

基于二阶广义积分器的单相并网系统锁相技术的研究

侯立健¹, 朱长青¹, 陈雅², 严雪飞¹

(1. 军械工程学院, 石家庄 050003; 2. 天津大学, 天津 300073)

摘要: 由于电网电压通常受到扰动和谐波的影响, 因此在并网变换器的同步应用中, 并网电流和电网存在相位差, 会对电网产生冲击和污染。实践经验表明基于某种正交信号发生器(QSG) 的锁相环(PLL) 具有更好的性能。文章采用基于二阶广义积分器(SOGI) 的正交信号发生器, 并加以改进, 在无需使用三角函数的情况下, 设计一个简单的控制环将 SOGI 谐振器中心频率自适应调节为输入频率, 并去除 PLL 模块, 构造了新型的锁频环(FLL) 结构。仿真结果表明, 该方法不仅易于设计和实现, 同时其性能优异, 频率和相角的检测速度较快, 且不含有稳态振荡, 验证了方案的可行性和优越性。

关键词: 并网变换器; 二阶广义积分器; 锁频环

中图分类号: TM464

文献标识码: B

文章编号: 1001-1390(2016)13-0084-06

Research on SOGI for phase lock technique of the single-phase grid-connected system

Hou Lijian¹, Zhu Changqing¹, Chen Ya², Yan Xuefei¹

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China. 2. Tianjin University, Tianjin 300073, China)

Abstract: For the grid voltage is usually affected by disturbance and harmonic, so in the synchronous application of grid-connected converter, there is a phase difference between grid-connected current and grid voltage, which will have impact and pollution to the power grid. The practical experience shows that some phase locked loop(PLL) based quadrature signal generator(QSG) has better performance. This paper adopts the second-order general integrator(SOGI) that is improved, and frequency of SOGI automatically tracks the input frequency through a simple control loop instead of trigonometric function. Finally, this scheme constructs new-style structure of the frequency locked loop with PLL module. This scheme is easy to design and implement, simulation results show its excellent performance, and the frequency and angle can be detected rapidly and do not contain a steady oscillation, the feasibility and the superiority of the scheme are verified.

Keywords: grid-connected converter, second-order general integrator, frequency locked loop

0 引言

锁相环是并网系统的关键技术之一, 通过对电网特性的检测, 从而将控制器的内部振荡器调谐至电网的振荡信号, 保障并网系统的稳定运行^[1-2]。对于单相并网系统, 最常用的锁相方法是电网电压过零检测法, 虽然简单实用, 但缺点明显, 使用了判断电网电压极性变化的比较器, 电网电压很容易受到谐波、开关凹陷、噪声影响产生畸变, 尤其是弱电网, 该方法精度差, 在电网电压畸变时会检测到多个过零点^[3-4]。

实践经验表明: 基于某种正交信号发生器(QSG) 的锁相环具有更好的性能, 其原理是对 dq 坐

标下的分量进行控制^[5-7]。本文采用二阶广义积分器(SOGI) 来实现正交信号发生器(QSG), 并根据 SOGI 内部谐振的特点使其本身作为一个压控振荡器来工作, 通过设计一个控制环将 SOGI 中心频率自适应调节为输入频率, 并能去除 PLL 模块, 构成新颖的锁频环(SOGI-FLL) 结构, 提高系统可靠性, 降低工程应用的成本, 并克服了常规 PLL 检测频率和误差时含有稳态振荡的缺点。

1 基于 QSG 的 PLL

1.1 工作原理

单相并网系统基于 QSG 的 PLL 结构如图 1 所

示,可以看出,其主要包含三部分:鉴相器(PD)、环路滤波器(LF)、频率/相角发生器(FPG)。其中鉴相器由正交信号发生器和 Park 变换器组成。

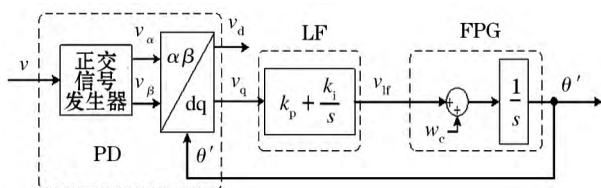


图 1 单相并网系统基于 QSG 的 PLL 结构

Fig. 1 PLL structure based on QSG of single-phase grid-connected system

正交信号发生器在此处的作用是从输入信号 $v = v \sin \theta$ 中提取一组正交信号 v_α 和 v_β , 可用下列形式表示:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} \sin \theta \\ -\cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

