

柔直换流器单滑模观测器电网电压观测方法

郝良收¹, 夏克鹏^{2,3}, 陈小平¹, 江海¹, 朱启¹, 王迪^{2,3}

(1. 中国南方电网 超高压输电公司天生桥局, 贵州 兴义 562400;

2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000;

3. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 常规柔直换流器电网电压观测方法需要设计多个观测器, 使用多个滤波器, 且受直流偏置的影响。为此, 提出了一种基于单滑模观测器和单三阶广义积分器的柔直换流器电网电压观测方法。首先介绍了基于滑模观测器的电网电压观测方法。然后通过充分利用二阶广义积分器的优点, 提出了一种基于单滑模观测器和单二阶广义积分器的电网电压观测方法。为了实现直流偏置抑制, 进一步分析了三阶广义积分器的输入输出关系, 并最终提出了一种基于单滑模观测器和单三阶广义积分器的电网电压观测方法。所提方法仅需使用1个滑模观测器和1个三阶广义积分器即可实现电网电压观测, 并消除直流偏置的影响。对比仿真和实验研究验证了所提方法的有效性。

关键词: 滑模观测器; 电网电压观测; 二阶广义积分器; 三阶广义积分器; 直流偏置

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed24495

Grid Voltage Observation Method Based on Single Sliding Mode Observer for Flexible DC Power Converters

HAO Liangshou¹, XIA Kepeng^{2,3}, CHEN Xiaoping¹, JIANG Hai¹, ZHU Qi¹, WANG Di^{2,3}

(1. Tianshengqiao Bureau of EHV Transmission Company, China Southern Power Grid Co., Ltd., Xingyi 562400, Guizhou, China; 2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, Henan, China; 3. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, Henan, China)

Abstract: The conventional grid voltage observation methods of flexible DC power converters need to design multiple observers, and use multiple filters, which are also affected by DC-offset. So, a grid voltage observation method of flexible DC power converters based on single sliding mode observer and single third-order generalized integrator was presented. The grid voltage observation method based on sliding mode observer was first introduced. Then, by making full use of the advantages of the second-order generalized integrator, a grid voltage observation method based on single sliding mode observer and single second-order generalized integrator was proposed. To realize DC-offset suppression, the input-output relationship of the third-order generalized integrator was further analyzed, a grid voltage observation method based on single sliding mode observer and single third-order generalized integrator was finally proposed. The proposed method only needs one sliding mode observer and one third-order generalized integrator to observe the grid voltage and eliminate the influences of DC-offset. Comparative simulation and experimental researches verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: sliding mode observer; grid voltage observation; second-order generalized integrator; third-order generalized integrator; DC-offset

随着可再生能源并网发电技术的飞速发展, 如何避免弃风、弃光, 提高可再生能源的消纳能力, 已成为学界和业界广泛关注的焦点^[1-2]。

受我国国情的限制, 光伏、风电等可再生能源资源大都分布于西北地区, 而经济发达地区则

主要位于东南沿海一带。如何实现可再生能源西电东送, 增强可再生能源的消纳能力, 缓解能源危机和缓解污染等问题, 已成为亟待解决的关键问题。在此背景下, 柔性直流输电技术应运而生, 并在近年来得到蓬勃发展^[3-4]。

作者简介: 郝良收(1987—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为高压直流输电设备运行维护, Email: haoliangshou@163.com

通讯作者: 夏克鹏(1985—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力电子技术, Email: 283691206@qq.com

柔直流换流器是柔性直流输电系统中的关键核心装备,主要用于实现高压大功率电能变换与控制。因此,研究提高柔直流换流器的运行稳定性和可靠性的控制方法,对提高柔性直流输电系统的运行稳定性、增强可再生能源的消纳能力具有重要意义和价值^[5-8]。

通常情况下,为了实现柔直流换流器的控制,往往需要同时采样电网电压、电流等信息。然而,一旦电压或电流传感器出现故障,势必降低柔直流换流器的运行可靠性,进而降低柔性直流输电系统的运行可靠性^[9-10]。

为了解决柔直流换流器电网电压传感器故障容错控制问题,文献[11-14]研究了柔直流换流器的无电网电压传感器控制方法。其中,文献[11]研究了基于虚拟磁链的无电网电压传感器控制方法。然而,常规虚拟磁链估计方法需要使用纯积分运算,而纯积分运算受采样直流偏置和积分初始值的影响较大。文献[12]在时域内研究了改进的柔直流换流器虚拟磁链估计方法,消除了直流偏置的影响。文献[13]研究了一种改进的虚拟磁链观测方法,采用低通滤波器代替纯积分运算。然而,该方法需要对虚拟磁链进行相位幅值补偿。为了解决该问题,文献[14]提出了一种基于二阶低通滤波器的虚拟磁链观测方法。通过设计二阶低通滤波器,既可以克服纯积分运算的缺点,也避免了进行相位幅值补偿。

另一方面,文献[15-19]研究了基于电网电压观测的无电压传感器控制方法。其中,文献[15-16]提出了基于二阶广义积分器的电网电压开环观测方法。然而,该方法需要同时使用4个二阶广义积分器,增加了算法计算量。为此,文献[17]提出了一种基于二阶低通滤波器的电网电压开环观测方法。所提方法仅需要使用2个二阶低通滤波器,从而减小了计算复杂度。文献[15-17]所提方法均为开环估计方法,其动态特性较慢。为此,文献[18]提出了一种基于闭环滑模观测器的电网电压观测方法。然而,该方法还需要增加低通滤波器和补偿算法。为了避免使用低通滤波器,文献[19]提出了一种基于改进型二阶滑模观测器的电网电压观测方法。所提方法通过设计非线性滑模面,消除了滑模抖振,避免了使用低通滤波器和补偿算法。然而,该方法仍然需要同时设计2个滑模观测器,以实现电网电压在静止 $\alpha\beta$ 坐标系上两个分量的观测。此外,文献[15-19]

