究,这些研究主要是从大信号模型和相平面法等方面入手^[5-7],而对于恒功率负载特性本身以及建模^[8]方面研究很少。国外则在带有恒功率负载的系统稳定性方面有一些深入研究,其中提出了基于滑模控制^[9]、像平面分析^[10]、基于协同控制以及反馈线性化^[11]等方法。但以上这些都是针对具体的电源系统和电子负载,并没有

将其二者结合起来考虑,尤其是将其与飞机的电源系统结合起来分析。由于飞机电源系统的特殊性,以及在其产生电压振荡时所可能造成的严重后果上可以看出对飞机带恒功率负载电源系统工作时产生的电压振荡现象的研究不论从理论上还是从解决实际问题的角度出发都是很有意义的。

对飞机电源系统带恒功率负载时产生的振荡现象进行了深入分析,得到了提高系统稳定性的电路参数范围,且利用 Ansys 仿真软件,在该软件中建立等效的电路模型,通过对电路设计不同参数,比较仿真结果;同时也在实际试验当中,改变电机及负载参数,分析得到的波形。

收稿日期:2015-06

2 直流电源系统的理论分析

以飞行器常见的他励直流电源系统为研究对象,建立包括比例励磁调节器和恒功率负载的全系统模型。其中,恒功率负载是指在不计损耗的情况下该负载的输入功率等于其输出功率。根据 $P = UI$ (P 为电功率, U 为电压, I 为电流),即在 P 恒定的情况下,当负载电流增加或减少时,负载电压就会随之减少或增加。其曲线如图 1 所示。

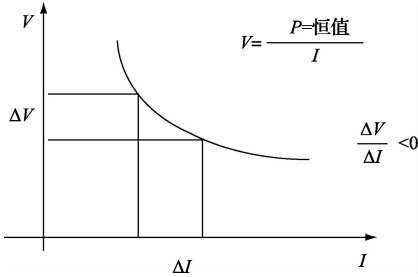


图 1 恒功率负载的负阻抗曲线

负阻抗特性是指虽然恒功率负载的瞬时电阻 $R = V/I$ 大于零,但是其电阻的增长率 $\Delta R = \Delta V / \Delta I$ 小于零。研究的直流供电系统是由他励直流发电机、比例励磁调节器和恒功率负载电路 3 部分组成。若直流发电机恒转速,则可近似认为每极的气隙磁通量与励磁电流成正比。而电枢电动势与励磁电流 i_f 成正比,则有式(5),其中 K_u 就是电枢电动势受励磁电流调节的系数。在直流电源系统中,比例励磁调节器作为输出电压 u_0 的负反馈环节,可将其化简为一个系数为负的(K)受输出电压控制的电压源。与励磁电压 u_f 共同为励磁系统供电。根据这些建立了供电系统带负载的等效模型,如图 2 所示。

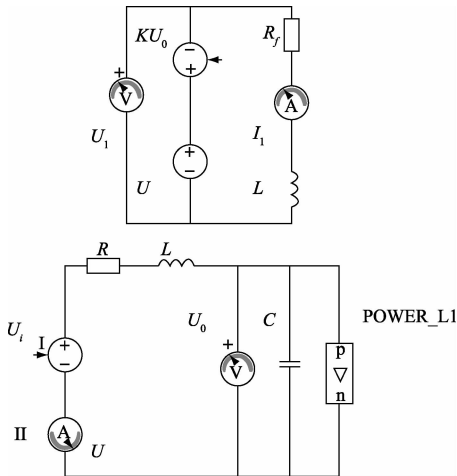


图 2 直流电源系统等效电路

根据直流电源系统等效电路,可列得方程组如下:

$$L \frac{di_L}{dt} = u_i - u_0 - Ri_L \quad (1)$$

$$C \frac{du_0}{dt} = i_L - \frac{P}{u_0} \quad (2)$$

$$u_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (3)$$

$$u_f = U - Ku_0 \quad (4)$$

$$u_i = K_u i_f \quad (5)$$

式中: R_f, L_f 为励磁电阻和励磁电感, R, L 为电枢电阻和电枢电感, C 为电机补偿电容。令:

$$u_0 = -K_1 I + Q \quad (6)$$

式中: $K_1 = \frac{u_0^2}{P}, Q = 2u_0$ 由此式(2)变为:

$$C di_L/dt = i_L + \frac{u_0 - Q}{K_1} \quad (7)$$

将该方程组进行拉氏变换得:

$$Ls i_L(s) = u_i(s) - u_0(s) - Ri_L(s) \quad (8)$$

$$Csu_0(s) = i_L(s) + \frac{u_0(s)}{K_1} - \frac{Q}{K_1} \quad (9)$$

$$u_i(s) = K_u i_f(s) \quad (10)$$

$$u_f(s) = \frac{U}{s} - Ku_0(s) \quad (11)$$

$$u_f(s) = R_f i_f(s) + L_f s i_f(s) \quad (12)$$

根据该方程组,得到其传递函数的流程,如图 3 所示。

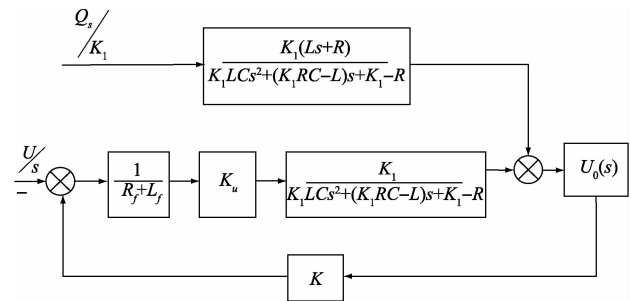


图 3 系统动态结构

通过对系统结构图的分析,可以得到系统的特征多项式:

$$D(s) = K_1 L_f L C s^3 + [L_f (K_1 R C - L) + R_f K_1 L C] s^2 + [L_f (K_1 - R) + R_f (K_1 R C - L)] s + R_f (K_1 - R) + K_u K K_1 \quad (13)$$

判别系统是否稳定,可以归结为判别系统特征根实部的符号,只有所有特征根均具有副实部,系统才稳定。根据特征方程的各项系数,直接判断系统的所有特征根的实部是否都为负数的方法有赫尔维茨(Hurwitz)判据,林纳德-奇帕特(Lienard-Chipard)判据和劳斯(Routh)判据。本文所得特征方程是 3 阶,系统特征方程阶次越高,应用前两种判据时,计算行列式的工作量越大,因此利用劳斯判据得到系统稳定性条件。根据劳斯判据,即系统稳定的充分必要条件是劳斯表中第一列所有元素符号相同(但不为 0)。并且该列中数值符号改变的次数等于特征方程中正实部根的数目。从而得到系统的稳定条件为:

$$P < U_0^2 C \left(\frac{R_f}{L_f} + \frac{R}{L} \right) \quad (14)$$

且:

$$C > \frac{L_f L (R_f U_0^2 - 2R_f R + K_a K U_0^2) - (L_f R + R_f L)^2 P}{2R_f R (L_f R + R_f L) U_0^2} \quad (15)$$

3 稳定性判据的验证

3.1 仿真验证

以某型小功率发电机为测试对象,实际测量得到模型

所需参数为:

$L_f = 0.12 \text{ H}$, $L_a = 10 \text{ mH}$, $R_a = 16.8 \Omega$, $R_f = 46.2 \Omega$, $C = 2 \mu\text{F}$, $K = 0.5$, $K_a = 100$, $U_0 = 40 \text{ V}$ 。式中: R_f 、 L_f 为励磁电阻和励磁电感。 L_a 、 R_a 为电枢电阻和电枢电感。