正交信号 v_α 和 v_β 输入至 Park 变换器, 变换成 dq 坐标系的分量 v_d 和 v_q , 对应的变换矩阵为:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta' & \sin \theta' \\ -\sin \theta' & \cos \theta' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)中, 可得:

$$v_{dq} = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} \sin(\theta - \theta') \\ -\cos(\theta - \theta') \end{bmatrix} \quad (3)$$

由上式可以看出, 当 PLL 调谐至输入频率, 即 $w = w'$ 时 PD 输出中不包含稳态振荡, 大大提高检测精度。

在 PLL 中使用 QSG 除了可以去除稳态振荡, 还有一个好处就是可以用矢量的方式解释单相系统问题^[8-9]。其中, QSG 输出的正交信号 v_α 和 v_β 可由一个虚拟输入矢量 \vec{v} 在 $\alpha\beta$ 坐标系中的投影表示, 其在 α 轴的投影 v_α 即可理解为输入信号 $v = V \sin \theta$ 。此外, Park 变换的输出可以用 \vec{v} 在 dq 同步旋转坐标系的投影给出, 矢量关系如图 2 所示。

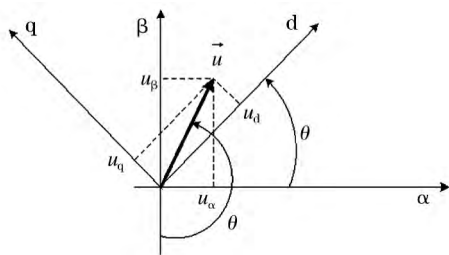


图 2 矢量关系图

Fig. 2 Relation schema of vectors

图 4 ~ 图 5 中, 当锁相成功, 即 $w = w'$ 时 \vec{v} 和 dq 坐标系具有相同的旋转速度, PLL 进入稳定状态。在系统中, 如果是 Park 变换的输出 v_q 与环路滤波器相连, 则此时 q 轴上电流矢量负责向电网输入无功功率, d 轴上的电流矢量负责向电网输入有功功率。

1.2 二阶广义积分器

本文采用二阶广义积分器(SOGI)产生正交信号^[10-11], 其结构如图 3 所示。

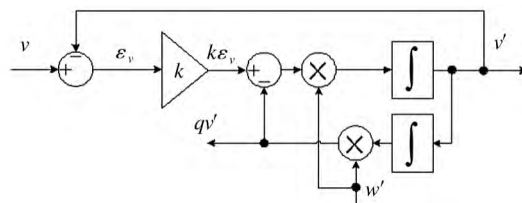


图 3 基于 SOGI 的 QSG 结构图

Fig. 3 Structure block diagram of QSG based on SOGI

为研究 SOGI-QSG 的性能, 做出其特征传递函数:

$$SOGI(s) = \frac{v'}{v}(s) = \frac{w's}{s^2 + w'^2} \quad (4)$$

$$D(s) = \frac{v'}{v}(s) = \frac{kw's}{s^2 + kw's + w'^2} \quad (5)$$

$$Q(s) = \frac{qv'}{v}(s) = \frac{kw^2}{s^2 + kw's + w'^2} \quad (6)$$

这些传递函数表明, 基于 SOGI 的二阶自适应滤波器带宽仅取决于增益 k , 不受中心频率 w' 的影响, 从而更适应于变频的情况。同时, 由式(5)可知, SOGI 具有带通滤波器特性, 即使输入信号发生畸变, 仍能在 w' 处提取一个特定的分量。当 w' 和 w 一致时, 正交信号 v' 和 qv' 相位相差 90° , 幅值与输入信号 v 一致, 因而基于 SOGI 的滤波结构可作为 PLL 中的正交信号发生器。下面以 $D(s)$ 为例, 当参数 k 取不同值时, 做出其单位阶跃响应如图 4 所示。