所提电网电压观测方法还受直流偏置的影响,一旦采样的信号中含有直流偏置,将会显著降低电网电压观测精度。

为了简化电网电压观测算法,并克服直流偏置的影响,本文提出了一种基于单滑模观测器和单三阶广义积分器的柔直流换流器电网电压观测方法。所提方法仅需要设计1个滑模观测器、采用1个三阶广义积分器即可实现 α 轴和 β 轴电网电压的观测,并克服直流偏置的影响。与文献[15-19]所提常规方法相比,所提方法既可以降低计算复杂度,又可以实现直流偏置抑制。理论分析、对比仿真和实验研究验证了所提方法的有效性。

1 柔直流换流器的并网数学模型

图1给出了典型的基于模块化多电平变换器的柔直流换流器拓扑。其中, $L_{g1}\sim L_{g6}$ 为6个桥臂电感。

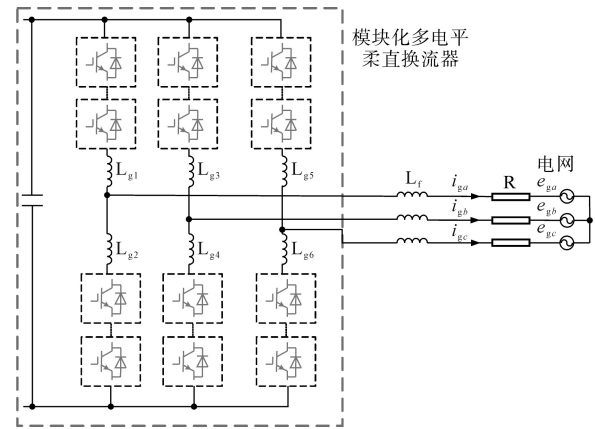


图1 柔直流换流器拓扑

Fig.1 Topology of flexible DC power converter

根据基尔霍夫电压定律和图1,可得柔直流换流器输出电压与电网电压之间的关系为

$$L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_{ga} \\ e_{gb} \\ e_{gc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: L_f 为滤波电感; R 为滤波电阻; u_{ga}, u_{gb}, u_{gc} 分别为柔直流换流器输出的三相电压; i_{ga}, i_{gb}, i_{gc} 分别为三相并网电流; e_{ga}, e_{gb}, e_{gc} 分别为三相电网电压。

将式(1)变换到两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系上可得:

$$L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{g\alpha} \\ i_{g\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{g\alpha} \\ u_{g\beta} \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_{g\alpha} \\ i_{g\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_{g\alpha} \\ e_{g\beta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:下标 α, β 表示电压、电流在两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系中对应的变量。

文献[15-17]根据式(2)设计了基于二阶广义积分器和二阶低通滤波器的电网电压观测方法。文献[18-19]则根据式(2)设计了基于滑模观测器

的电网电压观测方法。为了简化电网电压观测方法,并克服直流偏置的影响,本文根据式(2)提出了一种基于单滑模观测器和单三阶广义积分器的电网电压观测方法。

2 基于滑模观测器的电网电压观测方法设计

2.1 滑模观测器设计方法

由文献[18]可知,根据式(2)可设计二阶滑模观测器以观测电网电压。二阶滑模观测器如下式所示:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_{g\alpha} \\ \hat{i}_{g\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_f} \left(\begin{bmatrix} u_{g\alpha} \\ u_{g\beta} \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} \hat{i}_{g\alpha} \\ \hat{i}_{g\beta} \end{bmatrix} - m \begin{bmatrix} \text{sgn}(\hat{i}_{g\alpha} - i_{g\alpha}) \\ \text{sgn}(\hat{i}_{g\beta} - i_{g\beta}) \end{bmatrix} \right) \quad (3)$$

式中: $\hat{i}_{g\alpha}, \hat{i}_{g\beta}$ 分别为观测的电网电流; m 为滑模增益; $\text{sgn}()$ 为符号函数。

由式(2)和式(3)可知,电流误差状态方程满足下式:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta i_{g\alpha} \\ \Delta i_{g\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_f} \left(\begin{bmatrix} e_{g\alpha} \\ e_{g\beta} \end{bmatrix} - m \begin{bmatrix} \text{sgn}(\Delta i_{g\alpha}) \\ \text{sgn}(\Delta i_{g\beta}) \end{bmatrix} \right) \quad (4)$$

其中

$$\Delta i_{g\alpha} = \hat{i}_{g\alpha} - i_{g\alpha} \quad \Delta i_{g\beta} = \hat{i}_{g\beta} - i_{g\beta}$$

为了保证滑模观测器收敛,需满足:

$$\begin{cases} \Delta i_{g\alpha} \frac{d\Delta i_{g\alpha}}{dt} < 0 \\ \Delta i_{g\beta} \frac{d\Delta i_{g\beta}}{dt} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

考虑到 $i_{g\alpha}$ 和 $i_{g\beta}$ 的对称性,以下以 $i_{g\alpha}$ 为例进行分析。

由式(4)和式(5)可得:

$$[e_{g\alpha} - m \text{sgn}(\Delta i_{g\alpha})] \Delta i_{g\alpha} < 0 \quad (6)$$

当 $\Delta i_{g\alpha} > 0$ 时,由式(6)可得:

$$m > e_{g\alpha} \quad (7)$$

当 $\Delta i_{g\alpha} < 0$ 时,由式(6)可得:

$$m > -e_{g\alpha} \quad (8)$$

由式(7)和式(8),并结合 $i_{g\alpha}$ 和 $i_{g\beta}$ 的对称性可知,为保证滑模观测器收敛, m 需满足:

$$m > \max \{e_{g\alpha}, e_{g\beta}\} \quad (9)$$

当滑模观测器收敛时,电流误差及其微分收敛到零,此时可得电网电压 $e_{g\alpha}$ 和 $e_{g\beta}$ 满足:

$$\begin{bmatrix} e_{g\alpha} \\ e_{g\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m \text{sgn}(\Delta i_{g\alpha}) \\ m \text{sgn}(\Delta i_{g\beta}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