搭建的仿真结构如图 4 所示。

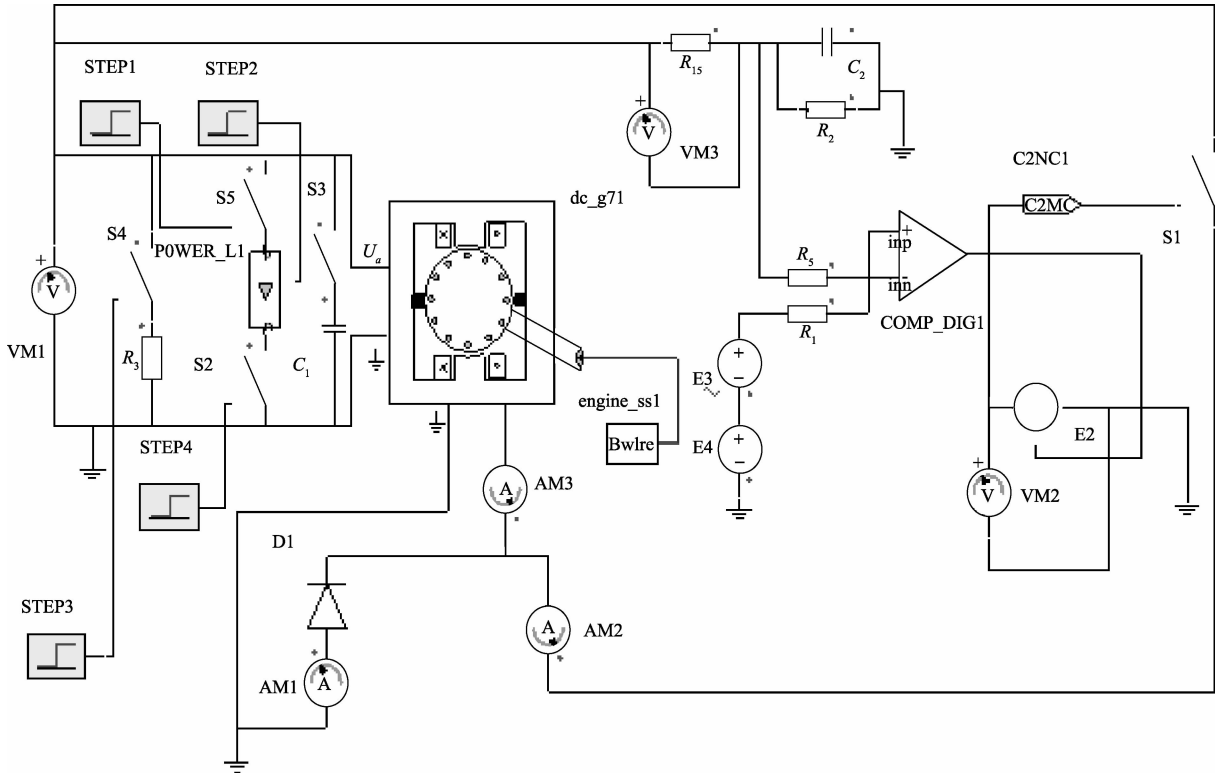


图 4 直流发电系统仿真结构

对带励磁调节器的小功率直流发电机在额定转速下加 5 W 的恒功率负载,其电压波形如图 5 所示。

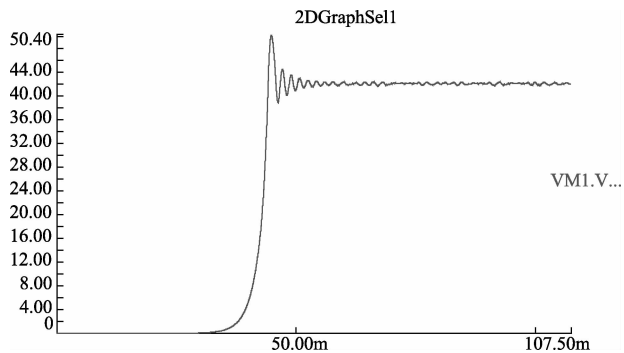


图 5 加 5 W 恒功率负载电压仿真波形

对带励磁调节器的小功率直流发电机在额定转速下加 9 W 的恒功率负载,其电压波形如图 6 所示。

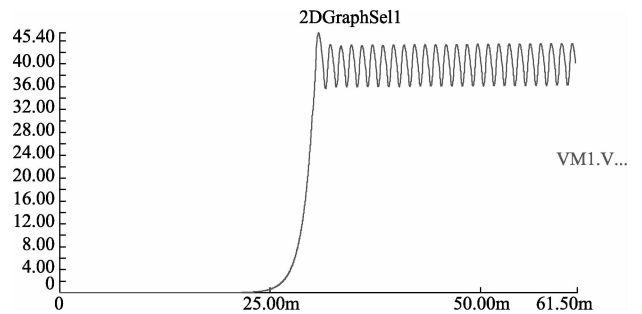


图 6 加 9 W 恒功率负载电压仿真波形

对小功率直流电源系统并上 $25 \mu\text{F}$ 电容,其电压波形如图 7 所示。

