

# 光伏并网逆变器电流线性调节器研究进展

万晓凤<sup>1</sup>, 胡海林<sup>1</sup>, 余运俊<sup>1,2</sup>, 辛建波<sup>2</sup>

1. 南昌大学信息工程学院, 南昌 330031
2. 江西省电力科学研究所, 南昌 330006

**摘要** 光伏并网逆变器是光伏电源与电网连接的电能转换与控制设备,对并网点电能质量控制起着关键作用。目前光伏并网逆变器中电流控制策略众多,调节器种类繁多,各种调节器从结构、实现手段及控制效果上相差较大。本文针对光伏并网逆变器直接电流控制策略的线性调节器(主要包括比例积分、比例谐振、无差拍调节器)进行比较,分别从算法优缺点、实现容易程度、实时性、稳态误差等进行评价,探讨3类调节器未来的研究和研究方向。

**关键词** 光伏并网逆变器;控制策略;直接电流控制;线性调节器

**中图分类号** TM46

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.16.013

## Current linear regulators of grid-connected photovoltaic inverter: A review

WAN Xiaofeng<sup>1</sup>, HU Hailin<sup>1</sup>, YU Yunjun<sup>1,2</sup>, XIN Jianbo<sup>2</sup>

1. College of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China
2. Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330006, China

**Abstract** The grid-connected photovoltaic inverter is the interface between photovoltaic energy sources and the grid, and it plays a key role in controlling the quality of grid at the point of common coupling. The current control methods of the PV grid-connected inverter is numerous, and there are a variety of current regulators, but there is a big difference between the regulators in control structure, realization method and effect of control. The PV grid-connected inverters are overviewed in the view of the current linear regulator. The main linear current regulators: proportional-integral, proportion resonance and deadbeat regulators are compared and evaluated in terms of advantage and disadvantage of algorithm, complexity of realization, real-time performance, steady-state error, etc. Some possible future research fields of the linear current regulator are discussed.

**Keywords** grid-connected photovoltaic inverter; control strategy; direct current control; linear regulator

光伏并网逆变器的直接电流控制策略可根据调节器分为线性和非线性调节器。其中线性调节器包括:比例积分调节器(proportional integral, PI)、比例谐振调节器(proportion resonance, PR)、无差拍调节器<sup>[1-3]</sup>。PI调节器通常应用与旋转坐标,算法易于实现。PR调节器一般用于静止 $\alpha\beta$ 坐标,理论

上可以实现参考量的无差跟踪,算法实时性好。无差拍调节器一般用于静止 $abc$ 坐标,比其他调节器具有更快的动态响应<sup>[4-8]</sup>。非线性调节器<sup>[9-14]</sup>主要包括:滞环调节器、模糊调节器、神经网络调节器、滑膜变结构调节器。本文对非线性调节器不做详细描述。

收稿日期:2015-03-18;修回日期:2015-06-10

基金项目:国家国际科技合作专项(2014DFG72240);国家科技支撑计划项目(2013BAA01B01);江西科技落地计划项目(KJD14006);江西省科技支撑计划项目(2013BBE50102)

作者简介:万晓凤,教授,研究方向为分布式发电与微电网、储能及其应用,电子信箱:xfwan\_jx@163.com;余运俊(通信作者),讲师,研究方向为光伏微电网智能控制、低碳电力,电子信箱:yuyunjun@ncu.edu.cn

引用格式:万晓凤,胡海林,余运俊,等.光伏并网逆变器电流线性调节器研究进展[J].科技导报,2015,33(16):81-87.

基于静止坐标系的控制器设计,采用PI调节器无法实现对交流参考量的无静差控制,从而引入基于旋转坐标系的PI电流控制策略,根据坐标系选择不同,其控制方法可分为基于电网电压定向的矢量控制和基于虚拟磁链定向的矢量控制<sup>[12-15]</sup>。基于旋转坐标系的并网光伏控制器的性能取决于电网电压矢量位置和虚拟磁链位置的准确获得。对于电网电压矢量位置的获取一般采用基于电网电压基波的锁相环(phase locked loop, PLL)技术<sup>[15-17]</sup>。而虚拟磁链定向时,由于虚拟磁链为电网电压的积分,积分的低通特性对电网电压的谐波分量有一定抑制作用,从而克服了电网电压谐波对矢量定位准确度的影响<sup>[14,18-20]</sup>。

采用PI调节器,虽然算法实现简单,参数易整定,但是需对坐标进行多次变换,同时其输出存在一定的稳态误差,无法实现对给定交流电流参考值的无静差控制,不易对系统低次谐波分量进行补偿。为此在静止坐标系下选用PR调节器,采用PR调节器无需进行坐标变化,并且能够得到更好的输出稳态特性,但是PR调节器在电网频率变化时会失去控制效果<sup>[18-20]</sup>。

无差拍控制是一种数字控制方法,比其他控制方法具有更快的动态响应。通过输出反馈信号和逆变器的空间状态方程计算下一个周期的PWM脉冲宽度是无差拍控制的主要思想,其中PWM脉冲宽度计算是由下一个采样时刻的参考信号正弦值和当前时刻的状态向量求得。调节器的算法延时及电感参数误差对调节器的稳定性影响较大,同时电流预测的准确度决定稳态误差大小<sup>[4,20]</sup>。