然而,由于当电流收敛时,电流误差将在零

附近波动,因此式(10)中的符号函数将会产生大量高频滑模噪声,这导致无法使用式(10)直接观测电网电压。为解决该问题,文献[18]提出了采用低通滤波器滤除高频滑模噪声的方法,但这会影响电网电压基波的观测。

为了滤除高频滑模噪声,并避免影响基波电网电压,本文提出了采用二阶广义积分器代替低通滤波器的电网电压观测方法。

2.2 基于二阶广义积分器的电网电压观测方法

根据文献[15-16],二阶广义积分器的控制框图如图2所示,其传递函数为

$$G_1(s) = \frac{u_{out1}}{u_{in}} = \frac{k\omega_g s}{s^2 + k\omega_g s + \omega_g^2} \quad (11)$$

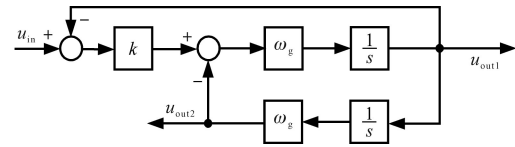


图2 二阶广义积分器框图

Fig.2 Block diagram of the second-order generalized integrator

由式(11)可得:

$$G_1(s = j\omega_g) = 1 \quad (12)$$

这表明二阶广义积分器对频率为 ω_g 的信号不产生任何相位偏移和幅值衰减。同时,二阶广义积分器还可以抑制其他频率的信号,如图3所示。因此,可以利用二阶广义积分器代替低通滤波器观测频率为 ω_g 的电网电压信号,并滤除高频滑模噪声的影响。

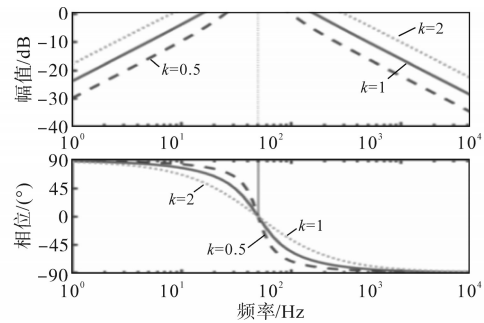


图3 二阶广义积分器波特图

Fig.3 Bode diagram of the second-order generalized integrator

基于滑模观测器和二阶广义积分器的电网电压观测方法控制框图如图4所示。

由上述分析可知,与文献[18]相比,本文所提基于滑模观测器和二阶广义积分器的电网电压观测方法虽然不需要再进行相位幅值补偿,但仍需要设计2个滑模观测器和2个二阶广义积分器以分别观测 $e_{g\alpha}$ 和 $e_{g\beta}$,如图4所示,这会增加算法的计算复杂度。

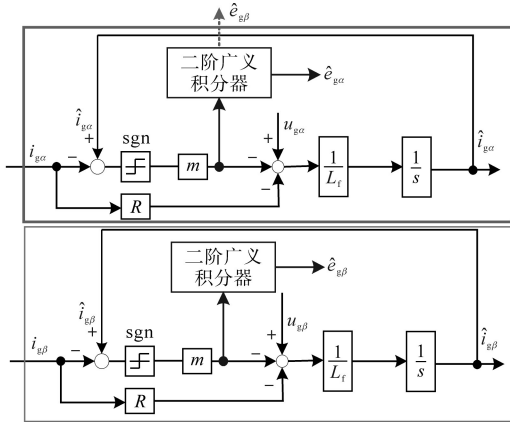


图4 基于滑模观测器和二阶广义积分器的电网电压观测方法控制框图

Fig.4 Control diagram of the grid voltage observation method based on sliding mode observer and second-order generalized integrator

3 基于单滑模观测器的电网电压观测方法设计

为降低电网电压观测算法的计算复杂度,本文进一步提出了一种改进的基于单滑模观测器的电网电压观测方法。

3.1 基于单滑模观测器和单二阶广义积分器的电网电压观测方法

第2.2节提出了一种基于滑模观测器和二阶广义积分器的电网电压观测方法,但该方法未充分利用二阶广义积分器的特点。如文献[15-16]所述,二阶广义积分器还可以输出一个正交信号。因此,还可以结合二阶广义积分器这一特点对第2节所设计的电网电压观测方法进行改进。

由图2可知 u_{out2} 与 u_{in} 的传递函数为

$$G_2(s) = \frac{u_{out2}}{u_{in}} = \frac{k\omega_g^2}{s^2 + k\omega_g s + \omega_g^2} \quad (13)$$

由式(13)可知:

$$G_2(s = j\omega_g) = \frac{1}{j} \quad (14)$$

这表明二阶广义积分器的输出信号 u_{out2} 为输入信号 u_{in} 的正交信号,两者频率和幅值相等,但 u_{out2} 滞后 u_{in} 90° 。又考虑到 u_{in} 和 u_{out1} 相同,因此可知 u_{out2} 滞后 u_{out1} 90° 。

根据该分析可知,若根据图4所示二阶广义积分器模块观测出了电网电压 $\hat{e}_{ga}$,则二阶广义积分器的另一输出信号就是 $\hat{e}_{gb}$ 。因此,当使用滑模观测器和二阶广义积分器观测电网电压时,可充

分利用二阶广义积分器的特点,仅使用1个滑模观测器和1个二阶广义积分器即可同时实现电网电压 $\hat{e}_{ga}$ 和 $\hat{e}_{gb}$ 的观测。这显著降低了电网电压观测算法的计算复杂度。该方法的原理见图4上半部分所示。