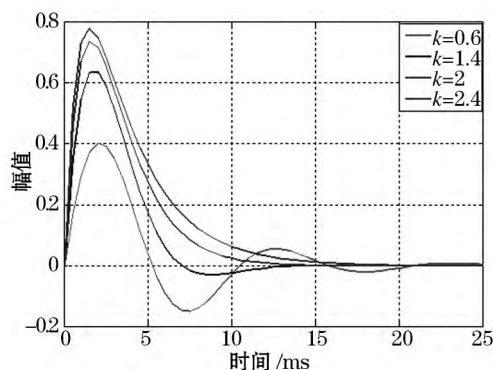


图 4 k 取不同值 $D(s)$ 的单位阶跃响应曲线

Fig. 4 Unit step response curve of $D(s)$ of k for different values

从图 4 可以看出,当 $k=1.4$ 时,整定时间和超调时间的关系相对和谐。经过进一步验证,可选取 $k=\sqrt{2}$,即 $\zeta=0.707$,此时二阶系统的动态性能最优,得到正交信号波形如图 5 所示,整定时间仅为 20 ms。

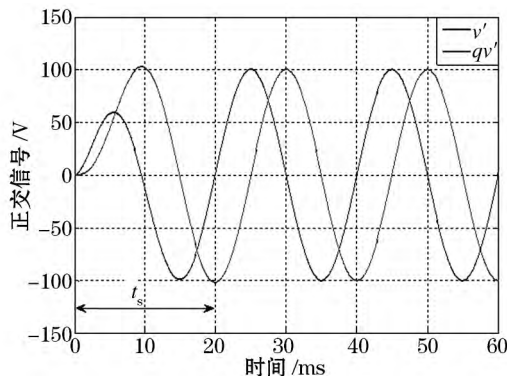


图 5 SOGI-QSG 产生的正交信号

$$(w = w' = 100\pi \text{ rad/s})$$

Fig. 5 Orthogonal signal generated by SOGI

$$(w = w' = 100\pi \text{ rad/s})$$

2 二阶广义积分器锁频环

在基于 SOGI-QSG 的常规 PLL 中,图 3 中的 w' 需由相角/频率发生器(FPG)提供,此外 FPG 还要为 Park 变换器提供相角,构成了系统的双重反馈环。

利用 SOGI 来实现正交信号发生器(QSR),可以改善常规 PLL 的相角检测性能。然而通过式(4),我们可知 SOGI 具有谐振的特点,这使其本身可代替压控振荡器来工作,所以可通过设计一个控制环使得 SOGI 谐振器中心频率自适应调节为输入频率,从而将 SOGI-PLL 中 PLL 模块去除。

首先分析误差信号,从输入信号 v 到误差信号 ε_v 的传递函数为:

$$E(s) = \frac{\varepsilon_v(s)}{v(s)} = \frac{s^2 + w^2}{s^2 + kw's + w^2} \quad (7)$$

式(7)为典型的二阶陷波器,其在频率中心频率处的增益为零,且当输入信号的频率 w 由比 SOGI-QSR 中心频率 w' 低变为比其高时,输出信号相角会产生一个 180° 的跳变。而式(6)为低通滤波器,图 6 给出了 $E(s)$ 和 $Q(s)$ 的伯德图,可利用二者相位变化的特点研究 ε_v 和 qv 的关系。

在图 6 中可以看出,当 $w < w'$ 时, ε_v 和 qv 同相;当 $w > w'$ 时, ε_v 和 qv 反相。因此,可以定义一个频率误差变量 ε_w 为 ε_v 和 qv 的乘积。当 $w < w'$ 时, ε_w 平均值大于零;当 $w > w'$ 时, ε_w 平均值小于零。利用 ε_w