本文对光伏并网逆变器的主要控制策略进行分类和总结,对现阶段国内外常用线性调节器进行分析。

## 1 比例积分调节器

基于电网电压定向的旋转坐标,比例积分调节器将最大功率跟踪输出的功率作为逆变器输出的有功功率,再根据功率因素要求,得到无功功率,从而得出有功参考电流  $i_{dref}$  和无功参考电流  $i_{qref}$ 。

$$\begin{cases} i_{dref} = P_{ref}/u_{gd} \\ i_{qref} = -Q_{ref}/u_{gd} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $P_{ref}$  为有功功率参考值,  $Q_{ref}$  为无功功率参考值,  $u_{gd}$  为电网电压  $d$  坐标分量。

完成对参考无功和有功电流的控制即实现对有功功率和无功功率的跟踪控制<sup>[21-23]</sup>。PI调节器的传递函数为

$$G_{PI}(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} \quad (2)$$

式中,  $K_p$  为比例环节系数,  $K_i$  积分环节系数。

PI调节器在跟踪直流给定信号时,开环增益为无穷大,因此能对直流信号实现无静差控制。由于并网电流参考信号为正弦量,PI控制无法对它实现无静差控制<sup>[23-25]</sup>。在三相系统中通过  $dq$  变化将  $abc$  坐标系中的交流信号转换为  $dq$  坐标下的直流信号,从而实现了参考量的无静差控制。但在进行坐标变化时,需要获取电网电压的相位信息,所以电网电

压矢量位置的准确度将影响PI调节器的控制效果<sup>[1,25]</sup>。对于电网电压矢量位置的获取一般采用基于电网电压基波的锁相环(PLL)技术,以期实现对电网电压基波分量的准确定向。锁相环输出相位信息的实时性和准确度直接影响到调节器的性能,所以锁相环技术也是并网逆变器的一项关键性技术<sup>[26,27]</sup>。

同步旋转坐标下的PI调节器需要将交流量转化为直流量,然后采用PI调节器跟踪直流参考量,PI控制器方法简单有效,容易实现,在工程技术中应用成熟,但是需要复杂的坐标变换<sup>[27-31]</sup>,系统低次谐波分量不易补偿,在需要对系统低次谐波进行补偿时,各次谐波需要进行多次滤波和坐标变换,在滤除相应次负序分量时,计算量加倍,从而加大了算法的复杂程度和实现难度,损失动态响应能力<sup>[31-34]</sup>。

为提高并网的动态、静态性能,通常采用重复控制或模糊控制与PI相结合的组合控制策略。Liu等<sup>[28]</sup>提出重复控制与PI相串联的组合控制策略,串联组合控制对谐波的抑制能力受到PI参数的影响,并且控制结构相对较为复杂。武健等<sup>[29]</sup>和王成智等<sup>[30]</sup>提出重复控制与PI相并联的组合控制策略,在获得良好的电流动态响应性能的同时,能够有效地抑制电流谐波,但是PI调节器与重复调节器之间存在控制耦合,使得在并网逆变动态过程中容易发生电流畸变。张兴等<sup>[31]</sup>提出一种改进的PI与重复控制相并联的控制策略,一方面利用相位跟踪控制对传统的重复控制前馈通道加以改进,加快系统的动态响应。另一方面,对指令的信号延迟进行处理,实现误差的重新分配,抑制控制耦合。但是在处理动态延迟环节时,需要用到参数  $d$ ,而参数  $d$  的确定需要用到系统逆变器的电磁时间常数,所以需要建立准确的模型。Ma等<sup>[32]</sup>提出模糊PI控制,通过设计模糊规则得到PI控制参数,使系统获得更好的稳态性能和鲁棒性,仿真结果表明模糊PI控制在不同等级负载下,输出电流谐波畸变率小。

## 2 比例谐振调节器

静止  $abc$  坐标系下的比例谐振(PR)控制策略,由于静止  $abc$  坐标系不需要复杂的坐标变换,电流参考量为交流量,PR控制可以无误差的跟踪交流给定量,同时抑制网压基波频率扰动,并易于实现低次谐波补偿<sup>[4,35]</sup>。

PR调节器基于内模控制原理,传递函数为

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_R s}{s^2 + \omega^2} \quad (3)$$

式中,  $K_p$  为比例环节系数,  $K_R$  为谐振环节系数,  $\omega$  为谐振频率。

PR调节器在基波角频率处的增益为无穷大,若系统采用PR调节器,则在基波频率处系统的闭环传递函数  $\phi(s) \rightarrow 1$ ,理论上可以无差跟踪基波频率的输入信号。杨勇等<sup>[35]</sup>将三相并网逆变器有功电流和无功电流转换到静止坐标系下,将PR调节器的谐振频率设置为电网电压的基波频率,利用PR调节器对有功电流和无功电流进行跟踪。

PR调节器可实现对给定交流电流的无静差跟踪,并具有

抗电网电压基波扰动能力。由于PR调节器受到模拟元器件参数精度和数字系统精度的限制,PR调节器不易实现,同时PR调节器只能抑制电网电压基波频率的扰动,在实际电网频率发生偏移时,PR调节器将失效<sup>[33,34,36-38]</sup>。针对PR调节器在电网频率发生偏移时的失效问题,杨勇等<sup>[35]</sup>提出准比例谐振调节器(quasi proportional resonant,QPR),传递函数为

$$G_{QPR}(s) = K_p + \frac{2K_i \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (4)$$

式中,  $\omega_0$  为谐振控制的谐振频率,  $\omega_c$  为截止频率,  $K_p$  为比例环节系数,  $K_i$  为谐振环节系数。

PR调节器在非基频处增益非常小,当电网电压频率发生偏移时,PR调节器将失效,相反QPR调节器在非基频处也有较高的增益,从而可以有效地抑制电网电压频率发生波动。虽然QPR调节器虽然一定程度上解决PR控制器不易实现问题及频率偏移问题,但QPR实际上不是严格意义上的PR控制,是以系统静态误差为牺牲,换取电网频率偏移时的控制效果。