然而,当仅使用一个二阶广义积分器时,其输出信号 u_{out2} 受直流偏置影响较大,这是因为 $G_2(s=0)=k$ 。因此,若采样的电压和电流中含有直流偏置,则观测的电网电压 $\hat{e}_{gb}$ 将受直流偏置的影响。为了消除直流偏置的影响,本文进一步设计了一种改进的基于单滑模观测器和单三阶广义积分器的电网电压观测方法。

3.2 基于单滑模观测器和单三阶广义积分器的电网电压观测方法

三阶广义积分器的控制框图如图5所示^[20]。与图2所示二阶广义积分器相比,三阶广义积分器是在二阶广义积分器的基础上增加了一条支路,用于实现直流偏置抑制。

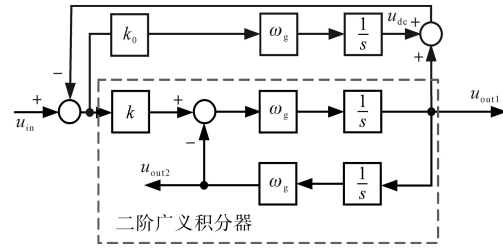


图5 三阶广义积分器框图

Fig.5 Block diagram of the third-order generalized integrator

由图5可知,三阶广义积分器的传递函数满足:

$$G_3(s) = \frac{u_{out1}}{u_{in}} = \frac{k\omega_g s^2}{s^3 + (k_0 + k)\omega_g s^2 + \omega_g^2 s + k_0\omega_g^3} \quad (15)$$

$$G_4(s) = \frac{u_{out2}}{u_{in}} = \frac{k\omega_g^2 s}{s^3 + (k_0 + k)\omega_g s^2 + \omega_g^2 s + k_0\omega_g^3} \quad (16)$$

由式(15)可得:

$$\begin{cases} G_3(s=0) = 0 \\ G_3(s=j\omega_g) = 1 \end{cases} \quad (17)$$

由式(17)可知,三阶广义积分器的输出 u_{out1} 和 u_{in} 相同,且可以实现直流偏置抑制。这与常规二阶广义积分器输出一样。

由式(16)可得:

$$\begin{cases} G_4(s=0) = 0 \\ G_4(s=j\omega_g) = \frac{1}{j} \end{cases} \quad (18)$$

由式(18)可知,三阶广义积分器的输出 u_{out2} 和 u_{in}

正交,这与常规二阶广义积分器输出一样。然而,与常规二阶广义积分器不同的是,三阶广义积分器的输出 u_{out2} 可以消除直流偏置的影响。因此,当采用三阶广义积分器代替二阶广义积分器时,可以实现直流偏置抑制。

综合上述分析,当采用三阶广义积分器代替二阶广义积分器时,可构建基于单滑模观测器和单三阶广义积分器的电网电压观测方法,如图6所示。

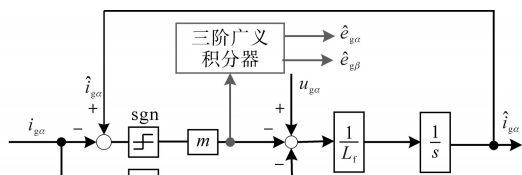


图6 基于单滑模观测器和单三阶广义积分器的电网电压观测方法控制框图

Fig.6 Control diagram of the grid voltage observation method based on single sliding mode observer and single third-order generalized integrator

为了突出本文所提方法的优点,表1对比了本文所提方法与文献[15-19]所提方法的各自优缺点。由表1可见,本文所提方法不仅需要较少的滤波器数量和观测器数量,而且具有直流偏置抑制能力,体现了所提方法的优点。

表1 不同方法的对比

Tab.1 Comparison of different methods

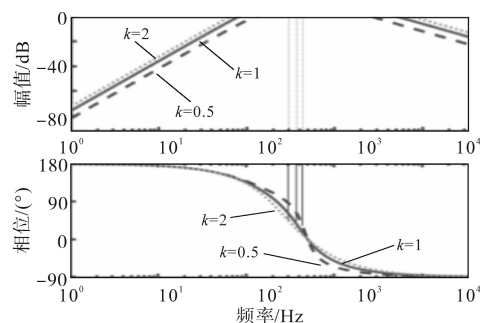
方法	需要的滤波器数量	需要的观测器数量	直流偏置抑制能力
文献[15-16]	4	0	无
文献[17]	2	2	无
文献[18]	2	2	无
文献[19]	0	2	无
所提方法	1	1	有

3.3 三阶广义积分器参数设计

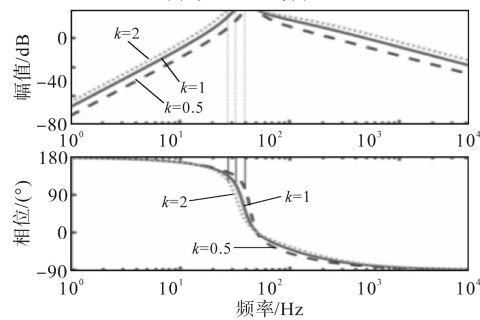
式(10)给出了电流收敛后真实电网电压与滑模函数的关系。为了消除滑模抖振,本文采用三阶广义积分器求取观测的电网电压 $\hat{e}_{ga}$ 和 $\hat{e}_{gb}$ 。因此,由式(10)、式(15)、式(16)和图6可知,观测的电网电压和实际电网电压之间的关系为

$$\begin{cases} \hat{e}_{ga} = G_3(s)e_{ga} \\ \hat{e}_{gb} = G_4(s)e_{gb} \end{cases} \quad (19)$$