可设计出一个简单的锁频环(FLL)与 SOGI-QSR 结合,构成新颖的锁频环结构 SOGI-FLL,如图 7 所示。

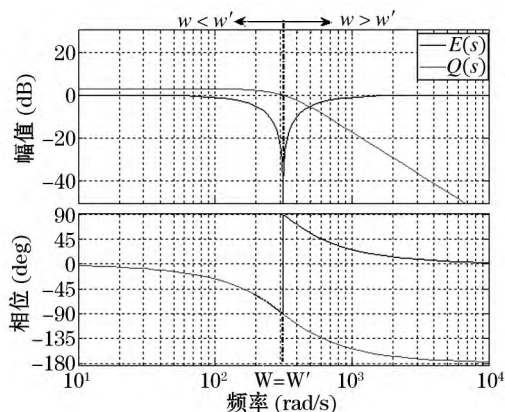


图 6 $E(s)$ 和 $Q(s)$ 的伯德图

Fig. 6 Bode diagram of $E(s)$ and $Q(s)$

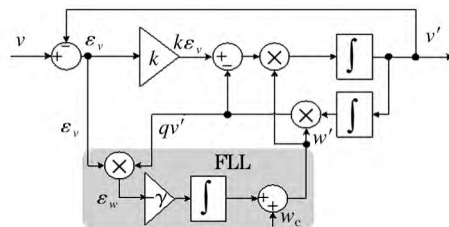


图 7 SOGI-FLL 结构图

Fig. 7 Structure block diagram of SOGI-FLL

图 7 的 FLL 利用一个带有负增益的积分控制器将中心频率 w' 与输入频率 w 一致,此时 ε_w 的直流分量等于零。此外,为缩短频率同步所需时间,电网额定频率额定值 w_c 作为前馈变量添加到 FLL 中。在 SOGI-FLL 中输入电压信号的频率可以直接检测,其幅值和相角可通过下式间接计算得出:

$$|v'| = \sqrt{(v')^2 + (qv')^2}; \angle v' = \arctan \frac{qv'}{v'} \quad (8)$$

3 系统仿真

为了验证方案的可行性及其性能,在 Matlab/Simulink 环境下搭建了仿真模型。首先验证系统的动态性能,设置输入信号为 $v = 100\sin(100\pi t)$,在 500 ms 时同时发生频率和相角跳变,其中频率由 50 Hz 跳变为 45 Hz,相角突加 0.25π rad,模型中 $k=\sqrt{2}$, $\gamma=2.3$ 。仿真结果如图 8~图 11 所示。

图 8 和图 9 分别是 SOGI-FLL 产生的正交信号和检测到的幅值,可以看出正交信号和输入信号幅值一致。当输入信号发生跳变时,正交信号的相位和幅值略有波动,由于幅值信号由正交信号计算得出,

所以检测到的幅值也跟随波动,但很快恢复稳定。

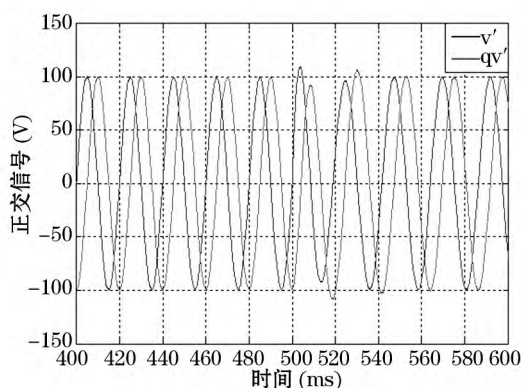


图 8 SOGI-QSR 产生的正交信号

Fig. 8 Orthogonal signal generated by SOGI-QSR

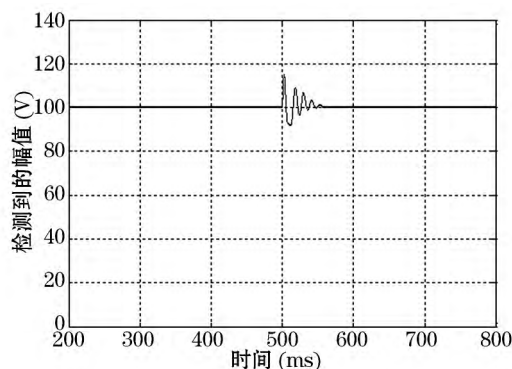


图 9 检测到输入信号幅值

Fig. 9 Amplitude of the detected input signal

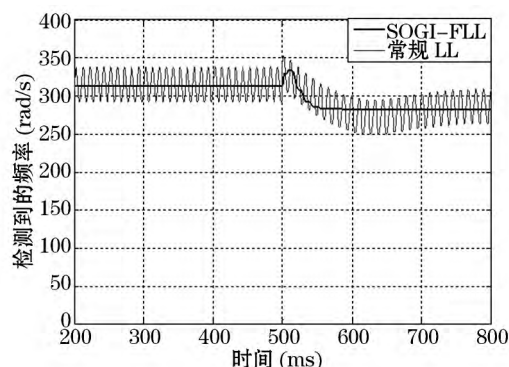


图 10 检测到的输入信号频率

Fig. 10 Frequency of the detected input signal

图 10 和图 11 是 SOGI-FLL 和常规 PLL 检测到的频率和相角检测误差。通过对比可以看出, SOGI-PLL 具有更好的动态性能,且不含稳态振荡,优势明显。