从杨勇等<sup>[35]</sup>的实验结果看,QPR控制策略能够实现逆变器单位功率因素运行,无功功率补偿运行,实现dq电流解耦控制,以及快速跟踪参考量,同时在单相电压幅值不平衡下,QPR控制策略较旋转坐标下的PI控制具有较好的输出电流控制效果。但是实验只定性地对逆变器单位功率因素运行,无功功率补偿运行,给定 $I_d$ 电流动态变化时动态响应,输出电流跟踪给定电流情况进行测试,以及单相电压幅值不平衡下,QPR控制策略和旋转坐标下的PI控制性能进行比较,没有对实验数据做定量的分析。在电网电压突变时,PR控制策略、QPR控制策略的实时性差。

在控制器采用PR、QPR调节器时,如需对多个频率的电网谐波进行抑制,则需要增加对应数量的调节器,显然数量众多的PR调节器不是进行谐波抑制的根本办法。在带LCL滤波器的逆变器中,为提高PR调节器的谐波抑制能力,Shen等<sup>[33]</sup>提出对2个电感上电流进行加权反馈的改进PR调节器,改进后的系统获得很大的开环增益并且系统获得很大的带宽,系统具有很强鲁棒性,并且输出电流畸变率小。

为提高传统的PR调节器对网压突变的抗干扰能力,马琳等<sup>[39]</sup>提出了带有网压瞬时值前馈的PR控制策略。但在实验过程中,发现当电网存在较大的非线性负载时,此算法将导致并网电流严重畸变。针对该问题,提出了带有比例系数的正序网压前馈控制策略,电压正序分量通过二阶广义积分正交计算获得<sup>[39]</sup>。

对比分析原信号与正序分量信号中1~5次谐波,正序分量消除了非线性负载引入的3次谐波,同时弱化了偶次谐波分量,采用正序分量作为前馈时,实际上相当于对特定谐波进行了滤波,对于正序分量不能抑制的谐波分量,仍会被引入系统。马琳等<sup>[39]</sup>通过引入网压前馈比例系数 $k_{ff}$ ,通过控制 $k_{ff}$ 大小,平衡系统的动态性能和并网电流质量。

马琳等<sup>[39]</sup>的实验结果表明,采用正序电压分量前馈比电压瞬时值反馈,能够获得更好地输出电流电能质量。同时对

比无网压前馈,网压瞬时值前馈,网压正序分量前馈,在电网电压发生畸变时的动态性能和电流质量,通过对比实验验证了网压正序分量前馈控制策略在电流跟踪速度和输出电流质量上都得到改善,综合了无网压前馈电流质量好,电压瞬时值反馈电流跟踪速度快的优点。

马琳等<sup>[39]</sup>的控制策略存在的问题:1) 对于电网频率发生偏移时,PR控制器控制效果不能保证,同时前馈控制器的控制效果也不能保证。2) 对于复杂并网电网情况中,前馈比例系数 $k_{ff}$ 大小对控制效果影响明显, $k_{ff}$ 没有自整定功能,需要根据不同运行环境进行调试选取。3) 实际上网压正序前馈控制是在电网电压突变情况下,对电流跟踪速度和电流质量两个指标之间做了一平衡。在电网电压无突变时,其输出电流质量比无网压前馈控制算法差。而在网压突变时,其动态性能又比不上网压瞬时值前馈控制算法。3种控制算法适用于不同的运行工况,需要组合控制才能发挥各自优点,但是组合控制增加系统控制算法复杂程度,不易于实现。

在电网频率波动时,谐振调节器的控制效果受到影响,尤其是工作在于3倍、5倍、7倍基波频率谐振点的谐振调节器,受影响尤为明显。为克服由于电网频率波动造成的PR调节器失效问题,El-Deeb等<sup>[34]</sup>利用锁相环使PR调节器的谐振频率与电网电压频率保持一致,并提出一种新的离散化方法,使离散化后的PR调节器可以有效满足频率可变和全故障频率变化范围,同时离散后的PR调节器对系统延时进行了补偿。仿真结果表明,改进后的PR调节器有很好的动态和静态性能,在电网频率变化时改进后的PR调节器有很强的鲁棒性。针对如何有效地提高PR调节器的抗电网频率扰动能力,降低其对电网频率波动的敏感性。刘斌等<sup>[40]</sup>提出了基于谐振频率自适应调整的比例谐振并网电流控制策略。控制策略框图如图1所示,其中虚框部分为谐振控制器,  $M = \frac{\omega_0^2}{H} \propto \omega_0^2$ ,  $M$  为市电频率对应变量,  $H$  为常数,  $M$  正比于谐振中心频率  $\omega_0^2$ , 调整  $M$  值就能够调整对应  $\omega_0$ 。

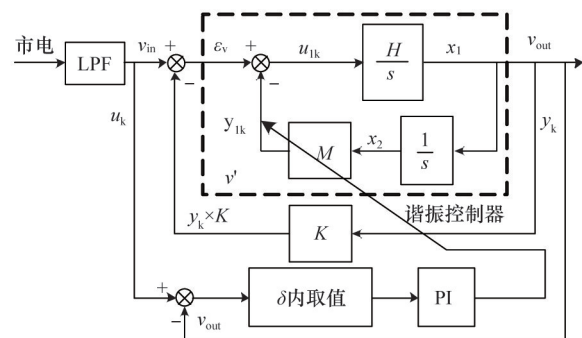


图1 基于谐振频率自适应调整的比例谐振并网电流控制框图  
Fig. 1 Diagram of frequency self-adaptive PR regulator