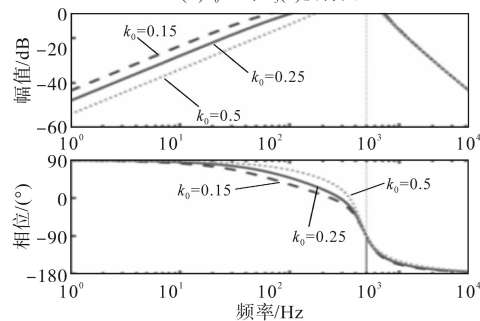
由此可知,传递函数 $G_3(s)$ 和 $G_4(s)$ 中的两个系数 k 和 k_0 决定着电网电压观测的动稳态特性。为此,图7给出了 k 和 k_0 变化时传递函数 $G_3(s)$ 和 $G_4(s)$ 的波特图。



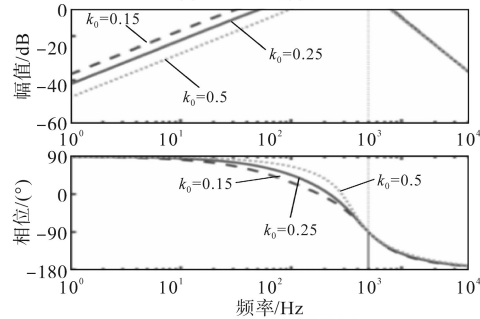
(a) $k_0=0.25$ 时 $G_3(s)$ 波特图



(b) $k_0=1$ 时 $G_3(s)$ 波特图



(c) $k=0.5$ 时 $G_4(s)$ 波特图



(d) $k=1$ 时 $G_4(s)$ 波特图

图7 传递函数 $G_3(s)$ 和 $G_4(s)$ 的波特图

Fig.7 Bode diagram of the transfer function $G_3(s)$ and $G_4(s)$

由图7a和图7b可见,当 k_0 不变时,增大 k 有助于提高传递函数 $G_3(s)$ 的带宽,从而提高电网电压 e_{ga} 观测的动态特性,但 k 增大时,滑模噪声会被放大。因此, k 需要折中选择。此外,对比图7a和图7b可见, k_0 对 $G_3(s)$ 波特图的影响较小。

由图7c和图7d可见,当 k 不变时, k_0 变化对传递函数 $G_4(s)$ 的高频特性几乎没有影响,但 k_0 增大时, $G_4(s)$ 的低频增益有所减小,表明其直流偏置信号的衰减能力增强。然而, k_0 过大时, $G_4(s)$

抑制直流偏置的动态特性会有所减慢。因此, k_0 也需要折中选择。综合上述分析,本文选择 $k=1$, $k_0=0.25$ 。

4 仿真和实验验证

4.1 仿真验证

图6给出了本文所提基于单滑模观测器和单三阶广义积分器的电网电压观测方法的控制框

图。该方法不仅可以降低计算复杂度,而且可以实现直流偏置抑制。

为了验证该方法的有效性,本节建立了仿真模型,并进行了对比仿真研究。仿真时,滤波电感为 10 mH,滤波电阻为 1 Ω ,电网相电压峰值为 90 V,电网频率为 50 Hz。首先,为了验证参数 k 和 k_0 对电网电压观测的影响,进行了对比仿真研究。仿真结果如图8、图9所示。