由于电网经常受到扰动和谐波的影响,为了观察电网受到污染时 SOGI-FLL 的检测性能,以电网电

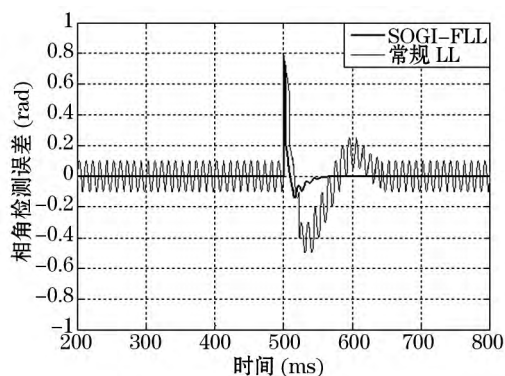


图 11 相角检测误差

Fig. 11 Error detected of angle

压中含有 3 次谐波和 5 次谐波为例,设置 $v = 100\sin(100\pi t) + 15\sin(300\pi t) + 4\sin(500\pi t)$,为了减低带宽,取 $k = 0.5$,其他参数不变,仿真波形如图 12 ~ 图 15 所示,其中检测到的相角信号为实际值乘以 10。

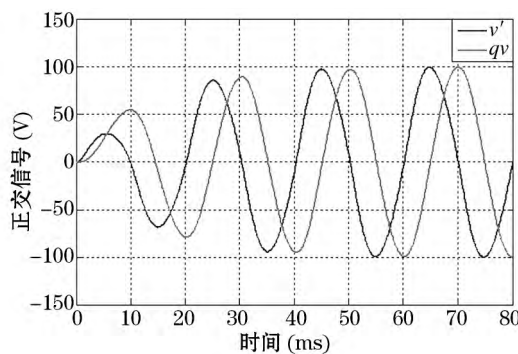


图 12 相角检测误差

Fig. 12 Error detected of angle

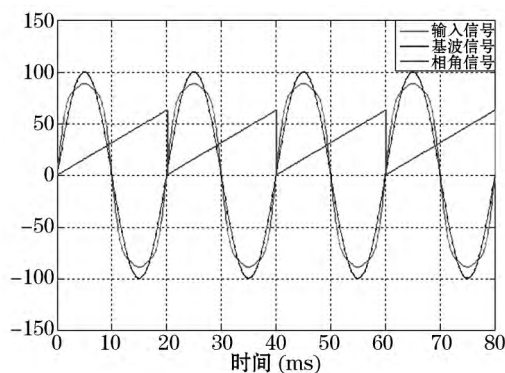


图 13 检测到的输入信号相位

Fig. 13 Phase of the detected input signal

从图 12 可以看出,即使输入信号发生畸变, SOGI 仍能够提取出一组纯净的正交信号,为间接计算出幅值和相位奠定了基础,但是由于 k 值的改变,整定时间相对于图 5 有所增加。在图 13 中,系统检测到的相位信号稳态时始终保持对基波信号的跟踪,

可以说基本上没有受到谐波的影响。

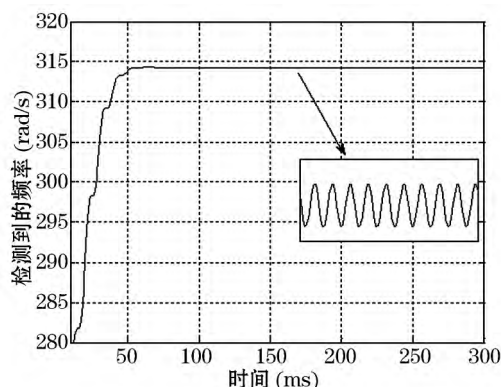


图14 检测到的输入信号频率

Fig.14 Frequency of the detected input signal

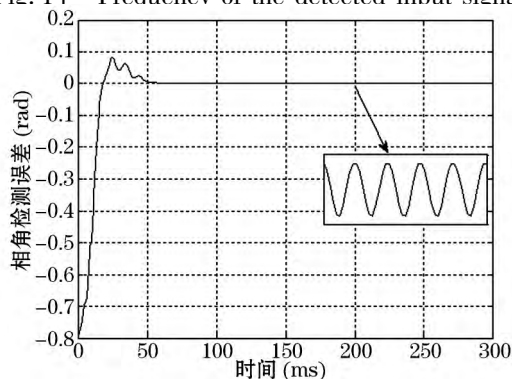


图15 相角检测误差

Fig.15 Error detected of angle

图14和图15分别为输入信号含谐波时检测到的频率和相角检测误差,均历经约50 ms趋于稳定。放大稳定后的波形,可以看出二者都存在稳态振荡,这是系统带宽的原因,幅值约为千分之一,完全可以忽略。

