

具有参数自适应特性的并网变流器无交流电压传感器控制方法

孟岩峰^{1,2}, 胡书举¹, 许洪华¹

(1. 中国科学院 电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘要:针对当前无交流电压传感器控制技术中存在的电压观测器适用性问题, 研究了一种基于参数自适应电压观测器的无交流电压传感器控制方法。阐述了基于二阶广义积分器构造的电压观测器原理, 提出利用锁相环在线实时反馈电网频率信号的频率自适应控制方法。在此基础上, 利用简化模型分析电感参数偏离实际值情况下的向量关系, 提出一种具有电感参数自适应特性的改进电压观测器。应用所提的改进控制方法, 可实现频率和电感参数自适应的并网变流器无交流电压传感器控制, 提高了并网变流器的电网适应性。

关键词:并网变流器; 无交流电压传感器; 交流电压观测器; 参数自适应特性

中图分类号: TM 46

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.001

0 引言

近年来风电发展迅速, 随着规模化的应用, 当其接入电网末梢或弱电网时, 由于电网稳定性较差, 可能发生电压波动、闪变、对称或非对称电网电压跌落故障^[1-4]。通过锁相环得到的电网信息将受到不稳定的电网特性影响, 从而影响风电机组的稳定运行, 这将反过来恶化电网电压稳定性^[5], 因此有必要研究不依赖于电网电压信息的无交流电压传感器控制技术, 改善其性能特性, 提高并网变流器的电网适应性^[6-7]。此外, 当前风电机组包含有较多的传感器, 会使得系统组成及结构变得复杂, 同时提高了硬件成本, 无交流电压传感器控制技术的应用可简化系统, 降低成本, 并减少因传感器造成的故障, 提高系统的可靠性, 尤其是在应用全功率变流器的直驱风电机组并网场合更为明显^[8-9]。

目前常见的有 2 种电网电压观测方式用于无交流电压传感器控制技术: 一种是采用有功、无功和视在功率估计的电压观测方法, 其未引入反馈控制, 精确度较低, 且由于含有电流微分项, 容易引起系统不稳定^[10-11]; 另一种是采用网侧电流偏差调节得到的电网电压观测值, 加入反馈控制, 其精确度比较好^[12-13]。文献[14-16]提出利用积分运算观测电网“虚拟磁链”, 但纯积分器方法存在积分饱和与直流偏移等问题, 且对积分初始值较为敏感, 同时也降低了系统响应速度。文献[9]使用的积分器带有输出限幅, 从而避免了积分饱和问题。由于二阶广义积分器 SOGI(Second-Order Generalized Integrator) 具有对选定频率的正弦信号进行无静差跟踪并生成同幅值的正交量的能力, 因而在锁相环输出电网电压信

息中得到了应用, 进行并网同步控制。文献[17]基于二阶广义积分器构建正交滤波器实现无交流传感器的控制, 避免了微分环节的计算, 同时也提高了响应速度, 但是要实现精确的观测电网电压, 还需要精确地测量得到交流侧电感值及实时跟踪电网频率变化。文献[18]基于三阶广义积分器 TOGI(Third-Order Generalized Integrator) 构造正交信号发生器 OSG(Orthogonal Signal Generator) 进行电网电压重构, 解决了电网电压和交流侧电流的直流偏移问题, 但并未涉及电压观测器的参数自适应问题, 这使其应用受到了限制。

为此, 本文针对上述问题, 研究具有频率和电感参数自适应特性的无交流电压传感器控制方法, 将其应用在直驱风电机组并网变流器中。首先阐述了并网变流器交流电压观测器原理, 分析了其存在的局限性问题; 在此基础上, 提出了相应的改进控制方法; 最后, 通过仿真和实验研究验证了本文所提控制方法的有效性和可行性。

1 风电并网变流器交流电压观测器原理

图 1 为应用于直驱风电机组中的并网变流器典型拓扑结构图。图中, R 和 L 分别为交流滤波器的电阻和电感; C 为直流侧母线电压支撑电容; u_a 、 u_b 、 u_c 为三相电网电压; v_a 、 v_b 、 v_c 为三相桥端控制电压; i_a 、 i_b 、 i_c 为三相交流电流; I_{dc} 和 I_{load} 分别为流入和流

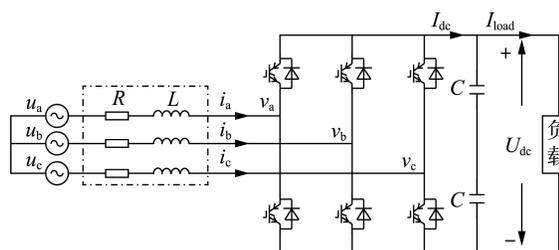


图 1 三相并网变流器拓扑结构

Fig.1 Topological structure of three-phase grid-connected converter

收稿日期: 2018-11-11; 修回日期: 2019-05-11

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项研究项目(XDA-21050301)

