

低压微电网逆变器的自调节下垂系数控制策略^{*}

许吉强, 卢闻州, 吴雷

(江南大学 轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要: 由于传统下垂控制的微电网逆变器在离网状态下输出电压的幅值和频率不稳定, 提出一种改进的自调节下垂系数控制, 且加入电压和频率的误差反馈, 减小了微电网在离网运行状态下负荷突变所引起的输出电压幅值和频率的偏差, 且增强了其动态性能。同时传统的三相逆变器控制基于 dq 旋转坐标系, 其并网功率冲击较大, 而基于 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的控制能有效减小并网时的功率冲击, 提高了系统的稳定性。仿真验证了该控制策略的正确性和有效性。

关键词: 逆变器; 下垂控制; 自调节下垂系数; dq 旋转坐标系; $\alpha\beta$ 静止坐标系; 低压微电网

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)06-0013-06

Control of Self-Adaptive Droop Coefficient for Inverter in Low Voltage Microgrid^{*}

XU Jiqiang, LU Wenzhou, WU Lei

(Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Due to the amplitude and frequency of output voltage of inverter was unstable with conventional droop control in microgrid, an improved adaptive droop control was proposed, which added error feedback of voltage and frequency. So it could reduce the deviation of output voltage amplitude and frequency when loads suddenly changed. At the same time the traditional three-phase inverter control based on the dq rotating coordinate system, the assault of power to grid was very large, but control based on $\alpha\beta$ stationary coordinate system could effectively reduce the assault of power to grid, and it improved the stability of the system. Through the MATLAB simulation, verified the feasibility of the system which used the method proposed.

Key words: inverter; droop control; self-adaptive droop coefficient; dq rotating coordinate system; $\alpha\beta$ stationary coordinate system; low voltage microgrid

0 引言

随着石油和煤炭的日益减少, 分布式发电、微电网及其控制技术正在不断的发展^[1-2]。大多数能源与微电网都是通过逆变器相连接的, 通过对逆变器的控制, 实现微电网的稳定运行。微电网中逆变器的控制方法一般为下垂控制, 故研究下垂控制对微电网的发展有重要的意义。

传统的下垂控制离网状态下, 在负荷变化时

输出电压幅值和频率存在偏差, 因此文献[3]提出了一种离网状态下自调节下垂系数的方法, 根据实际输出的功率动态调节下垂系数的大小, 但动态响应较慢, 且其在负荷变化较大时输出电压幅值和频率的偏差还是较大。文献[4]提出一种基于虚拟同步发电机的微电网离网频率二次调节控制策略, 在负载变化时能稳定输出频率, 但不能稳定输出电压。文献[5]提出一种自适应下垂系数控制, 根据功率延迟一段时间得到自适应下垂

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51407084)

作者简介: 许吉强(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

卢闻州(1983—), 男, 博士研究生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为新能源发电与控制及电力电子与电力传动。

系数,实现频率的无静差和电压的小偏移,但在并网切换时需要通过切换开关来改变控制方式。文献[6]提出一种有限时间控制,对离网逆变器输出电压和频率进行二次调节,但控制方法较复杂,逆变器之间需要通信,且功率在负载变化时冲击较大。文献[7-11]提出一种电压、频率的二次调节,加入了电压、频率的误差反馈,有效减少了离网状态下输出电压的偏差,但是由于其中误差反馈环节——PI控制器的存在,在并网运行时逆变器输出功率与给定的逆变器并网输出功率存在较大误差。

因此,本文提出一种适合低压微电网逆变器并网运行的自调节下垂系数+PI的下垂控制策略。低压微电网应采用有功-电压($P-U$)、无功-频率($Q-f$)下垂控制, $P-U$ 下垂系数用与有功相关的二次函数代替,而 $Q-f$ 下垂系数用与无功相关的一次函数代替,根据实际输出功率动态调节下垂系数,并加入电压、频率的误差反馈,有效减少了微电网在离网运行时逆变器输出电压的偏差,并且减少了并网时逆变器输出功率与给定功率的误差。电压电流双闭环采用基于 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的控制方式,减少了并网时的功率冲击。通过MATLAB仿真验证了该控制策略的可行性和有效性。