在输入信号  $v_{in}$  过零点为中心的小区间内(用符号  $\delta$  表示)近似成线性关系,在小区间内,输入信号与输出信号的差值( $\varepsilon_v = v_{in} - v_{out}$ )的正负即为控制量  $M$  的调整方向,通过  $\varepsilon_v$  作为误差输入信号对谐振控制器进行频率自适应控制。并

通过前欧拉法和后欧拉法对控制器进行离散化数字化。

刘斌等<sup>[40]</sup>的仿真实验结果,验证了在频率变化时及输入信号包含纹波时自适应谐振调节器的控制效果,  $M$  控制量的跟踪效果。并且对比分析了PI、PR、自适应PR控制器在电网频率跳变后控制效果,验证自适应PR控制器的优越性。

刘斌等<sup>[40]</sup>的控制策略存在的问题:1) 输入信号与输出信号的差值 ( $\varepsilon_v = v_{in} - v_{out}$ ) 计算对于整个控制系统  $M$  值误差影响很大,如何准确获取过零点电压,如何保证各种工况下差值的准确性问题,文献中没有涉及。2) 在电网电压突变情况下或者电网电压不平衡情况下,频率自适应算法失效。3) 需要在原来控制器基础上增加了滤波器环节以求得PR控制器谐振频率,增加算法复杂程度,牺牲控制算法实时性。

PR调节器无需进行多次坐标变换,能够实现对电流目标值的无差跟踪;算法实时性较PI调节器好,但对于电网电压频率波动的抗干扰能力差。对于PR调节器主要需要解决的问题在于如何提高PR调节器抗电网频率波动性能。

### 3 无差拍调节器

无差拍控制是一种数字控制方法,比其他的数字反馈控制方法具有更快的动态响应。无差拍控制的主要思想:以输出反馈信号和逆变器的空间状态方程作为基础,计算下一个周期的PWM脉冲宽度。

控制延时和系统参数变化时,控制器的鲁棒性差是无差拍控制的主要缺点,李春龙等<sup>[41]</sup>针对脉宽调制逆变器无差拍控制中,由于控制延时和系统参数变化引起的稳定性问题,建立Z域的传递函数,通过  $\omega'$  变换将Z域下新电流环传递函数转换到  $\omega'$  域,利用低频段时  $\omega'$  域与S域的相似性,借助波特图和Routh判据,详细分析了系统稳定性与延时系数及电感误差系数之间的关系。 $K$  为计算用电感值与实际电感值的比值,  $m$  为延时系数。通过分析变换后的特征方程,得到:为保证系统稳定应尽量减小延时时间且使得  $K \leq 1$ 。只要  $K < 1$ ,即使  $m = 0$  时,系统也稳定。为了使系统稳定裕度增加可以减小  $K$ ,但是  $K$  越小稳态误差越大。这种方法实际上是以动态和稳定性能的下降来换取稳定裕度的增加,  $K < 1$  时系统动态性能已达不到无差拍控制的效果。在实际应用中,延时通常已被控制到最小,只能调节  $K$ ,应结合具体情况在  $K < 1$  范围内选择合理的  $K$  值。李春龙等<sup>[41]</sup>实际对系统延时和电感参数变化引起的稳定性问题进行分析,对于实际参数设定有一定指导意义,但是没有给出对控制延时和系统参数变化引起系统不稳定的具体解决办法。

针对控制上的延时,为提高无差拍调节器性能,杨勇等<sup>[42]</sup>采用超前一拍控制进行补偿,假定被选择电压矢量在第  $k+1$  采样时刻应用,必须去预测第  $k+2$  采样时刻的电流。忽略电阻作用,得到

$$\begin{cases} u_{sa}(k+1) = \frac{L}{T_s} i_{sa}(k+2) + e_a(k+1) + e_a(k) - u_{sa}(k) - \frac{L}{T_s} i_{sa}(k) \\ u_{sb}(k+1) = \frac{L}{T_s} i_{sb}(k+2) + e_b(k+1) + e_b(k) - u_{sb}(k) - \frac{L}{T_s} i_{sb}(k) \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $u_{sa}$ 、 $u_{sb}$  为三相并网逆变器输出电压在  $a\beta$  坐标下的分量,  $e_a$ 、 $e_b$  为电网电压在  $a\beta$  坐标下的分量,  $i_{sa}$ 、 $i_{sb}$  三相并网逆变器输出电流在  $a\beta$  坐标下的分量,  $T_s$  为采样周期,  $L$  为滤波电感感量。

则预测第  $k+2$  采样时刻的电流为  $k$  采样时刻的给定值,即

$$\begin{cases} i_{sa}^*(k+2) = i_{sa}^*(k) \\ i_{sb}^*(k+2) = i_{sb}^*(k) \end{cases} \quad (6)$$

杨勇等<sup>[42]</sup>提出一种基于锁相环和虚拟磁链的无电网电压传感器控制策略,同时对使用惯性环节取代纯积分环节所带来的幅值和相位误差进行适当补偿。采用无网压传感器方案,关键是如何求出  $e_a$ 、 $e_b$ ,以得到准确的相角信息,以便在旋转坐标下进行电流解耦控制。如式(7)所示,对于电流进行微分时,在实际控制系统中容易放大噪声引入干扰,式中  $R$  为输出回路等效电阻。

$$\begin{cases} e_a = u_{sa} - L \frac{di_{sa}}{dt} - Ri_{sa} \\ e_b = u_{sb} - L \frac{di_{sb}}{dt} - Ri_{sb} \end{cases} \quad (7)$$