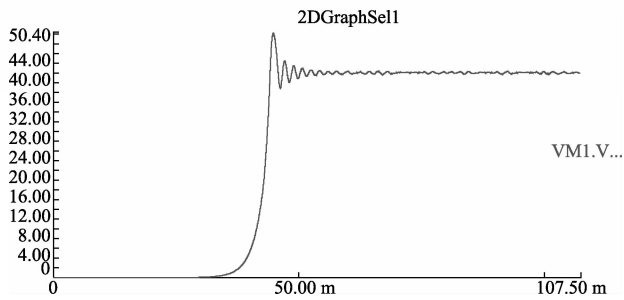


图 7 加 $25 \mu\text{F}$ 电容的电压仿真波形

理论与仿真结果的分析:

根据式(14)可知,当恒功率负载功率小于一定值时,系统将处于稳定状态,现将模型参数代入稳定判据可得: $P < 6.608 \text{ W}$ 。

如仿真图所示,当系统加 5 W 的恒功率负载时,直流电源系统仿真的输出电压可以稳定,当系统加 9 W 的恒功率负载时,直流电源系统仿真的输出电压开始振荡,与稳定判据相符。

根据稳定判据式(15)可知,当电机补偿电容大于某一值的时候,可提高系统稳定性,对于系统加 9 W 恒功率负载时,将上述参数代入公式,可得: $C > 21.056 \mu\text{F}$ 。根据仿真图 6 和图 7 可证明这一理论的正确性。