Project supported by the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences(XDA21050301)

出直流母线的电流; U_{dc} 为直流侧母线电压。图 1 中电流方向按整流器惯例确定。

根据直驱机组并网变流器模型可以推导得到 $\alpha\beta$ 坐标系下的控制模型^[16]如下:

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = -R \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = -R \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \frac{U_{dc}}{2} \begin{bmatrix} d_\alpha \\ d_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, u_α 和 u_β 为两相静止坐标系下电网电压分量; i_α 和 i_β 为两相静止坐标系下交流侧电流分量; v_α 和 v_β 为两相静止坐标系下并网变流器桥臂输出电压分量。由式(1)可得基本的电压观测器模型如下:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

可以看到,式(2)存在电流微分环节的计算,这在实际控制应用中容易引入干扰,引起系统控制不稳定。因此,通常采用积分运算而非微分运算得到电网“虚拟磁链”并间接得到电网电压相位信息来进行无交流电压传感器控制。但是采用上述常规无交流电压传感器计算方法还存在诸如积分饱和、稳态控制误差及不定积分初始值影响等问题,并且动态响应也不够迅速。为此,文献[17]基于二阶广义积分器构建了一种正交滤波器 QF (Quadrature Filter),解决了电流微分运算问题,可有效降低谐波干扰,具有较好的动态响应速度。

根据正交滤波器输出信号特性,可以将式(2)改写为实用的电压观测器^[17]:

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_\alpha \\ \hat{u}_\beta \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{v}_\alpha \\ \hat{v}_\beta \end{bmatrix} = -L \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha^\perp \\ \hat{i}_\beta^\perp \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{v}_\alpha \\ \hat{v}_\beta \end{bmatrix} - G_{QF2} L \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + G_{QF1} \left(R \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \right) \quad (3)$$

其中, \hat{i}_α^\perp 与 \hat{i}_α , \hat{i}_β^\perp 与 \hat{i}_β 互为正交信号; \hat{v}_α 和 \hat{v}_β 为桥端控制电压;上标“ $\hat{\cdot}$ ”表示观测量; G_{QF1} 、 G_{QF2} 为正交滤波器传递函数,其表达式分别如式(4)、(5)所示。

$$G_{QF1}(s) = \frac{\hat{v}}{v} = \frac{k\omega_v s}{s^2 + k\omega_v s + \omega_v^2} \quad (4)$$

$$G_{QF2}(s) = \frac{\hat{v}^\perp}{v} = \frac{k\omega_v^2}{s^2 + k\omega_v s + \omega_v^2} \quad (5)$$

其中, v 为滤波器输入信号; \hat{v} 和 \hat{v}^\perp 为输出信号; ω_v 为拟跟踪交流角频率; k 为增益系数。图 2 为基于式(3)的基本电压观测器的控制框图。

由此可得到基于电压观测器的直驱风电机组并

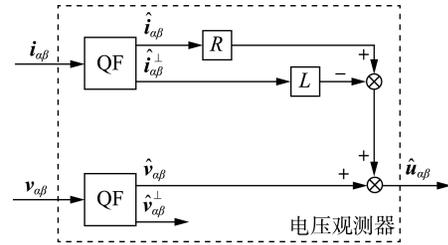


图 2 基本电压观测器结构图

Fig.2 Structure diagram of basic voltage observer

网变流器控制框图,如图 3 所示。根据图 3 即可实现并网变流器的无交流电压传感器的控制。

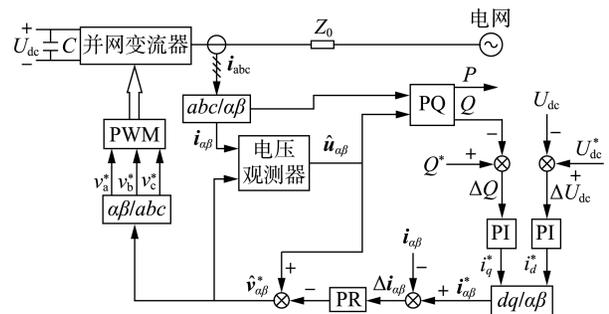


图 3 无交流电压传感器控制框图

Fig.3 Control block diagram of AC voltage sensorless

2 实现参数自适应的控制方法

观察式(3)~(5)不难发现,要实现平稳快速控制、精确地观测出电网电压,除了需要采集精度较高的交流电流与直流电压测量值以外,还应获得准确的变流器所用电抗器参数,同时确保电网频率保持不变。但在实际运行中,难以准确获得电抗器的参数测量值,且电感参数值会随着温度等环境因素的变化而改变。而当变流器处于并网运行工况时,电网线路等效阻抗也会随潮流、网络结构等的变化而改变,进而影响到变流器并网点电压,对电网电压的准确观测产生不利影响。另外,实际电网电压频率常偏离工频值,这种现象在偏远地区容量较小的电网及弱电网中表现更为普遍。因此本文针对上述问题,研究改进观测器的参数自适应特性,从而提高无交流电压传感器控制在电路参数变化时的适应性。