式中忽略电阻产生压降,采用基于锁相环的虚拟磁链观测器,避免微分环节引入干扰,可以准确获得相角信息。锁相环在电网发生畸变时,通过调整锁相环带宽,可以得到准确的电网角度信息,如式(8)、式(9)所示。

$$\begin{cases} \Psi_a = \int e_a = \int u_{sa} - Li_{sa} \\ \Psi_b = \int e_b = \int u_{sb} - Li_{sb} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} u_{sa}(k) = U_{dc}(k) \left[ S_a - \frac{1}{2}(S_b + S_c) \right] \\ u_{sb}(k) = U_{dc}(k) \frac{\sqrt{3}}{2}(S_b - S_c) \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\Psi_a$ 、 $\Psi_b$  分别为电网电压的合成虚拟磁链  $\Psi$  在  $a\beta$  坐标下的分量,  $U_{dc}$  为直流母线电压,  $S_a$ 、 $S_b$ 、 $S_c$  为三相并网逆变器输出电压的开关状态。

由于虚拟磁链信号对测量信号的干扰有很好地抑制,将两者结合起来形成了基于锁相环的虚拟磁链观测器,以获取准确的电网角度信息。采用一阶低通滤波器取代积分器,消除静态误差。由低通滤波器带来的相位和幅值误差由补偿网络进行补偿。

实验结果表明:增加补偿的无差拍预测控制改善系统延时,使输出电流畸变减小,增加低通滤波补偿环节,提高系统电流控制精度,消除电流相角超前。虚拟磁链空间角度线性度好。输出电流波形正弦度好,可以进行任意功率因素控制。

杨勇等<sup>[42]</sup>的控制策略存在的问题:1) 超前一拍控制的电流预测误差实际上为实际电流的跟踪误差,为电流预测误差的2倍,从而加剧了电网电流的畸变,影响系统稳态性能。2) 对于无差拍电流预测控制加补偿和不加补偿的对比测试,对输出电流没有做定量对比分析。不能充分体现加补偿控制的无差拍控制算法优越性。3) 对于控制算法中有功电流

$i_{\text{pref}}$ 、无功电流  $i_{\text{dref}}$  的参考值的获得,需要用到电网电压合成矢量  $\mathbf{E}_s$ ,但是由于采用无网压传感器方式,此处  $\mathbf{E}_s$  如何得到文献没有提及。4) 无差拍电流预测控制与基于虚拟磁链空间观测器和传统基于网压向量旋转坐标的PI控制的性能对比试验,没能充分体现无差拍控制优越性。

针对无差拍控制中,控制延时及电感值变化对系统控制稳定性产生的影响,陈燕东等<sup>[43]</sup>提出了一种基于鲁棒预测的无差拍控制方法。通过超前估测下一个采样周期的电网电压和并网电流,增强系统的鲁棒性。

$$u_{\text{inv}}(n) = \hat{u}_{s,\text{av}}(n+1) + \frac{K_L L_s}{T_s} [i_s^*(n+1) - \hat{i}_s(n+1)] \quad (10)$$

式中,  $u_{\text{inv}}(n)$  为  $n$  时刻逆变器输出电压平均值,  $i_s^*(n+1)$  为  $n+1$  时刻的参考电流,  $\hat{i}_s(n+1)$  为在  $n+1$  采样时刻预测的并网电流值;  $\hat{u}_{s,\text{av}}(n+1)$  为  $n+1$  采样周期预测的电压平均值,  $L_s$  为实际电感量,  $K_L$  为电感预测值与电感实际值的比值,  $T_s$  为开关采样周期。利用  $n$  时刻采样电网电压  $u_s(n)$  和  $n-1$  时刻采样电网电压  $u_s(n-1)$ ,通过线性差值法,可以预测第  $n+1$  采样周期内的电网电压平均值  $\hat{u}_{s,\text{av}}(n+1)$ :

$$u_{s,\text{av}}(n) = 1.5u_s(n) - 0.5u_s(n-1) \quad (11)$$

$$\hat{u}_{s,\text{av}}(n+1) = 2.5u_s(n) - 1.5u_s(n-1) \quad (12)$$

对于电流的预测,引入权重因子  $m$ ,  $m \in (0,1)$ ,可预测  $n+1$  采样周期的并网电流为

$$\hat{i}_s(n+1) = m \cdot \hat{i}_s(n) + (1-m) \cdot i_s(n) + \frac{T_s}{K_L L_s} [u_{\text{inv}}(n-1) - \hat{u}_{s,\text{av}}(n)] \quad (13)$$

式中,  $\hat{i}_s(n)$  为第  $n$  采样周期的预测电流。

电流内闭环传递函数为

$$G(z) = \frac{k_L(z-m)}{z[(z-m)z + (k_L-1)(1-m)]} \quad (14)$$

考虑到 PWM 动作时间  $T_d$ ,  $k_T$  为 PWM 延时的比例系数  $k_T = T_d/T_s$ ,则系统闭环特征方程为

$$z^3 - mz^2 + (1-m)(k_L - k_L k_T - 1)z + (1-m)k_L k_T = 0 \quad (15)$$

根据 Jury 稳定判据  $k_L k_T < \frac{1}{1-m} - \frac{1}{2}$ ,假定  $k_L \gg 1$ ,则系统稳定条件为  $k_T < \frac{1}{1-m} - \frac{1}{2}$ ,传统的无差拍控制 ( $m \rightarrow 0$ ),系统稳定条件为  $k_T < 0.5$ 。显然鲁棒预测控制极大增大了系统的稳定裕度。 $m > 1/3$ ,则对于延时  $T_d \in [0, T_s]$ ,系统均稳定。同时系统引入功率前馈控制,以加快外界条件变化时,系统的暂态响应,使得并网逆变器快速到达一个稳定状态。