1 下垂控制

1.1 传统下垂控制

当系统等效阻抗呈阻性时^[12],可得如图1所示的传统有功-电压和无功-频率的下垂控制策略,下垂控制方程为^[12-14]

$$\begin{cases} U_r = U_n - n(P_o - P_n) \\ \omega_r = \omega_n + m(Q_o - Q_n) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_n 、 Q_n ——逆变器在额定电网电压和频率时所对应的指定有功功率和无功功率;

P_o 、 Q_o ——逆变器的输出有功和无功功率;

U_n 、 ω_n ——电网额定电压幅值和角频率;

U_r 、 ω_r ——逆变器输出电压的参考幅值和角频率;

n 、 m ——下垂系数。

传统下垂控制中的下垂系数在负载变化时其下垂系数是不变的,因而可能会造成输出电压和

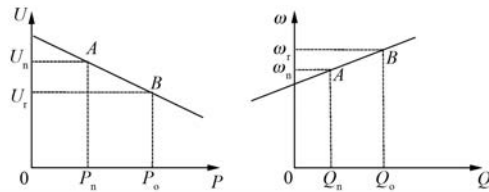


图1 P/Q 下垂特性曲线

频率的过度下垂,使得微电网电压的幅值和频率产生偏差,影响微电网电压的质量和频率稳定性^[3]。GB/T 19939—2005^[15]规定,三相光伏系统和电网接口处的电压允许偏差为额定电压的 $\pm 7\%$;频率允许偏差为 ± 0.5 Hz。随着新技术的不断发展,对电压和频率的要求还将越来越严格^[16]。

1.2 改进下垂控制

因为一般并网指定输出有功功率 P_n 设为一个正数,而 Q_n 一般设为0 var,所以可以画出如图2所示的不同下垂系数时的下垂特性曲线。从图2可以看出, $P-U$ 曲线1、2的斜率分别为 n 、 n_1 ,且 $n > n_1$, $Q-f$ 曲线1、2的斜率分别为 m 、 m_1 ,且 $m > m_1$ 。当输出有功功率为 P_{o1} (或者 P_{o2})时,其曲线2对应的电压值 U'_{r1} (或者 U'_{r2})与额定电压 U_n 的偏差小于曲线1对应的电压值 U_{r1} (或者 U_{r2})与额定电压 U_n 的偏差,曲线 $Q-f$ 也是如此。可知,输出有功功率 P_o 大于或者小于 P_n 时,减小 $P-U$ 曲线的下垂系数 n 能减小输出电压幅值的偏差;输出无功功率 Q_o 大于 Q_n 时,减小 $Q-f$ 曲线的下垂系数 m 能减小频率的偏差。因此提出一种 $P-U$ 下垂系数 n 用与有功相关的二次函数代替,而 $Q-f$ 下垂系数 m 用与无功相关的一次函数代替,根据实际的输出功率动态调节下垂系数。

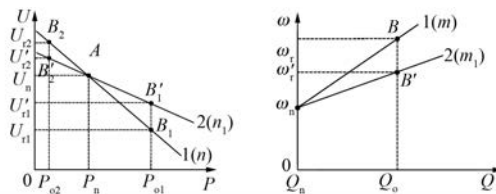


图2 不同下垂系数时的 P/Q 下垂特性曲线

下垂系数 n 与有功功率 P_o 的二次函数可以设为

$$n = -n_2 \cdot (P_o - P_n)^2 + n_1 \quad (2)$$

下垂系数 m 与无功功率 Q_o 的一次函数可设为

$$m = m_1 - m_2 \cdot Q_o \quad (3)$$

由于自调节下垂系数仍然是有差调节,且其动态性能较差,所以在其基础上再对下垂控制方程进行改进,加入电压与频率的误差反馈,进而提高输出电压和频率的稳态、暂态性能^[9-10]。改进后的下垂控制方程可写为

$$\begin{cases} U_r - U_n = \left(k_{pn} + \frac{k_{in}}{s} \right) (U_n - U_r) - n(P_o - P_n) \\ \omega_r - \omega_n = - \left(k_{pm} + \frac{k_{im}}{s} \right) (\omega_r - \omega_n) + m(Q_o - Q_n) + \omega_{sys} \end{cases} \quad (4)$$