3.2 试验验证

运用和仿真系统参数相同的试验系统进行验证。

对直流发电机带 5 W 恒功率负载,其电压波形如图 8 所示。

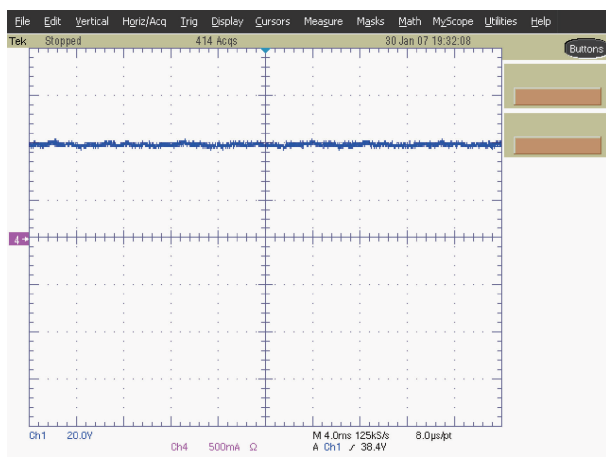


图 8 加 5 W 恒功率负载的电压波形

对直流发电机带 9 W 恒功率负载,其电压波形如图 9 所示。

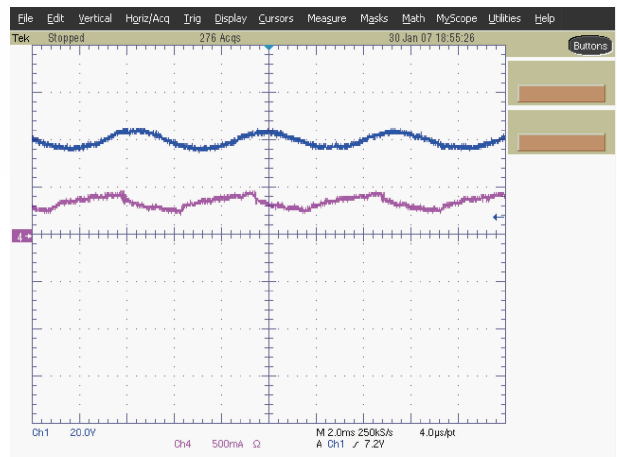


图 9 加 9 W 恒功率负载的电压波形(上面的曲线为电压曲线)

对带有 9 W 恒功率负载发电机前加 $15 \mu\text{F}$ 电容,其电压波形如图 10 所示。

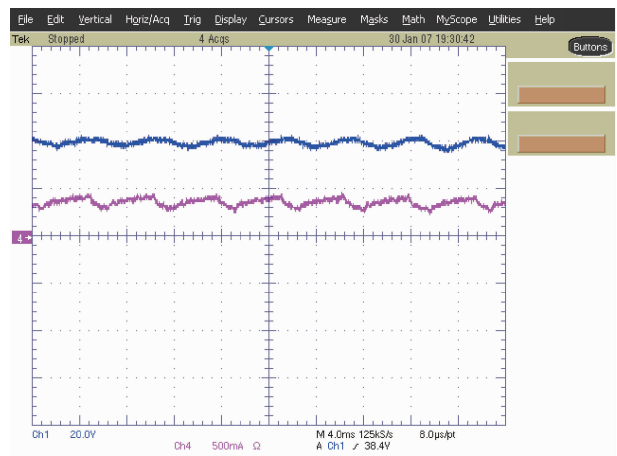


图 10 加 $15 \mu\text{F}$ 电容的电压波形(上面的曲线为电压曲线)

对带有 9 W 恒功率负载发电机前加 $25 \mu\text{F}$ 电容,其电压波形如图 11 所示。

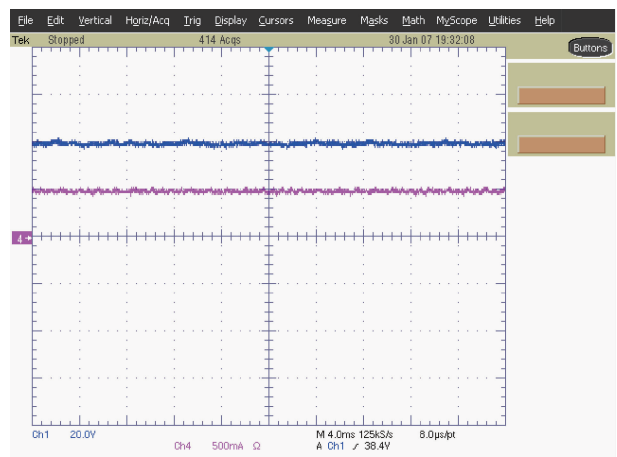


图 11 加 $25 \mu\text{F}$ 电容的电压波形(上面的曲线为电压曲线)

理论与实验结果的分析:

根据式(14)可知,当恒功率负载的功率小于一定值时,系统将处于稳定状态,现已知直流电源系统的参数分别为: $L_f = 120 \text{ mH}$, $L_a = 10 \text{ mH}$, $R_a = 16.8 \Omega$, $R_f = 46.2 \Omega$, $C = 2 \mu\text{F}$, $K = 0.5$, $K_u = 100$, $U_0 = 42 \text{ V}$ 。将这些参数代入稳定判据可知: $P < 7.285 \text{ W}$ 。