4 结束语

二阶广义积分器锁频环(SOGI-FLL)利用误差信号与正交信号的相位关系,通过控制环实现了频率的自适应调节,去除了PLL结构,使算法和结构更为简单,提高了系统可靠性。仿真结果表明SOGI-FLL可以快速跟踪输入信号频率和相位的变化,且不含稳态振荡,即使输入信号发生畸变,也能保持良好的检测性能,验证了该电网同步方案的可行性和优越性。

参考文献

[1] 王鹿军,张冲,吕征宇. 电网谐波背景下单相并网逆变器的锁相方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(14): 107-112.
Wang Lujun, Zhang Chong, Lv Zhengyu. Phase-locked Loop for Single Phase Grid-connected Inverters in a Harmonic Distorted Grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 107-112.

[2] 赵上林,吴在军,胡敏强,等. 关于分布式发电保护与微网保护的思考[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 73-77.
Zhao Shanglin, Wu Zaijun, Hu Minqiang. Thought about Protection of Distributed Generation and Microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 73-77.

[3] 袁江伟,吕征宇. 一种新型的单相并网系统锁相环[J]. 电力电子技术, 2011, 45(7): 81-82.
Yuan Jiangwei, Lv Zhengyu. Research on a Novel Single Phase PLL Strategy [J]. Power Electronics, 2011, 45(7): 81-82.

[4] 王福昌,鲁昆生. 锁相技术[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997.

[5] 陈顺,黄守道,王德强,等. 基于改进瞬时无功理论的单相锁相环[J]. 电力电子技术, 2009, 43(10): 89-90.
Chen Shun, Huang Shoudao, Wang Deqiang. Single-Phase-Locked Loop Based on Modified Instantaneous Reactive Power Theory [J]. Power Electronics, 2009, 43(10): 89-90.

[6] 杨根,胡国文. 基于内模控制的单相锁相环研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(8): 98-102.
Yang Gen, Hu Guowen. Research on Single-Phase Phase-Locked Loop Based on Internal Model Control [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(8): 98-102.

[7] 罗劲松,王金梅,张小娥. 基于dq锁相环的改进型光伏电站并网点电压跌落检测方法研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(5): 51-55.
Luo Jinshong, Wang Jinmei, Zhang Xiaoe. Research on improved Grid-Connected Point Voltage Sag Detection Method of Photovoltaic Power Station Based on dq-PLL [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(5): 51-55.

[8] 吴铁刚,范猛. 自适应滤波器参数选择和仿真结果[J]. 吉林工业大学学报: 自然科学版, 2001, 22(2): 61-64.
Wu Yigang, Fan Meng. The Selection of the Parameters of Self-Adaptive Filters and the Results of Computer Emulation [J]. Journal of Jilin Institute of Technology, 2001, 22(2): 61-64.

[9] 孙钦斐,杨仁刚,周献飞,等. 基于数字锁相环的储能逆变器并网功率控制方法[J]. 农业工程学报, 2013: 138-142.
Sun Qinfei, Yang Rengang, Zhou Xianfei. Control of grid-connected power for energy storage inverters based on digital phase-locked loop [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013: 138-142.

[10] Yuan, X., Merk, W., Stemmler, H. and Allmeling, J.. Stationary Frame Generalized Integrators for Current Control of Active Power Filters with Zero Steady-State Error for Current Harmonics of Concern under Unbalanced and Distorted Operating Conditions [C]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 38(2), March/April 2002, 523-532.

[11] 王冲,於锋,陈荣. 基于广义积分器的电力单相锁相环研究[J]. 高压电器, 2011, 47(4): 13-16.
Wang Chong, Yu Feng, Chen Rong. Study on Control Strategy for Single-phase Power Phase-locked Loop with Generalized Integrator [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4): 13-16.