式中: n, m ——自调节下垂系数;

$k_{pn}, k_{in}, k_{pm}, k_{im}$ ——PI 控制器参数。

图 3 为改进下垂控制结构图,加入了预同步相位信号 ω_{sys} 。离网时 $\omega_{sys} = 0$,当需要并网时,将 ω_{sys} 接入下垂控制方程中。

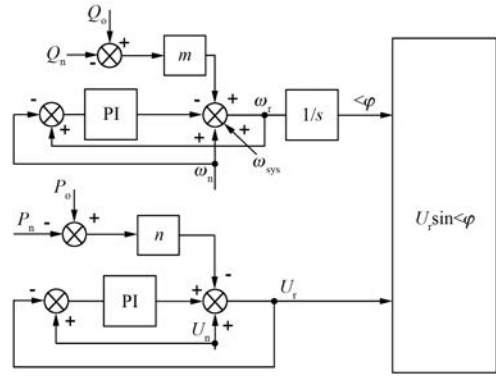


图 3 改进下垂控制结构图

2 仿真

三相逆变器下垂控制框图如图 4 所示,其中采用了加入虚拟阻抗的基于 $\alpha\beta$ 静止坐标系下电压电流双闭环控制^[10,17]。电压外环采用准 PR 控制算法,电压外环控制器传递函数 $G_v(s)$ 为

$$G_v(s) = k_{pv} + \frac{k_r s}{s^2 + 2\omega_r s + \omega^2} \quad (5)$$

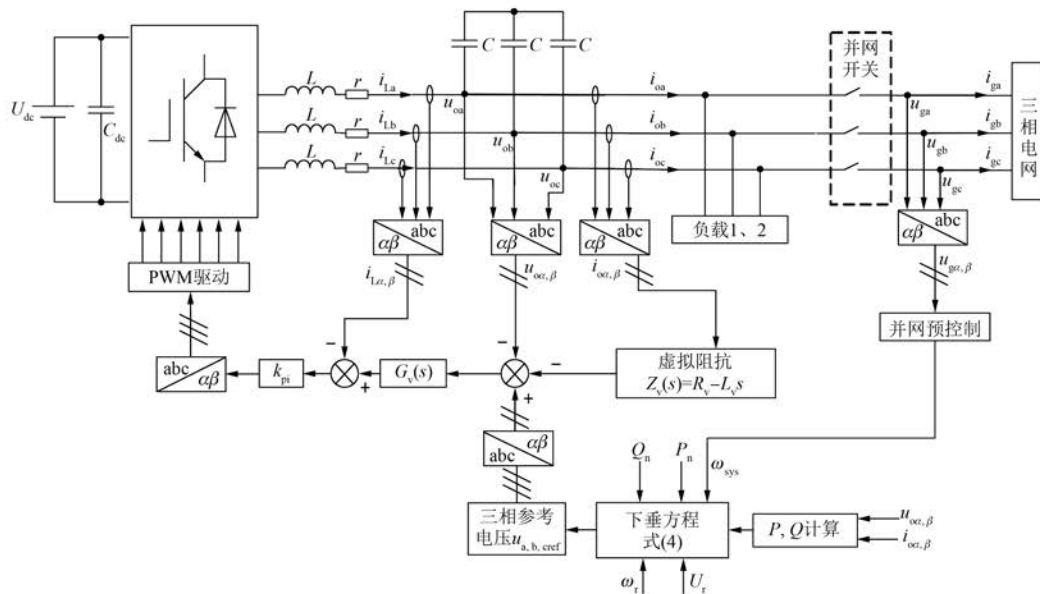


图 4 三相逆变器下垂控制系统框图

利用 MATLAB 仿真软件搭建了三相逆变器并离网仿真模型,分析了其在不同运行状态下的系统性能。系统参数如表 1 所示,系统状态变化时刻和负载变化如表 2 所示。