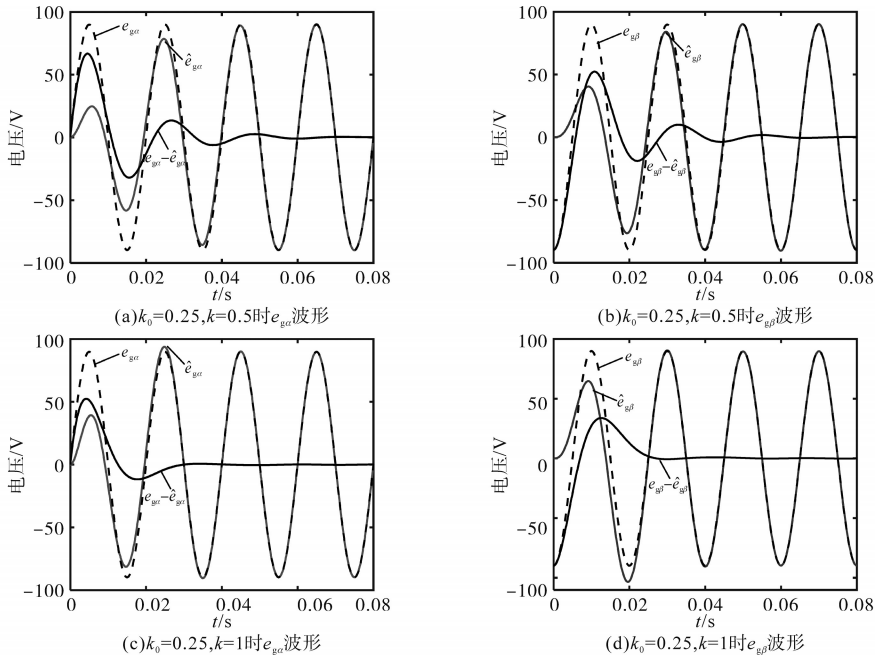


图8 k 和 k_0 变化时电网电压动态收敛波形

Fig.8 Dynamic convergence waveforms of grid voltage when k and k_0 change

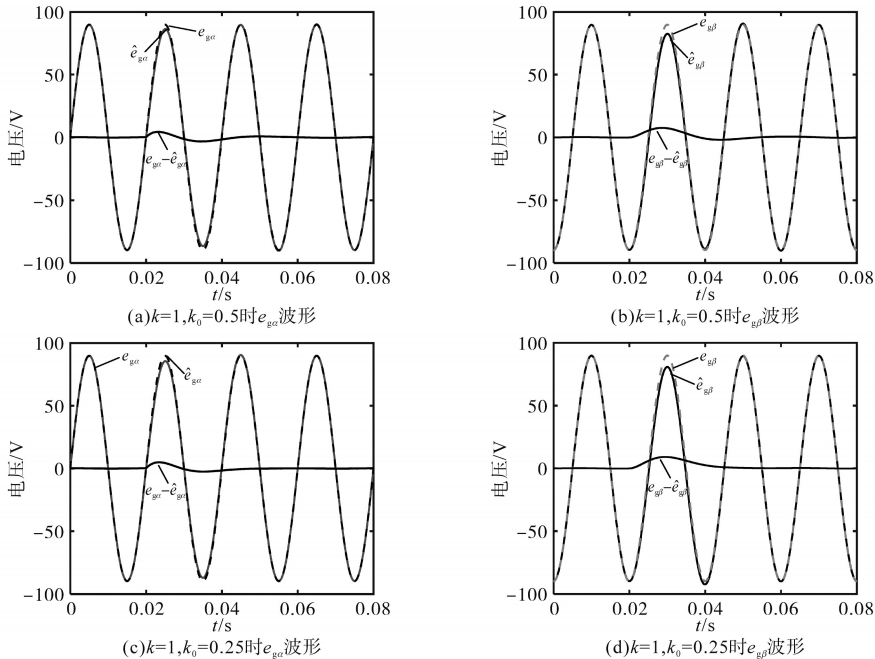


图9 突加直流偏置且 k 和 k_0 变化时电网电压动态收敛波形

Fig.9 Dynamic convergence waveforms of grid voltage when DC-offset is added with varied k and k_0

图8a和图8b给出了 $k_0=0.25, k=0.5$ 时本文所提方法的电网电压动态收敛波形。图8c和图8d则给出了 $k_0=0.25, k=1$ 时本文所提方法电网电压动态收敛波形。对比图8a和图8c可见,当 k 由0.5增大到1时,电网电压动态收敛速度加快。由图8b和图8d也可以得到相同的结论。这与理论分析一致。然而,如果 k 过大,滑模噪声会被放大,这会增大电网电压的谐波,并降低系统的稳定性。

图9测试了在0.02 s突加直流偏置时 k_0 和 k 变化对电网电压观测的影响。仿真时,在0.02 s时突然给 u_{ga} 加上-10 V的直流偏置。图9a和图9b给出了 $k=1, k_0=0.5$ 时本文所提方法电网电压动态收敛波形。图9c和图9d则给出了 $k=1, k_0=0.25$ 时本文所提方法电网电压动态收敛波形。

由图9可见,当突加直流偏置时,电网电压观测误差经过一个暂态后趋近于零。这表明本文所提方法几乎可以完全消除直流偏置对电网电压观测的影响,验证了本文所提基于单滑模观测器和单三阶广义积分器的电网电压观测方法的可行性。此外,对比图9a和图9c可见,当 k_0 减小时,本文所提方法在突加直流偏置时的电网电压动态收敛速度有所加快,这也与理论分析一致。

图10进一步给出了本文第3.1节所提基于单滑模观测器和单二阶广义积分器的电网电压观测方法在突加直流偏置时的电网电压收敛波形。仿真时,取 $k=1$ 。为了方便起见,这里称该方法为常规方法。

由图10a可见,常规电网电压观测方法得到

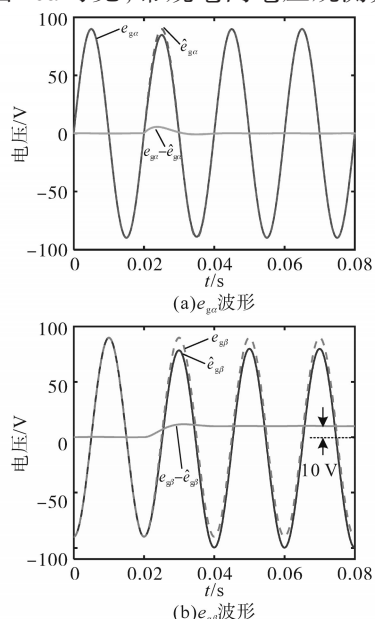


图10 突加直流偏置时常规方法的电网电压动态收敛波形

Fig.10 Grid voltage dynamic convergence waveforms of conventional method when DC-offset is added suddenly

的电网电压 e_{ga} 不受直流偏置的影响。这是因为图2所示二阶广义积分器的输出 u_{out1} 不受直流偏置的影响。然而,由理论分析可知,图2所示二阶广义积分器的输出 u_{out2} 受直流偏置的影响。因此当使用单个二阶广义积分器观测电网电压 $e_{g\beta}$ 时, $e_{g\beta}$ 会受直流偏置的影响。由图10b可见,当在0.02 s突加直流偏置时,观测的电网电压 $e_{g\beta}$ 出现了一个明显的偏置误差,这验证了理论分析的正确性。正是为了解决该问题,本文提出了采用三阶广义积分器代替二阶广义积分器的电网电压观测方法,从而克服了直流偏置的影响,如图9所示。

4.2 实验验证

为了进一步验证本文所提基于单滑模观测器和单三阶广义积分器的电网电压观测方法的有效性,本节进行了实验研究。实验所用参数与仿真一致。

图11给出了常规方法和本文所提方法的电网电压动态收敛过程波形。对比图11可见,本文所提方法虽然将广义积分器的阶次由二阶提高到三阶,但其动态收敛速度和常规方法基本相同,这表明本文所提电网电压观测方法具有较好的动态收敛特性。