2.1 频率参数自适应控制方法

当电网电压频率发生偏移后,正交滤波器的效果将显著下降,从而难以观测到准确的电压。尽管加大滤波器增益系数 k 可以增加通频带宽,但同时也会加大超调量,使控制器对电压谐波更为敏感。注意到式(4)中使用的电网频率参数为固定值,为使滤波器跟踪电网频率变化,利用锁相环在线实时获取电网频率,并反馈接入正交滤波器,即可实现跟踪频率变化的交流量。以锁相环输出电网频率 $\hat{\omega}_v$ 代替固定电网频率 ω_v ,将其代入式(4)和式(5),计算得到其幅频和相频响应如下:

$$\begin{cases} |\hat{G}_{QF1}(j\omega_v)| = \frac{k\hat{\omega}_v\omega_v}{\sqrt{(k\hat{\omega}_v\omega_v)^2 + (\hat{\omega}_v^2 - \omega_v^2)^2}} \\ \angle \hat{G}_{QF1}(j\omega_v) = \arctan \frac{\hat{\omega}_v^2 - \omega_v^2}{k\hat{\omega}_v\omega_v} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} |\hat{G}_{QF2}(j\omega_v)| = \frac{k\hat{\omega}_v^2}{\sqrt{(k\hat{\omega}_v\omega_v)^2 + (\hat{\omega}_v^2 - \omega_v^2)^2}} \\ \angle \hat{G}_{QF2}(j\omega_v) = \arctan \frac{\hat{\omega}_v^2 - \omega_v^2}{k\hat{\omega}_v\omega_v} - \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (7)$$

稳态运行时,有 $\hat{\omega}_v = \omega_v$,由式(6)和式(7)可得到两者幅值同为 1,相角相差 90° ,这表明滤波器具备对频率变化的信号无静差跟踪能力,并可输出同频率的相位差 90° 的信号,同时输入信号频率对控制器参数无影响。具有频率自适应特性的电压观测器结构图如图 4 所示。

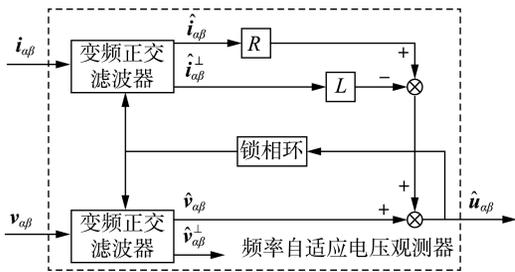


图 4 频率自适应电压观测器结构图

Fig.4 Structure diagram of frequency adaptive voltage observer

2.2 电感参数自适应控制方法

电压观测器对电感参数较为敏感,为此研究电感参数自适应控制方法。为说明并网变流器中相关电路参数的影响,可以利用如图 5 所示的简化等效模型进行分析。

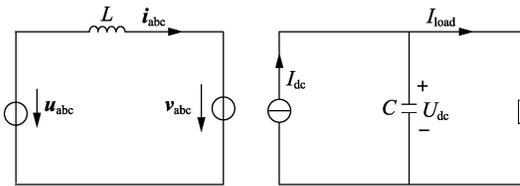


图 5 电压型变流器简化等效模型

Fig.5 Simplified equivalent model of voltage source converter

针对图 5 中的简化模型,为方便讨论,做以下的几点假设。

- (1) 并网变流器接入强电网,电网电压 u_{abc} 不变,即将线路阻抗与电抗器阻抗合并。
- (2) 忽略开关损耗以及交流侧滤波器的电阻。
- (3) 变流器直流侧负载恒定,并控制直流电压 U_{dc} 保持不变,即直流侧输出功率恒定。则根据交直流功率关系可知交流电流 i_{abc} 的有功分量 i_d 恒定:

$$i_d = \frac{P}{|u_{abc}| \cos \varphi} = \frac{U_{dc} I_{load}}{|u_{abc}| \cos \varphi} = C' \quad (8)$$