实验结果表明,通过对比稳态下鲁棒预测无差拍控制和传统无差拍控制的直流侧波动和并网电流畸变率,说明鲁棒预测无差拍控制的优越性。同时通过实验验证了,鲁棒预测无差拍控制中滤波电感偏差对系统性能影响。当  $k_L < 1$  时,电感量主要引起系统的稳态误差。 $k_L > 1$  时,电感量偏差加大,导致电流畸变率进一步加大,直流侧电压波动加剧,从而使系统稳定性下降。

陈燕东等<sup>[43]</sup>的控制策略存在的问题:1) 鲁棒预测无差拍

控制,在网压跌落或者剧升时,线性差值法估算结果准确度受到影响,从而影响系统控制精度。2) 对于电流的预测,引入权重因子  $m$ ,  $m \in (0,1)$ ,  $m$  值大小需要根据电感实际情况进行选取,在实际系统中需要进行实际测量,才能的得到较好的控制效果。同时随着系统运行过程中电感量的变化,权重因子  $m$  不能实时变化,也会对系统控制效果产生影响。3)  $m$  值选取过大会削弱实时电流反馈,在电网异常时如电网电压三相不平衡,或者是带非线性负载时,鲁棒预测无差拍控制的实时性会受到一定影响。

在传统无差拍控制系统中无控制延时,一拍控制延时情况下,电感参数的偏差很容易引起系统不稳定,而在电流采样环节中引入一阶低通滤波环节,将进一步影响了电流环对电感参数的鲁棒性。针对以上问题,常采用超前一拍的预测电流控制算法,增强系统因电感参数所引起的稳定性问题,但是超前一拍控制的电流预测误差实际上为实际电流的跟踪误差,为电流预测误差的2倍,从而加剧了电网电流的畸变,影响系统稳态性能。高吉磊等<sup>[44]</sup>提出了一种基于重复观测器的无差拍控制策略,重复控制采用准积分  $k_q z^{-N}$ ,其中  $k_q$  为准积分系数,为了保证系统的稳定性,一般  $0 < k_q < 1$ ,本文取  $k_q = 0.9$ ,  $N$  为一个基波周期内的采样次数。 $k_r z^{-N+1}$  中  $z^{-N}$  即把上一基波周期相同采样时刻误差的  $k_r$  倍叠加到本次基波周期,用于对本基波周期的预测值进行补偿。进行补偿后,  $(k+1)T_s$  时刻电网电流的预测值为

$$\hat{i}_L(k+1) = \frac{T_s}{\hat{L}} [\hat{u}_g^{\text{av}}(k|k+1) - u_r^*(k-1)] + i_L(k) - \frac{K_r z^{-N+1}}{1-0.9z} e(k) \quad (16)$$

式中,  $\hat{u}_g^{\text{av}}(k|k+1)$  为  $kT_s \sim (k+1)T_s$  时刻的电网电压平均值,  $u_r^*(k-1)$  近似替代  $kT_s \sim (k+1)T_s$  时刻变流器侧电压,  $i_L(k)$  为  $kT_s$  时刻电网电流的瞬时值,  $K_r$  为上一基波周期相同采样时刻误差积分叠加到本次基波周期的倍数,  $e(k)$  为  $k$  时刻电流预测误差值,  $\hat{L}$  为  $kT_s \sim (k+1)T_s$  时刻的滤波电感感量平均值。

采用重复观测器后,在基波周期整数倍频率处,电流预测误差比开环电流误差降低了 16 dB,重复观测器的引入可以有效地减小等效电压误差引起的电流预测误差,提高电网电流预测精度,同时重复观测器的引入增强系统的鲁棒性。

通过实验对比得出开环电流预测算法,电流预测值存在误差,导致电网电流低次谐波含量增加,波形畸变,而加入重复观测器后可以提高电流预测值的精度,从而降低电流低次谐波含量,增强电流环的稳定性。

高吉磊等<sup>[44]</sup>的控制策略存在的问题:1) 重复观测器对电流预测值中的周期性误差带来的影响具有抑制作用,对于非周期性的误差无抑制作用,但在逆变器并网运行中存在很多非周期性干扰信号。2)  $k_r$  取值,只分析观测器稳定时  $k_r$  的取值范围,  $k_r$  取值关系到系统对电流误差预测值的准确度,影响到控制性能,但文献对  $k_r$  值的选取没有进行说明。

无差拍调节器算法简单,易实现,但是算法延时及电感参数对控制算法稳定性影响较大。系统稳态误差决定对电

流预测的准确性。对于无差拍调节器的主要研究方向为如何减小算法延时,提高电流预测准确度,以及算法延时及电感参数对系统稳定性影响等。

#### 4 分析与讨论

对于3类线性调节器性能比较见表1<sup>[1-8]</sup>。

表1 3类电流线性调节器性能比较

Table 1 Performance comparison between the current linear regulator

| 调节器名称  | 实时性分析                     | 稳态误差分析  | 算法实现难易程度分析 | 优缺点分析   |
|--------|---------------------------|---|------------|---|
| PI调节器  | 需要进行多次坐标变换,实时性一般。         | 锁相环算法需要在稳态误差和动态性能上做出平衡。锁相环稳态误差和动态性能决定PI调节器稳态误差。 | 算法较易实现     | 算法实现相对简单,参数整定简单,实现有功无功电流解耦可控;但是需要进行多次坐标变换,需要PLL算法实现矢量定位,系统低次谐波分量不易补偿。 |
| PR调节器  | 较少的坐标变换次数,相对PI控制而言,实时性较好。 | 理论上可以实现无稳态误差跟踪,但是由于电网电压频率波动采用QPR取代PR,牺牲一定的稳态误差。 | 算法实现难      | 无需进行多次坐标变换,能够实现电流目标值的无差跟踪;但对于电网电压频率波动的抗干扰能力差。                         |
| 无差拍调节器 | 算法简单,实时性好。                | 稳态误差决定于对于电流预测的准确。算法延时和电感参数的准确性决定系统稳定性。          | 算法易实现      | 延时及电感参数对控制算法稳定性影响较大。稳态误差决定于电流预测的准确性。                                  |