2.1 离网运行

为了分析本文提出的下垂控制在离网运行状

态下的性能,分别对传统下垂控制、自调节下垂系数控制、自调节下垂系数+PI 下垂控制进行了比较。图 5、图 6 所示分别为其三种不同下垂控制的输出有功-电压、无功-频率波形。图 5 中 $u_{om}(\text{p.u.})$ 为逆变器输出电压幅值标么值,基准值为 311。从图 5 和图 6 可以看出,在负载功率变化

表 1 系统参数表

参数名称	参数值
主电路参数	U_{dc}/V 800
	r_L/Ω 0.02
	L/mH 2
	$C/\mu F$ 1 000
	f_s/Hz 5 000
	U_g 380 V (50 Hz)
下垂控制器参数	n_1 0.35
	m_1 0.02
	n_2 1.367×10^{-9}
	m_2 4×10^{-6}
	U_r/V 311
	P_n/kW 14
	$\omega_r/(rad\cdot s^{-1})$ $100\times\pi$
	$Q_n/kvar$ 0
	k_{pn} 300
	k_{in} 0.05
虚拟阻抗参数	k_{pm} 300
	k_{im} 0.05
	R_v 0.05
虚拟阻抗参数	L_v/mH 0.25
	$\omega_c/(rad\cdot s^{-1})$ 628
双闭环控制参数	k_{pv} 2.5
	k_r 400
	k_{pi} 1 000
	$\omega_r/(rad\cdot s^{-1})$ 3.25
	$\omega/(rad\cdot s^{-1})$ 314

表 2 运行状态时刻和负载变化表

	离网		并网	离网
运行状态	0~0.1 s	0.1~0.25 s	0.45~0.8 s	1.5~2 s
		预并网		
负载 1 (5 kW, 0 var)	接入			
负载 2 (11 kW, 1 kvar)	接入	断开		接入
负载总功率	16 kW, 1 kvar	5 kW, 0 var	16 kW, 1 kvar	

前后,传统下垂控制电压、功率、频率偏差最大,其次是自调节下垂系数控制,而自调节下垂系数+PI控制的电压偏差最小。所以,自调节下垂系数+PI控制可以更好地减小逆变器在离网运行状态下的输出电压和频率的偏差。

2.2 并网运行

为了分析自调节下垂系数+PI下垂控制在并网时的性能,将其与PI下垂控制进行比较。PI下垂控制、自调节下垂系数+PI下垂控制的输出

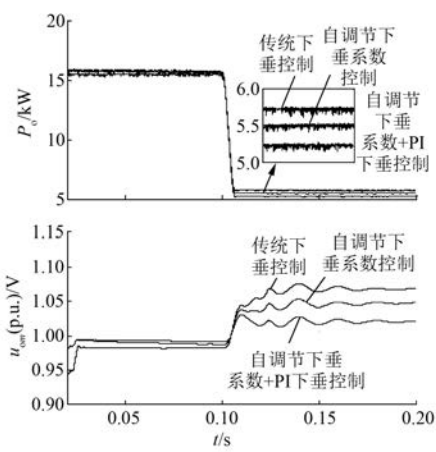


图 5 输出有功-电压波形

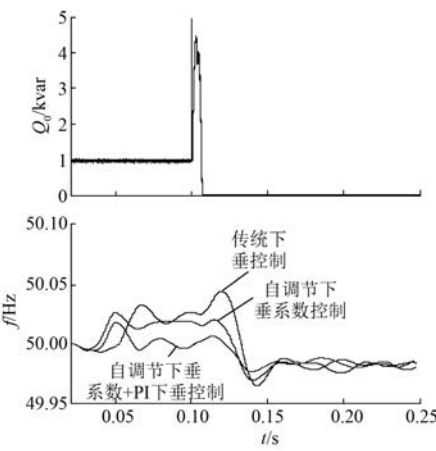


图 6 输出无功-频率波形

有功和无功功率波形图如图 7 所示。PI下垂控制为了减小逆变器离网运行时输出电压的偏差,其PI参数的数值较大,而PI参数的数值越大会导致并网时逆变器输出功率与给定功率之间的偏差越大,如图 7 所示,输出有功(无功)在负载变化前是 12 kW (500 var),变化后为 13 kW (500 var),与给定的输出功率 14 kW、0 var 偏差较大。自调节下垂系数的加入,可以减小PI控制器的压力,离网运行时其输出电压与PI下垂控制输出电压达到同样的精度所需PI控制器的参数值减小,从而改善了并网时输出功率的精度。从图 7 还可以看出,自调节下垂系数+PI下垂控制并网时逆变器输出有功(无功)在负载变化前是 13 kW (0 var),变化后为 13.5 kW (0 var),与给定功率的偏差明显减小。