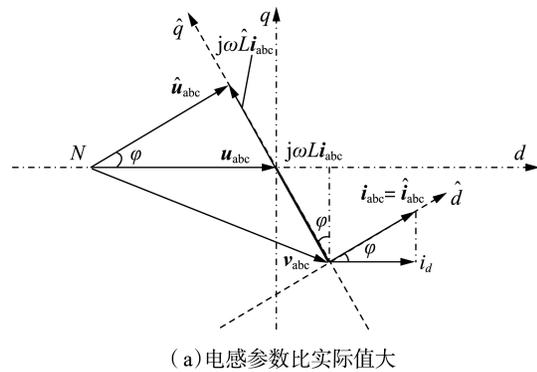
其中, φ 为并网点的功率因数角; C' 为常数。

(4) 控制变流器以单位功率因数运行。

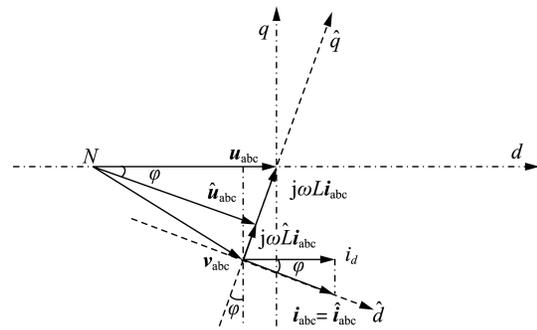
基于上述假设进行相关参数变化分析。当并网变流器稳定运行时,控制系统将观测器输出的电网电压 \hat{u}_{abc} 定向到 \hat{d} 轴,即 $\hat{u}_q = 0$ 。由于电流调节器的作用,电网电流 \hat{i}_{abc} 就等于其参考值,则可推导得到:

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^*/\hat{u}_{gd} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, \hat{i}_d, \hat{i}_q 为控制系统在 \hat{dq} 坐标系下的电流; P^*, \hat{u}_{gd} 分别为参考功率值和观测得到的电网侧 d 轴电压分量。由于电流可以通过互感器测量得到,因此 \hat{i}_{abc} 与实际电流 i_{abc} 重合。根据式(9)可知, \hat{u}_{abc} 和 i_{abc} 的夹角应为 0° 。又根据图 5 可以画出电感参数偏离实际值时的相量关系图,如图 6 所示。图中,电网电压 u_{abc} 、交流电流有功分量 i_d 为恒定值; \hat{L} 为控制系统所用的电感参数,而 L 为实际电感值。从图中可见,由于使用了不正确的电感参数,导致观测器输出的电网电压与实际电压不重合,从而使得实际功率因数角 φ 不为 0° 。当并网变流器控制系统中所用电感参数大于实际并网变流器中电感参数时,并网变流器电流矢量超前于电压矢量,此时向电网输送容性无功;当并网变流器控制系统中所用电感参数小于实际并网变流器中电感参数时,并网变流器电流矢量滞后于电压矢量,此时向电网输送感性无功。由于并网点实际无功功率不为 0,而有功功率只取决于直流侧,因此不论 \hat{L} 比 L 大还是小,实际电流都



(a) 电感参数比实际值大



(b) 电感参数比实际值小

图 6 稳态运行相量图

Fig.6 Steady-state operation vector diagram

会增大。

根据以上分析,可以得到具有参数自适应特性的改进控制策略。令并网变流器以单位功率因数运行,以小步长改变观测器中的电感参数,当并网变流器交流侧电流幅值最小时,可以认为电感参数与实际值相吻合。根据这一原则可以设计出参数搜索程序,使得无交流电压传感器控制具有参数自适应特性。在频率自适应观测器基础上改进后得到具有电感参数自适应特性的电压观测器如图 7 所示。图中, $\min |i_{abc}|$ 表示搜索目标为电流幅值最小化。

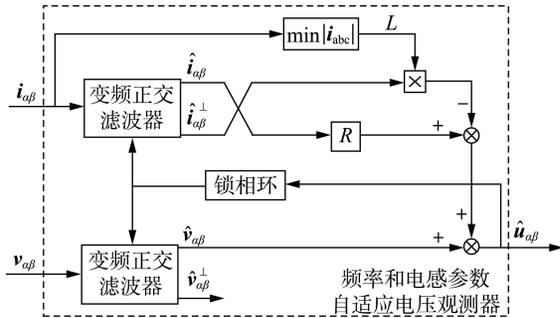


图 7 具有参数自适应特性的电压观测器结构图

Fig.7 Structure diagram of voltage observer with parameter adaptive characteristics

需要注意的是,根据假定的前提条件易知,搜索出的电感参数包含了电网等效参数(如线路电感、变压器漏感等)。换言之,电压观测器输出的电网电压实际为等效远端无穷大母线上的电压,而非并网点电压。因此在电网线路阻抗较大或者变化的情况下,电网电压观测器输出的电压仍将较为稳定,不受潮流等变化的影响,有利于提高变流器的电网适应性。另外,为了提高电感参数的辨识精度,有必要在搜索时设置较大的有功电流 i_d ,即较大的直流负载。因为直驱风电机组采用全功率变流器,相较于双馈型变流器,并网变流器交流侧电流更大,所以采用本文所提方法更为适用。