#### 5 结论

1) PI调节器一般应用于旋转dq坐标下,算法易于实现,但是存在一定稳态误差,且系统低次谐波分量不易补偿。PR调节器一般用于静止 $\alpha\beta$ 坐标,理论上可以实现无差跟踪,算法实时性好,但对于电网电压频率波动的抗干扰能力差。无差拍调节器一般用于静止abc坐标,算法延时及电感参数误差对控制算法稳定性影响较大,同时电流预测的准确度决定稳态误差大小。

2) 对于常规线性控制算法,一般采用前馈解耦控制,分别采用2个独立的调节器,控制相应有功、无功电流分量。而有功、无功分量间的动态耦合和直流侧电压利用率的约束,影响了电压型逆变器有功分量的动态响应。所以如何实现有功功率的快速响应也是一个重要研究方向<sup>[8]</sup>。

3) 线性控制算法均假设三相电网平衡,而实际电网常处于不平衡状态,即三相电网电压的幅值、相位不对称。一旦电网不平衡,以三相电网平衡为条件设计的逆变器调节器将失效,从而导致逆变器不正常运行。在电网不平衡条件下,电流线性调节器的研究,是为实现调节器在实时性,稳态误差和算法实现难易程度上的平衡。

4) 电网电压谐波对锁相信号的扰动问题,一般通过增加低通滤波器来减小电网电压谐波对锁相环的影响,加入低通滤波环节后系统控制带宽减小,影响其响应快速性。所以如何抑制电网谐波对并网电流的影响也是线性调节器值得研究的方向。

5) 目前,对于电流控制,多种控制策略的结合也是一个重要研究方向,比如将固定开关频率、滞环及空间矢量控制相结合的控制方法,以实现快速电流响应<sup>[8]</sup>。重复控制与PI

控制、PR控制及无差拍控制的融合。非线性控制方法与PI控制、PR控制及无差拍控制的融合等。

#### 参考文献(References)

- [1] Hassaine L, OLias E, Quintero J, et al. Overview of power inverter topologies and control structures for grid connected photovoltaic systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 30(6): 796-807.
- [2] Lidula N W A, Rajapakse A D. Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(1): 186-202.
- [3] Xue Y S, Chang L C, Kjaer S B, et al. Topologies of singlephase inverters for small distributed power odelings: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1305-1314.
- [4] 曾正, 杨欢, 赵荣祥, 等. 多功能并网逆变器综述[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 5-15.
- [5] Zeng Zheng, Yang Huan, Zhao Rongxiang, et al. Overview of multi-functional grid-connected inverters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 5-15.
- [6] 张兴, 张崇巍. PWM整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 5-45.
- [7] Zhang Xing, Zhang Chongwei. PWM rectifier and its control[M]. Beijing: China Machine Press, 2012:5-45.
- [8] Adrian Timbus, Marco Liserre. Evaluation of current controllers for distributed power generation systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 654-664.
- [9] Blaabjerg F, Chen Z, Kjaer S. Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1184-1194.
- [10] Yang S, Lei Q, Peng F Z, et al. A robust control scheme for grid-connected voltage source inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 202-212.
- [9] Carrasco J, Franquelo L, Bialasiewicz J, et al. Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1002-1016.
- [10] Araujo S V, Zacharias P, Sahan B. Novel grid-connected non-isolated converters for photovoltaic systems with grounded generator[C]//2008