作者简介:



侯立健(1991—)男,辽宁大石桥人,硕士研究生,
从事装备电力系统理论与技术研究。

Email: houlijian1205@163.com

朱长青(1963—)男,河北石家庄人,教授,博士生导师,从事装备电力系统理论与技术研究。

陈雅(1990—)女,河北衡水人,硕士研究生,从事模型预测控制方面研究。

严雪飞(1990—)男,河北石家庄人,硕士研究生,从事装备电力系统理论与技术研究。

收稿日期:2015-03-25;修回日期:2015-09-22

(田春雨 编发)

(上接第 48 页)

参数变化时响应速度更快,控制精度高,鲁棒性好。

参考文献

- [1] 张宏鹏,陈明,谢拴勤. 军用飞机电气系统控制与管理技术概述[J]. 计测技术,2006,(3): 1-4.
Zhang Hongpeng, Chen Ming, Xie Shuanqin. The Summarization of Control and Management Technology of Military Avion's Electrical System[J]. Metrology & Measurement Technology, 2006, (3): 1-4.
- [2] 张兴国,林辉,杨轲. 变速恒频双馈发电独立电源的励磁控制策略[J]. 电气传动,2008,(1): 3-6.
Zhang Xingguo, Lin Hui, Yang Ke. Excitation Control Strategy of Stand-alone Variable-speed Constant frequency Doubly-fed Generator[J]. Electric Drive, 2008, (1): 3-6.
- [3] Gonzalo Abad, Jesus Lopez, Miguel A. Rodrlguez, et al. 双馈感应电机在风力发电中的建模与控制[M]. 北京:机械工业出版社,2014: 427-443.
- [4] 陈滨. 双馈风力发电系统高阶滑模控制策略的研究[D]. 哈尔滨工业大学,2013.
- [5] 赵仁德,贺益康,刘其辉. 提高 PWM 整流器抗负载扰动性能研究[J]. 电工技术学报,2004,(8): 67-72.
Zhao Rende, He Yikang, Liu Qihui. Research on Improvement of Anti-Disturbance Performance for Three-Phase PWM Rectifiers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, (8): 67-72.
- [6] T. Mesbahi, T. Ghennam, E. M. Berkouk. A Doubly Fed Induction Generator for wind stand-alone power applications(Simulation and experimental validation) [C]. //Electrical Machines (ICEM), 2012: 2028-2033.
- [7] 郑雪梅,徐殿国,王卫,李巍. 电网故障下双馈风力发电机网侧变换器的高阶滑模控制[J]. 控制理论与应用,2011,(7): 999-1004.
Zheng Xuemei, Xu Dianguo, Wang Wei, Li Wei. Higher-order sliding mode control for grid side converter in double-fed induction generator under grid failure[J]. Control Theory & Applications, 2011, (7): 999-1004.
- [8] Nattapol Sa-ngawong, Issarachai Ngamroo. Optimal Fuzzy Logic-based Adaptive Controller equipped with DFIG Wind Turbine for Frequency Control in Stand Alone Power System[C]//Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), 2013: 1-6.

[9] Siew-Chong Tan, Yuk-Ming Lai, Chi Kong Tse. 电力电子变换器的滑模控制技术与实现[M]. 北京:电子工业出版社,2012: 1-12.

[10] 胡家兵,贺益康,王宏胜. 不平衡电网电压下双馈感应发电机网侧和转子侧变换器的协同控制[J]. 中国电机工程学报,2010,(9): 97-104.

Hu Jiabing, He Yikang, Wang Hongsheng. Coordinated Control of Grid and Rotor-side Converters of Doubly-fed Induction Generator Under Unbalanced Network Voltage Conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, (9): 97-104.

[11] 姜一达. 基于滑模控制的双馈风力发电机的励磁控制系统的研究[D]. 兰州理工大学,2010: 38-44.

[12] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2012: 50-51.

作者简介:



梁青阳(1959—)男,汉族,辽宁沈阳人,教授,硕士研究生导师,研究方向:电力电子技术。



宫剑(1990—)男,汉族,吉林珲春人,硕士,研究方向:电力电子技术。

Email: gongjian0811@outlook.com



朱兵(1991—)男,汉族,安徽宿县人,硕士,研究方向:电力电子技术。

收稿日期:2015-03-26;修回日期:2015-10-07

(田春雨 编发)