基于上述理论分析,可以得到具有电网频率和电感参数自适应特性的无交流电压传感器并网变流器完整控制框图,如图 8 所示。

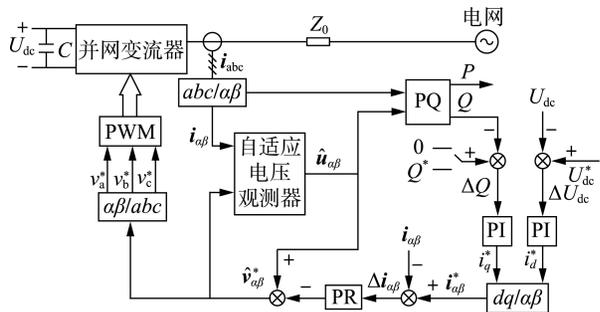


图 8 具有参数自适应特性的无交流电压传感器控制框图

Fig.8 Control block diagram of AC voltage sensorless with parameter adaptive characteristics

3 仿真验证

在 MATLAB 中建立了并网变流器时域仿真模型,验证所提频率和电感参数自适应控制调节方法的有效性。并网变流器采用 L 型滤波器,电阻为 $1 \text{ m}\Omega$,电感为 1 mH ,开关频率为 5 kHz 。

本文分别使用具有频率自适应特性的电网电压观测器及固定频率电网电压观测器在 MATLAB 中进行了对比仿真,仿真结果分别见图 9、10。图中给出了实际电网电压 U_{abc} 及其频率 f_u 、观测器输出电压 $U_{ob,abc}$ 及其频率 f_{uob} 、三相并网电流 $I_{ob,abc}$ 的仿真波形,其中 U_{abc} 、 $U_{ob,abc}$ 、 $I_{ob,abc}$ 均为标么值,后同。