- IEEE Power Electronics Specialists Conference Records. Rhodes, Greece: IEEE, 2008: 58-65.
- [11] Ciobotaru M, Teodorescu R, Agelidis V G. Offset rejection for PLL based synchronization in grid-connected converters[C]//Proceedings of the Applied Power Electronics Conference and Exposition 2008. Austin, TX, USA: IEEE, 2008: 1611-1617.
- [12] Kjar S B, Pedersen J K, Blaabjerg F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(5): 1292-1306.
- [13] Blaabjerg F, Teodorescu R, Liserre M, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 53(11): 1398-1409.
- [14] Martinez J A, Garcia J E, Arnaltes S. Direct power control of grid-connected PV systems with three level NPC inverter[J]. Solar Energy, 2010, 84(10): 1175-1186.
- [15] Ciobotaru M, Teodorescu R, Blaabjerg F. Control of single-stage single-phase PV inverter[C]//Proceedings of the IEEE 11th European Conference on Power Electronics and Applications. Dresden, Germany: IEEE, 2005: 1-10.
- [16] Zeng Z, Yang H, Zhao R X, et al. Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters of power quality enhancement: A comprehensive review[J]. Renewable Sustainable Energy Review, 2013, 24(7): 223-270.
- [17] Zhang L, Sun K, Xing Y, et al. A modular grid-connected photovoltaic generation system based on DC bus[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(2): 523-531.
- [18] Petersson A, Harnefors L, Thiringer T. Evaluation of current control methods for wind turbines using doubly-fed induction machines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(1): 227-235.
- [19] Zmood D N, Holmes D G. Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(3): 814-822.
- [20] Fukuda S, Yoda T. A novel current-tracking method for active filters based on a sinusoidal internal model for PWM invertors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(3): 888-895.
- [21] Teodorescu R, Blaabjerg F, Liserre M, et al. Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters[C]. IEEE Proceedings of Electric Power Applications, 2006, 153(5): 750-762.
- [22] Tsengenes G, Adamidis G. Investigation of the behavior of a three phase grid-connected photovoltaic system to control active and reactive power[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(1): 177-184.
- [23] Turitsyn K, Backhaus S, Cherkov M. Options for control of reactive power by distributed photovoltaic generators[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(6): 1063-1073.
- [24] Agirman I, Blasko V. A novel control method of a VSC without AC line voltage sensors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(2): 519-524.
- [25] Zhu H, Arnet B, Haines L, et al. Grid synchronization control without ac voltage sensors[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition 2003. Miami Beach, FL, USA: IEEE, 2003, 1(10): 172-178.
- [26] Monfared M, Golestan S. Control strategies for single-phase grid integration of small-scale renewable energy sources: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(7): 4982-4993.
- [27] 张治俊, 李辉, 张煦, 等. 基于单/双同步坐标系的软件锁相环建模和仿真[J]. 电力系统保护与控制. 2011, 39(11): 138-144.  
Zhang Zhijun, Li Hui, Zhang Xu, et al. Simulation and modeling of software phase-locked loop based on single/double synchronous coordinate system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 138-144.
- [28] Liu Tao, Hao Xiang, Yang Xu, et al. A novel repetitive control scheme for three-phase grid-connected inverter with LCL filter[C]//Proceedings of the Power Electronics and Motion Control. Harbin, China: IEEE, 2012: 335-339.
- [29] 武健, 何娜, 徐殿国. 重复控制在并联有源滤波器中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(18): 66-71.  
Wu Jian, He Na, Xu Dianguo. Application of repetitive control technique in shunt active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(18): 66-71.
- [30] 王成智, 邹旭东, 许赞, 等. 采用改进重复控制的大功率电力电子负载[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 1-9.  
Wang Chengzhi, Zou Xudong, Xu Yun, et al. Improved repetitive control scheme for power electronic load [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(12): 1-9.
- [31] 张兴, 汪杨俊, 余畅舟, 等. 采用PI+重复控制的逆变器控制耦合机理及其抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5287-5295.  
Zhang Xing, Wang Yangjun, Yu Changzhou, et al. Mechanism of the control coupling and suppression strategy using pi and repetitive control in grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5287-5295.
- [32] Ma C, Huang D G. Comparative Study of PI Controller and Fuzzy Logic Controller for three-phase grid-connected Inverter[C]//Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Beijing, China: IEEE, 2011: 2067-2071.
- [33] Shen G Q, Zhu X C, Zhang J, et al. A new feedback method for PR current control of LCL filter based grid connected inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(6): 2033-2041.
- [34] El-Deeb H M, Ahmed S, Massoud A M, et al. An adaptive PR controller for inverter-based distribution generation with active damped LCL filter[C]//Proceedings of the 2013 IEEE GCC Conference and Exhibition. Doha, Qatar: IEEE, 2013: 462-467.
- [35] 杨勇, 赵春江. 分布式发电系统中并网逆变器比例谐振控制[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11): 51-55.  
Yang Yong, Zhao Chunjiang. Proportional resonance controller of grid-connected inverter for distributed generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 51-55.
- [36] Zmood D N, Holmes D G, Bode G H. Frequency-domain analysis of three-phase linear current regulators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(2): 601-610.
- [37] Zmood D N, Holmes D G. Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(3): 814-822.
- [38] Teodorescu R, Blaabjerg F, Liserre M, et al. Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Proceedings-Electric Power Applications, 2006, 153(5): 750-762.
- [39] 马琳, 金新明, 唐芬, 等. 三相并网逆变器比例谐振控制及其网压前馈问题分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 56-63.  
Ma Lin, Jin Xinmin, Tang Fen, et al. Analysis of Three-phase grid-connected inverter proportional resonant control and grid voltage feed-forward[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 56-63.
- [40] 刘斌, 谢积锦, 李俊, 等. 基于自适应比例谐振的新型并网电流控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 186-195.  
Liu Bin, Xie Jijin, Li Jun, et al. Novel grid-connected current control strategies based on self-adaptive proportional resonant[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 186-195.
- [41] 李春龙, 孙琪, 白小青. PWM整流器无差拍电流控制中稳定性问题研究[J]. 电力电子技术, 2013, 47(8): 28-31.  
Li Chunlong, Sun Qi, Bai Xiaoqing. Research on stability of deadbeat current control in PWM rectifier[J]. Power Electronics, 2013, 47(8): 28-31.
- [42] 杨勇, 阮毅, 叶斌英, 等. 三相并网逆变器无差拍电流预测控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(33): 40-46.  
Yang Yong, Ruan Yi, Ye Binying, et al. Deadbeat predictive current control method for three-phase grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(33): 40-46.
- [43] 陈燕东, 罗安, 周乐明, 等. 一种功率前馈的鲁棒预测无差拍并网控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 62-70.  
Cheng Yandong, Luo An, Zhou Leming, et al. A robust predictive deadbeat grid-connected control method based on power feed-forward control[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 62-70.
- [44] 高吉磊, 黄先进, 林飞, 等. 基于重复观测器的PWM整流器无差拍控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 47-54.  
Gao Jilei, Huang Xianjin, Lin Fei, et al. Deadbeat control strategy for PWM rectifiers based on repetitive observer[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 47-54. (编辑 陈华姣)