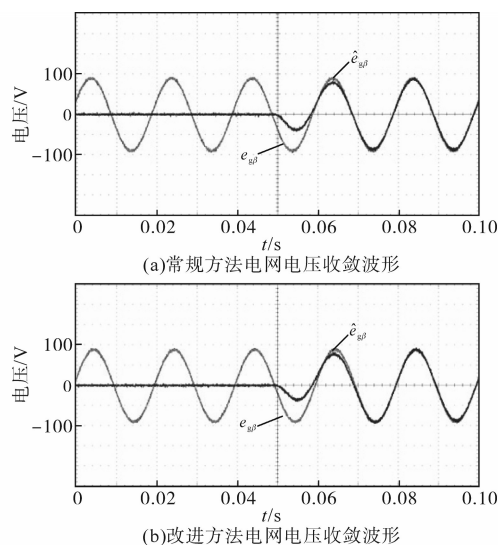


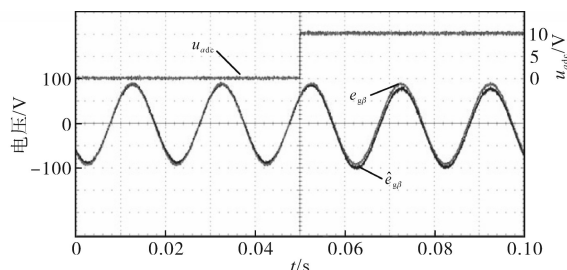
图11 电网电压动态收敛实验波形

Fig.11 Dynamic convergence experimental waveforms of the grid voltage

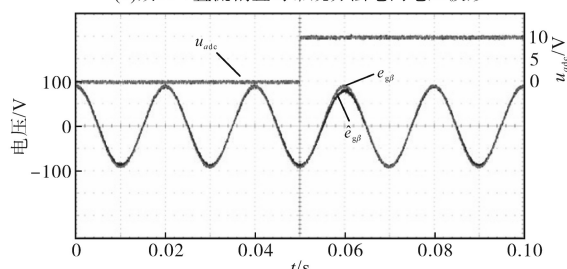
此外,由于本文所提方法采用三阶广义积分器代替常规的二阶广义积分器,其对直流偏置的抑制能力也显著增强。为了验证所提方法对直流偏置的抑制能力,图12和图13分别对比了在 u_{ga} 上突然减去10 V和-10 V直流偏置 u_{adc} 时常规方法和本文所提方法的电网电压观测波形。

对比图12a和图12b可见,当在0.05 s突减10 V直流偏置时,常规电网电压观测方法得到的

电网电压明显出现了直流偏置,而本文所提基于单滑模观测器和单三阶广义积分器的电网电压观测方法经过一个暂态后,电网电压观测误差几乎为零。这表明了本文所提方法可以实现直流偏置抑制,与理论分析和仿真结果一致。



(a)减10 V直流偏置时常规方法电网电压波形

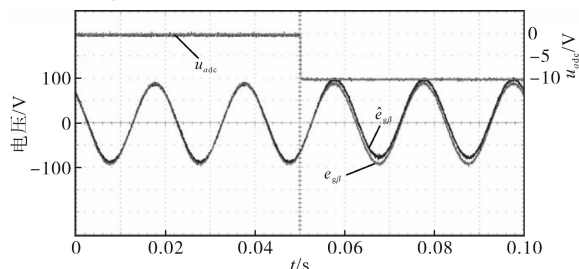


(b)减10 V直流偏置改进规方法电网电压波形

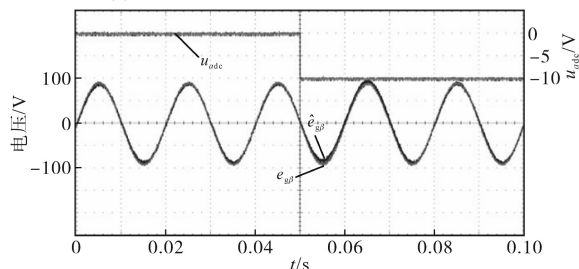
图12 减10 V直流偏置时电网电压实验波形

Fig.12 Experimental waveforms of the grid voltage when 10 V DC-offset is subtracted

进一步由图13可见,当突减-10 V直流偏置时,与常规方法相比,本文所提方法仍然可以实现直流偏置抑制,再次验证了本文所提方法的有效性。



(a)减-10 V直流偏置时常规方法电网电压波形



(b)减-10 V直流偏置改进规方法电网电压波形

图13 减-10 V直流偏置时电网电压实验波形

Fig.13 Experimental waveforms of the grid voltage when -10 V DC-offset is subtracted

5 结论

本文提出了一种基于单滑模观测器和单三

阶广义积分器的柔直换流器电网电压观测方法,以简化算法,并克服直流偏置的影响。本文首先分析了二阶广义积分器的输入输出特性,并结合二阶广义积分器的优势,设计了一种基于单滑模观测器和单二阶广义积分器的电网电压观测方法。针对二阶广义积分器不能抑制直流偏置的问题,本文又分析了三阶广义积分器的输入输出特性,并进一步提出了一种基于单滑模观测器和单三阶广义积分器的电网电压观测方法,以消除直流偏置的影响。理论分析、对比仿真和实验结果表明,本文所提方法具有如下突出优势:

1)与常规电网电压观测方法相比^[15-19],本文所提方法减少了观测器和滤波器的数量,从而显著简化了算法的设计和实现复杂度。

2)对比实验结果表明,本文所提方法与常规基于二阶广义积分器的方法具有类似的电网电压动态收敛过程。

3)对比仿真和实验结果表明,与常规方法相比,本文所提方法采用三阶广义积分器代替二阶广义积分器进行电网电压观测,从而克服了直流偏置的影响,提高了电网电压观测精度。

理论分析、仿真结果和对比实验结果验证了所提方法的有效性。

参考文献

- [1] 马州生,姚阳.含海上风电场混合直流系统的稳定下垂控制[J].电气传动,2022,52(11):35-41.
MA Zhousheng, YAO Yang. Stable droop control for hybrid DC system with offshore wind farm[J]. Electric Drive, 2022, 52(11):35-41.
- [2] 李晓鹏,蔡文斌,吕海霞.计及不确定性的比例清洁能源在微电网中的消纳[J].电气传动,2022,52(3):45-50.
LI Xiaopeng, CAI Wenbin, LÜ Haixia. A high proportion of clean energy consumption in the microgrid taking into account uncertainty[J]. Electric Drive, 2022, 52(3):45-50.
- [3] 王林,郭贤朝,姚传涛,等. MMC-HVDC的新型交流故障穿越策略[J].电气传动,2020,50(12):48-53.
WANG Lin, GUO Xianchao, YAO Chuantao, et al. A new AC fault ride-through strategy of MMC-HVDC[J]. Electric Drive, 2020, 50(12):48-53.
- [4] 沈宝兴,林琳,张惠雯,等. MMC-HVDC孤岛供电系统直流故障穿越协调控制策略[J].电气传动,2022,52(5):62-69.
SHEN Baoxing, LIN Lin, ZHANG Huiwen, et al. Coordinated control strategy for DC fault ride-through of MMC-HVDC connecting island power system[J]. Electric Drive, 2022, 52(5):62-69.
- [5] 杨岳峰,王晓晗,王伟,等.柔性直流换流阀监视系统关键技术及工程化应用[J].中国电力,2021,54(4):168-174.

- YANG Yuefeng, WANG Xiaohan, WANG Wei, et al. Key technologies and engineering application of converter valve monitoring system for flexible HVDC[J]. Electric Power, 2021, 54(4): 168-174.
- [6] 孙杰,尹太元,王跃,等.采用VSG策略的MMC阻抗建模及并网稳定性分析[J].电源学报,2021,19(6):30-41.
- SUN Jie, YIN Taiyuan, WANG Yue, et al. Impedance modeling and grid-connected stability analysis of MMC under VSG control strategy[J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(6): 30-41.
- [7] 李金铭,裴忠晨,张瀚文,等.基于桥臂平衡的隔离型模块化多电平变换器(I-MMC)环流抑制策略[J].电气传动,2022,52(5):21-27.
- LI Jinming, PEI Zhongchen, ZHANG Hanwen, et al. Arm balanced based circulating current suppressing strategy for isolated modular multilevel converter (I-MMC) [J]. Electric Drive, 2022, 52(5): 21-27.
- [8] 薛花,田广平,扈曾辉,等.电网不平衡下模块化多电平变换器无源一致性控制方法[J].电力系统自动化,2022,46(3): 85-95.
- XUE Hua, TIAN Guangping, HU Zenghui, et al. Passivity-consensus based control method for modular multilevel converter in unbalanced power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 85-95.
- [9] LIU X, QIU L, MA J, et al. A fast finite-level-state model predictive control strategy for sensorless modular multilevel converter[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(3): 3570-3581.
- [10] LIU X, QIU L, FANG Y, et al. Finite-level-state model predictive control for sensorless three-phase four-arm modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5): 4462-4466.
- [11] 王永翔,蒋威,马驰.基于虚拟磁链估算的单相级联H桥整流器无网侧电压传感器控制方法[J].机车电传动,2021(3): 100-107.
- WANG Yongxiang, JIANG Wei, MA Chi. Grid-voltage sensorless control scheme of single-phase cascaded H-bridge rectifiers with virtual flux estimation[J]. Electric Drive for Locomotives, 2021(3): 100-107.
- [12] SUN Y X, ZHANG Z B, ZHANG Y Z, et al. A time-domain virtual-flux based predictive control of modular multilevel converters for offshore wind energy integration[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(3): 1803-1814.
- [13] 候维杨,刘波峰,贺锐智,等.新型虚拟磁链开关表PWM整流器直接功率控制[J].电力电子技术,2017,51(4):12-15.
- HOU Weiyang, LIU Bofeng, HE Ruizhi, et al. Direct power control of PWM rectifier based on a novel virtual flux linkage switch table[J]. Power Electronics, 2017, 51(4): 12-15.
- [14] 熊成林,宋智威,黄路,等.基于谐波补偿的单相PWM整流器虚拟磁链模型预测算法[J].电机与控制学报,2020,24(11):93-101.
- XIONG Chenglin, SONG Zhiwei, HUANG Lu, et al. A virtual-flux-linkage model predictive control of single-phase PWM rectifier based on harmonic compensation[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(11): 93-101.
- [15] 胡书举,龚文明,李丰林,等.一种并网逆变器无交流电压传感器控制策略研究[J].电工技术学报,2015,30(14):325-332.
- HU Shuju, GONG Wenming, LI Fenglin, et al. Research on a kind of AC voltage sensorless control strategy of grid-connected inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 325-332.
- [16] 胡书举,孟岩峰,李丰林,等.电网电压不平衡时逆变器无交流电压传感器控制策略[J].电工技术学报,2017,32(24): 146-152.
- HU Shuju, MENG Yanfeng, LI Fenglin, et al. AC voltage sensorless control strategy of grid-connected inverter under unbalanced grid voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(24): 146-152.
- [17] 肖蕙蕙,苏新柱,郭强,等.三相Vienna整流器无网压传感器预测电流控制策略[J].电工技术学报,2021,36(6):1304-1312.
- XIAO Huihui, SU Xinzhu, GUO Qiang, et al. Predictive current control of three-phase Vienna rectifier without grid voltage sensors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(6): 1304-1312.
- [18] 郭磊磊,金楠,李琰琰,等.基于滑模观测器的并网逆变器无交流电压传感器模型预测控制[J].电力自动化设备,2020,40(6):108-114.
- GUO Leilei, JIN Nan, LI Yanyan, et al. Sliding mode observer based AC voltage sensorless model predictive control for grid-connected inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 108-114.
- [19] 张晓光,李正熙.无电压传感器逆变器开路故障诊断方法[J].电机与控制学报,2016,20(4):84-92.
- ZHANG Xiaoguang, LI Zhengxi. Diagnostic method of open-switch faults in inverters without voltage sensor[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(4): 84-92.
- [20] KARIMI-GHARTEMANI M, KHAJEHODDIN S A, JAIN P K, et al. Addressing DC component in PLL and notch filter algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1): 78-86.

收稿日期:2022-07-14
修改稿日期:2022-09-03