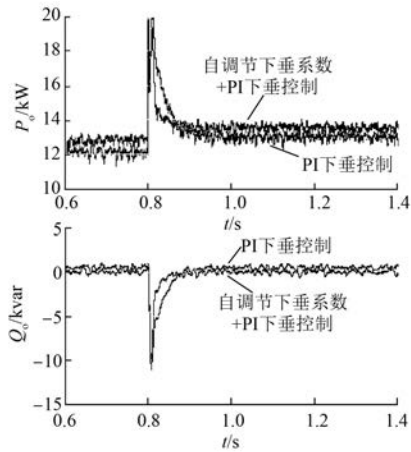


图 7 输出有功、无功波形

2.3 并网相互切换运行

为了分析基于 $\alpha\beta$ 坐标系下的下垂控制的性能, 将其与基于 dq 坐标系下的下垂控制在并网网相互切换运行状态进行比较。

图 8 所示为离网切换到并网时并网电流的波形图。从图 8 可以看出, 在并网瞬间, 基于 $\alpha\beta$ 坐标系下的下垂控制的并网冲击电流小于基于 dq 坐标系下的下垂控制的并网冲击电流。由图 9 可知并网电流的 THD=2.96%, 满足并网要求 (并网电流 THD 低于 5%)。

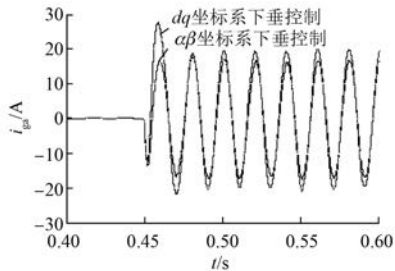


图 8 输出电流波形

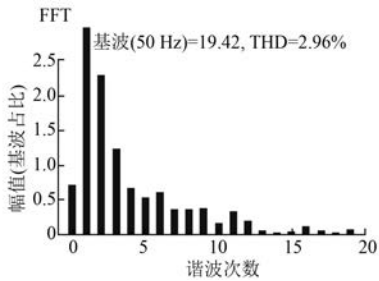


图 9 并网电流 i_{ga} 频谱分析图

有功和无功功率的波形图。从图 10 可知, 在并网瞬间, 基于 $\alpha\beta$ 坐标系下的下垂控制的功率冲击小于基于 dq 坐标系下的下垂控制的功率冲击。

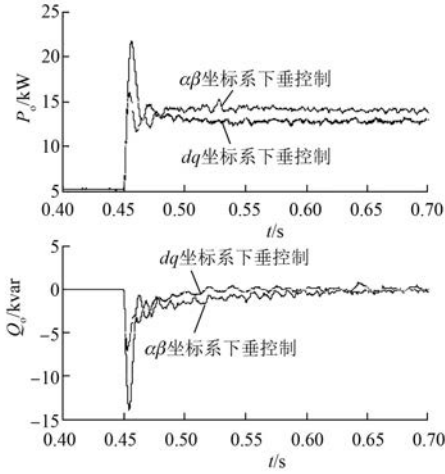


图 10 输出有功-电压波形

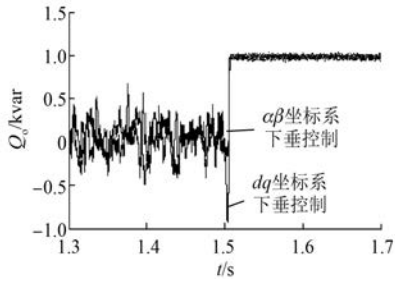


图 11 输出有功-电压波形

图 11 所示为并网切换到离网时逆变器输出无功功率波形图。从图 11 可知, 在离网瞬间, 基于 $\alpha\beta$ 坐标系下的下垂控制的无功功率冲击小于基于 dq 坐标系下的下垂控制的无功功率冲击。