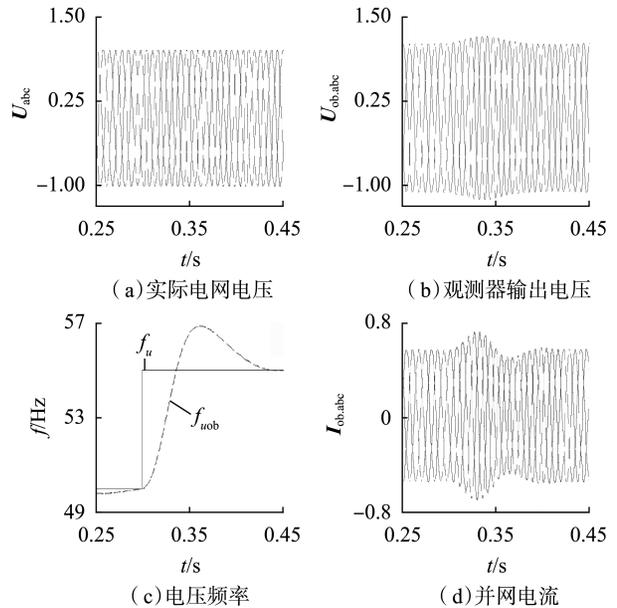


图 9 使用频率自适应观测器的仿真结果

Fig.9 Simulative results with frequency adaptive observer

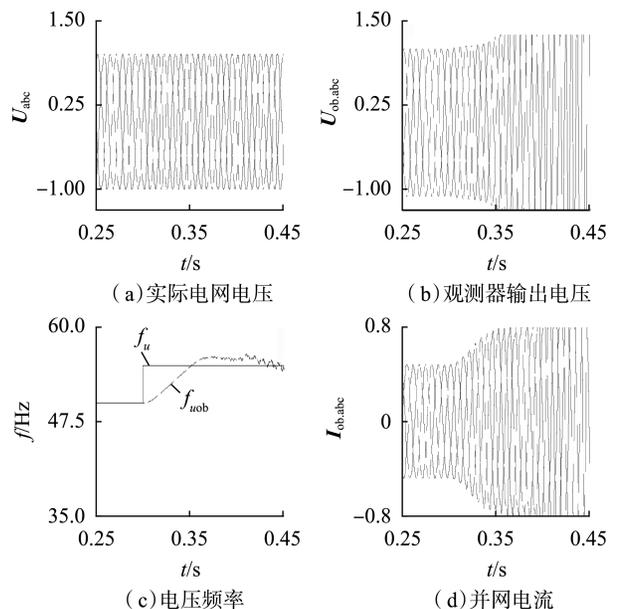


图 10 使用固定频率观测器的仿真结果

Fig.10 Simulative results with fixed-frequency observer

从图 9 可以看出, $t = 0.3$ s 时, 电网频率跳变到 55 Hz, 频率自适应电压观测器能够较为迅速地跟踪电网电压变化, 并观测到正确的电网电压, 过渡时间约为 0.15 s。而从图 10 可以看出, 使用固定频率的观测器时, 由于电网频率变化过大, 会导致观测器无法正确跟踪电网电压, 控制系统在电网频率跳变约 0.1 s 后开始发散。通过图 9 和图 10 仿真结果对比可以看到, 频率变化会引起正交滤波器的滤波效果恶化, 从而引起观测器得到的电网电压失真, 进而使得系统失稳; 采用频率自适应的电压观测器, 系统在频率变化时可以稳定运行。上述对比仿真说明频率自适应观测器使得无交流电压传感器控制能够适应更大范围的频率变化。

保持直流电压稳定, 变流器的有功功率负载约为 0.5 p.u., 无功功率参考值设为 0, 在仿真系统中令电压观测器中电感参数先增大后减小。使用电感参数自适应电压观测器的仿真结果如图 11 所示。图 11(b) 为实际电网电压幅值(标么值)与观测器输出电压幅值(标么值)的比较; 图 11(c) 为变流器输出电流幅值(标么值); 图 11(d) 为变流器输出无功功率(标么值)。可见变流器输出无功与电流也会出现周期性变化。通过比较可知, 变流器输出电流最小值出现在电感接近额定值时, 无功功率变化周期与电感变化周期相同, 而电流与观测电压的幅值变化周期为电感变化周期的 1/2, 仿真结果与理论分析一致。

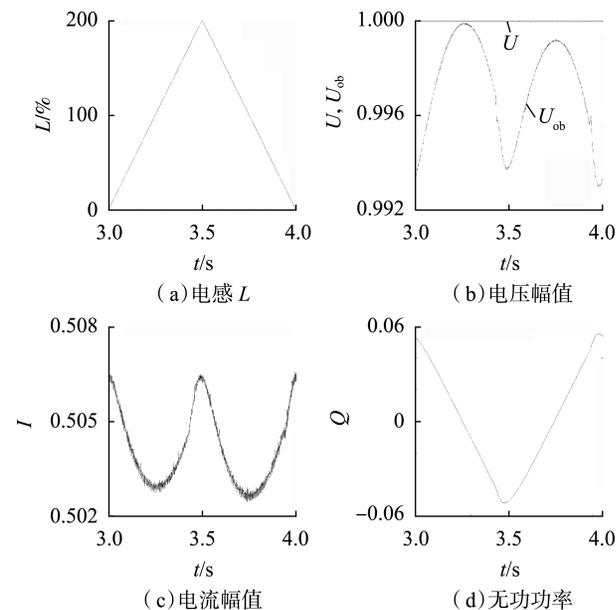


图 11 使用电感参数自适应电压观测器的仿真结果
Fig.11 Simulative results with inductance parameter adaptive voltage observer

4 实验验证

为验证本文算法和改进控制策略的有效性, 在实验室 17 kW 直驱风力发电模拟实验平台上进行了

实验验证。实验平台由拖动变频器、异步电动机、变速齿轮箱、永磁发电机、全功率变流器组成, 变频器拖动异步电机并通过齿轮箱降速模拟风力机带动发电机旋转。实验系统框图如图 12 所示。永磁同步发电机额定容量为 17 kW, 实验系统其他设定参数与前述仿真模型参数一致, 由于实验条件所限, 只进行了电感参数自适应实验验证。

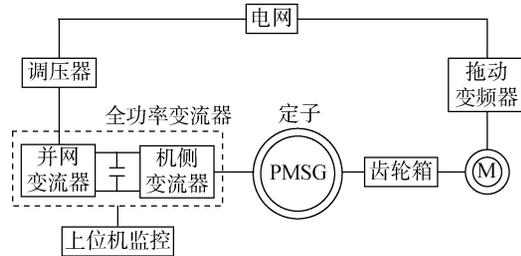


图 12 直驱风力发电实验平台

Fig.12 Direct-drive wind power experiment platform

实验时直流侧保持恒定负载, 即有功电流恒定, 无功功率参考值设为 0, 同时在变流器控制系统中令电感参数先增大后减小, 在 50%~200% 标称值之间周期性地变化, 周期为 6 s。实验结果如图 13 所示。