由实际电压波形可见,在额定转速 6000 r/min 下,当直流电源系统带 5 W 的恒功率负载时,其输出电压基本保持稳定。此实验电压波形与仿真电压波形图基本一致。当直流电源系统带 9 W 的恒功率负载时,其输出电压就会发生振荡,振荡电压的最大值为 46 V ,最小值为 36 V ,也与仿真波形图基本一致。同时满足稳定性判据。对于系统加 9 W 的恒功率负载时,根据稳定判据式(15)可知,当电容大于某一值的时候,系统将处于稳定,所以将参数代入上述判据,可得: $C > 21.893 \mu\text{F}$ 。由图 10 和图 11 可见,在额定转速 6000 r/min 下,在恒功率负载前并上 $15 \mu\text{F}$ 电容后,直流电源系统输出电压的振荡明显地减弱了,振荡电压的最大值降低到 43 V ,最小值增加到了 38 V 。而在恒功率负载并上 $25 \mu\text{F}$ 电容后,直流电源系统输出电压的振荡消失了,系统达到了稳定,这与仿真电压波形图也是一致的。同时满足稳定判据。

4 结论

将直流电源系统简化为相应的等效电路,通过对恒功率负载进行线性化处理,得到该电源系统的动态结构图,进而得到其传递函数,利用自控理论求得系统带恒功率负载稳定判据。再用计算机仿真软件,对直流电源系统的稳定判据进行验证,最后对实际的直流电源系统进行实验从而验证稳定性判据的正确性。通过理论分析、仿真和实验表明:对于给定带有恒定负载的直流稳压电源系统,当恒功率负载的功率小于一定值以及给恒功率负载并上合适的电容,可以提高电源系统稳定性。针对带有恒功率负载的飞机电源系统,对其电压振荡进行了研究,并且得到了使其电压能够稳定下来的判据,从而可应用于电源系统设计与优化。

参考文献

- [1] EMADI A, KHALIGH A, RIVETTA C H, et al. Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(4):1112-1125.
- [2] 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]. 2005 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 2005:313-320.
- [3] GRIFFO A, WANG J, HOWE D. Large signal stability analysis of DC power system with constant power loads [C]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008:1-6.
- [4] 谢占明, 郭宏, 黄建. 基于阻尼补偿的直流发电机带恒功率负载系统稳定性分析 [J]. 航空学报, 2011, 32(11):2055-2061.
- [5] 张阳, 张军明, 杜韦静. 负载动态下的级联系统大信号稳定性分析 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(10):170-175.
- [6] 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.
- [7] 朱成花, 严仰光. Boost 变换器恒功率负载时动态性能分析 [J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(1):20-24.
- [8] 黄建, 张震. 机载供电系统带恒功率负载稳定性 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(1):214-218.
- [9] SANTI E, LI D, MONTE A, et al. A geometric approach to large signal stability of switching converters under sliding mode control and synergetic control [C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2005: 1389-1395.
- [10] RIVETTA C H, EMADI A, WILLIAMSON G A, et al. Analysis and control of a buck DC-DC converter operating with constant power load in sea and undersea vehicles [J]. IEEE Transaction Industry Applications, 2006, 42(2): 559-572.
- [11] RAHIMI A M, WILLIAMSON G A, EMADI A. Loop cancellation technique: a novel nonlinear feedback to overcome the destabilizing effect of constant power loads [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(2): 650-661.

作者简介

刘晓倩(通讯作者),1990 年出生,硕士研究生。主要研究方向为电机与电器。

E-mail: 1184035009@qq.com

黄建,1953 年出生,研究员。主要研究方向为电机与电器。

全应栓,1969 年出生,高工。主要研究方向为发动机电力电子。