由上述分析可知, 基于 $\alpha\beta$ 坐标系下的下垂控制系统在并网网相互切换时性能更好。

3 结 语

由于传统下垂控制存在缺点, 本文提出了一种自调节下垂系数+PI 的下垂控制策略, 有效减小了逆变器离网运行时输出电压和频率的偏差; 减小了并网运行时逆变器输出功率与给定功率的偏差。通过分析, 得出在并网网相互切换的瞬间, 基于 $\alpha\beta$ 坐标系下的下垂控制的功率冲击要小于基于 dq 坐标系下的下垂控制的功率冲击, 稳定性更好。

图 10 所示为离网切换到并网时逆变器输出

【参考文献】

- [1] HUANG A Q. Renewable energy system research and education at the NSF FREEDM systems center[C]// 2009 IEEE Power and Energy Society General Meeting Calgary, AB, Canada: IEEE PES, 2009: 1-6.
- [2] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 71-75.
- [3] 姚玮, 陈敏, 牟善科, 等. 基于改进下垂法的微电网逆变器并联控制技术[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 77-80.
- [4] 杨向真, 苏建徽, 丁明, 等. 微电网孤岛运行时的频率控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 164-168.
- [5] 郑永伟, 陈民铀, 李闯, 等. 自适应调节下垂系数的微电网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 6-11.
- [6] GUO F H, WEN C Y, MAO J F, et al. Distributed secondary voltage and frequency restoration control of droop-controlled inverter-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(7): 4355-4364.
- [7] GUERRERO J M, VÁSQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—a general approach toward standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [8] 张明锐, 杜志超, 黎娜, 等. 高压微网孤岛运行时频率稳定控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 20-26.
- [9] 孙孝峰, 吕庆秋. 低压微电网逆变器频率电压协调控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 77-84.
- [10] VASQUEZ J C, GUERRERO J M, SAVAGHEBI M, et al. Modeling, analysis, and design of stationary-reference-frame droop-controlled parallel three-phase voltage source inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1271-1280.
- [11] GUERRERO J M, VÁSQUEZ J C, MATAS J, et al. Distributed secondary control for islanded microgrids—a novel approach[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 1018-1031.
- [12] GUERRERO J M, VICUÑA L G D, MATAS J, et al. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(4): 1126-1135.
- [13] 张尧, 马皓, 雷彪, 等. 基于下垂特性控制的无互连线逆变器并联动态性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 42-48.
- [14] 吕志鹏, 罗安. 不同容量微源逆变器并联功率鲁棒控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12): 35-42.
- [15] 光伏系统并网技术要求: GB/T 19939—2005[S].
- [16] 张宗鑫. 关于缩小我国电网频率变动范围的建议[J]. 电网技术, 2000, 24(2): 80-81.
- [17] 陈燕东, 罗安, 龙际根, 等. 阻性逆变器并联环流分析及鲁棒下垂多环控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 18-29.
- 收稿日期: 2016-10-08
-
- (上接第7页)
- [20] 王艳阳, 李以农, 裴金顺, 等. 车用电磁悬架能量转换特性的功率流分析方法[J]. 重庆大学学报, 2013, 5(1): 1-7.
- [21] 杨蔚华. 半主动悬架电动汽车的动力学特性与振动控制研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.
- [22] PRABHU S. Vibration and thermal analysis of switched reluctance hub motor[J]. European Journal of Scientific Research, 2012, 68(1): 12-20.
- [23] ROJAS A E R, NIEDERKOFER H, WILLBERGER J. Comfort and safety enhancement of passenger vehicles with in-wheel motors[J]. Sae Technical Papers, 2010(1): 1146.
- [24] 于增亮, 张立军, 孙北. 轮毂电机驱动电动微型车内噪声道路试验分析[J]. 上海汽车, 2009(8): 8-13.
- [25] 左曙光, 段向雷, 吴旭东. 电动轮刚性环耦合特性模型建模与分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(10): 1578-1585.
- [26] TAN D, WANG Q. Modeling and simulation of the vibration characteristics of the in-wheel driving vehicle based on bond graph[J]. Shock and Vibration, 2016(1): 1-14.
- 收稿日期: 2016-08-22