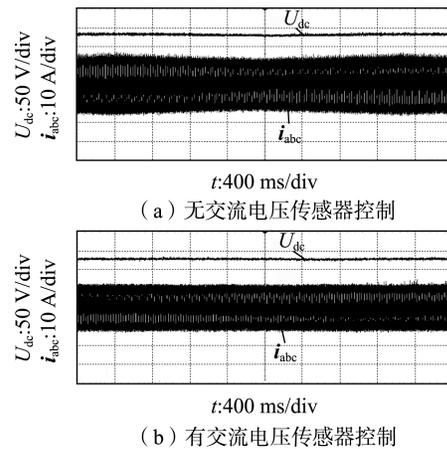


图 13 电感参数变化时的实验波形

Fig.13 Experimental waveforms when inductance parameter varying

从图 13(a) 中可以看出, 电感参数变化时直流电压没有明显波动, 而交流电流的幅值呈现周期性变化, 周期约为 3 s, 与上述分析一致, 说明电感参数的变化引起了无功功率的变化。电流最小时与采用有交流传感器控制时的电流接近, 验证了本文所述的电感参数辨识原理的有效性。而从图 13(b) 中可以看出, 电感参数变化时直流电压与交流电流幅值都没有明显波动, 说明可以忽略电感参数变化对前馈解耦控制的影响, 更进一步地证实了 2.2 节所提的电感参数自适应辨识原理的正确性。

5 结论

本文针对目前较为先进的基于二阶广义积分器

的正交滤波器所构造的电压观测器存在的局限进行了研究,得到以下的结论。

(1) 提出一种基于锁相环输出频率反馈的具有频率自适应特性的改进电压观测器,根据其幅频和相频响应,证实了改进的电压观测器可无静差跟踪频率变化的交流量,通过仿真验证了所提方法的有效性。

(2) 电网电压观测器对滤波器电感参数较为敏感,根据简化模型分析了参数偏离实际值情况下的向量关系,说明了在无功参考值为 0 时,不准确的电感参数会导致变流器输出电流幅值增大,据此提出一种具有电感参数自适应特性的改进电压观测器。通过仿真和实验研究,验证了所提电感参数自适应控制方法的有效性。

基于本文所提方法可实现电压观测器频率和电网参数的自适应,拓宽了电压观测器的适用范围,提高了无交流电压传感器并网变流器的电网适应性,具有很好的可行性。

参考文献:

- [1] 王伟,李庆,王瑞明. 风力发电机组电压波动与闪变分析研究[J]. 可再生能源,2014,32(2):173-178.
WANG Wei, LI Qing, WANG Ruiming. Study on voltage and flicker of wind turbines[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(2): 173-178.
- [2] 胡书举,孟岩峰,龚文明,等. 非理想电网条件下双馈式风电机组的运行控制策略[J]. 电工技术学报,2013,28(5):99-104.
HU Shuju, MENG Yanfeng, GONG Wenming, et al. Operation control strategy of DFIG wind turbine under non-ideal grid conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 99-104.
- [3] GAMBICA. Managing harmonics—a guide to ENA engineering recommendation:G5/4-1[S]. London, UK: the Gambica Association Limited, 2005.
- [4] 孟岩峰,胡书举,许洪华. 直接驱动型风电系统谐波抑制技术研究[J]. 太阳能学报,2014,35(12):2356-2361.
MENG Yanfeng, HU Shuju, XU Honghua. Research on harmonics restraint technology of direct-driven wind power system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2014, 35(12): 2356-2361.
- [5] 张硕,朱莉,杜林,等. 风电场并网方式对地区电网电压的影响[J]. 华中电力,2012,25(2):65-70.
ZHANG Shuo, ZHU Li, DU Lin, et al. Wind farm synchronization modes effect on regional power voltage[J]. Central China Electric Power, 2012, 25(2): 65-70.
- [6] 邓志奇,余夫良. 三相电压型 PWM 变换器无电压传感器和不平衡输入的控制策略[J]. 机电工程,2011,28(8):1000-1005.
DENG Zhiqi, YU Fuliang. Regulation of voltage-source PWM converters without line voltage sensors under unbalanced input voltage condition[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28(8): 1000-1005.
- [7] ABIRI E, RAHMATI A, ABRISHAMIFAR A. A sensorless and simple controller for VSC based HVDC system[J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2009, 10(12): 1824-1834.
- [8] 吕观顺,李春静. 无交流电压传感器 PWM 整流器启动性能改善[J]. 电力电子技术,2008,42(9):70-72.
LÜ Guanshun, LI Chunjing. Improved of starting performance for AC voltage sensorless PWM rectifier[J]. Power Electronics, 2008, 42(9): 70-72.
- [9] 吴凤江,孙秀冬,孙力,等. 无交流电压传感器并网逆变器的控制策略及其改进[J]. 电力自动化设备,2009,29(7):33-37.
WU Fengjiang, SUN Xiudong, SUN Li, et al. Control strategy of grid-connected converter without AC voltage sensor and its improvement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 33-37.
- [10] 王国强,王志新,张华强,等. 基于 DPC 的海上风场 VSC-HVDC 变流器控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(7):115-119.
WANG Guoqiang, WANG Zhixin, ZHANG Huaqiang, et al. DPC-based control strategy of VSC-HVDC converter for offshore wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 115-119.
- [11] ISMAIL A, VLADIMIR B. A novel control method of a VSC without AC line voltage sensors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(3): 51-52.
- [12] RODRIGUEZ P, LUNA A, MUNOZ-AGUILAR R S, et al. A stationary reference frame grid synchronization system for three phase grid-connected power converters under adverse grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1): 99-112.
- [13] HAO Feiqin, FANG Yu, WANG Ru, et al. Digital control without line voltage sensing for a three phase bidirectional inverter[C] // Proceedings of the 11th International Conference on Electrical Machines and Systems. Wuhan, China: [s.n.], 2008: 1506-1510.
- [14] 肖雄,张勇军,王京,等. 无电压传感 PWM 整流器的虚拟磁链自适应滑模观测研究[J]. 电工技术学报,2015,30(12):152-161.
XIAO Xiong, ZHANG Yongjun, WANG Jing, et al. PWM rectifiers based on adaptive sliding-mode observer with virtual flux orientation under non-line voltage sensors control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 152-161.
- [15] 罗德荣,周小艳,姬小豪,等. 基于虚拟磁链的 PWM 整流器模型预测直接功率控制[J]. 电力自动化设备,2017,37(12):123-129.
LUO Derong, ZHOU Xiaoyan, JI Xiaohao, et al. Virtual-flux-based model predictive direct power control for PWM rectifiers[J]. Electric Power Automation Equipment. 2017, 37(12): 123-129.
- [16] 赵仁德,贺益康. 无电网电压传感器三相 PWM 整流器虚拟电网磁链定向矢量控制研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(20):56-61.
ZHAO Rende, HE Yikang. Virtual line-flux-linkage oriented vector control of three-phase voltage source PWM rectifier without line voltage sensors[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 56-61.

Coordinated dispatch of power grid based on stochastic model predictive control

LI Hui¹, WANG Zhidong¹, WANG Xiao¹, PENG Chaoyi^{2,3}, HOU Yunhe^{3,4}, YIN Wenqian^{3,4}

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2. China Southern Power Grid Dispatching Center, Guangzhou 510530, China;

3. Department of Electrical and Electronic Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China;

4. Shenzhen Institute of Research and Innovation, The University of Hong Kong, Shenzhen 518057, China)

Abstract: Aiming at the problems brought by large-scale wind power integration to the operation and dispatch of power system, it is pointed out that the hourly fluctuation and uncertainty of wind power are the fundamental challenges, for which, the stochastic model predictive control is used for the modelling of system combined dispatch and operation with load response, and the global optimality of the operation strategy is verified mathematically. Case simulation verifies the importance of the flexibility of load response in hourly time scale to the economy of system operation and wind power accommodation.

Key words: wind power; hourly time scale; load response; stochastic model predictive control

(上接第 6 页 continued from page 6)

[17] 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.

[18] 卢子广, 林远, 胡立坤, 等. 新型三相 PWM 整流器无交流电压传感器控制方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 28-33.

LU Ziguang, LIN Yuan, HU Likun, et al. Three-phase PWM rectifier control without AC-voltage sensors [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 28-33.

作者简介:



孟岩峰

孟岩峰 (1980—), 男, 内蒙古武川人, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为风力发电控制与风电机组传动链地面测试技术 (E-mail: myf0512@mail.iee.ac.cn);

胡书举 (1978—), 男, 河南南阳人, 研究员, 博士, 主要研究方向为风力发电控制与可再生能源测试技术;

许洪华 (1967—), 男, 山东聊城人, 研究员, 硕士, 主要研究方向为风电、光电及其混合发电系统、可再生能源技术经济评价和政策。

AC voltage sensorless control method for grid-connected converter with parameter adaptive characteristics

MENG Yanfeng^{1,2}, HU Shuju¹, XU Honghua¹

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering,

University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To address the applicability of voltage observers in the current AC voltage sensorless control technology, an AC voltage sensorless control method based on parameter adaptive voltage observer is developed. The principle of voltage observer based on the SOGI (Second-Order Generalized Integrator) is described. A frequency adaptive control method for voltage observer is proposed, which takes advantage of real-time phase-locked loop feeding back grid frequency signal. On this basis, the vector relationship is analyzed using simplified model, in the case that the inductance parameters deviate from their actual values. Moreover, an improved voltage observer with adaptive characteristics of inductance parameters is proposed. By applying the improved control approach, AC voltage sensorless control of grid-connected converter with adaptive characteristics of frequency and inductance parameters can be realized, which improves the grid adaptability of the grid-connected converter.

Key words: grid-connected converter; AC voltage sensorless; AC voltage observer; parameters adaptive characteristics