

内置重复控制器的差拍控制在并网逆变器中的应用

朱立刚, 张建成, 丁晓哲, 王晓华

(华北电力大学电力工程系, 河北保定 071003)

Application of Beat Control with Plug-in Repetitive Controller in Grid-connected Inverter

ZHU Ligang, ZHANG Jiancheng, DING Xiaozhe, WANG Xiaohua

(Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

摘 要: 无差拍控制的光伏并网逆变器, 其存在电流预测复杂问题和控制延时问题, 可分别以采用差拍控制和减小控制增益为解决措施, 但会使输出电流相位落后于参考电流, 为进一步解决相位落后问题, 提出了一种内置重复控制器的差拍控制方法, 并给出了重复控制器的设计过程。该方法把相位落后视为一种周期性扰动, 利用重复控制对周期性扰动的校正作用, 通过内置重复控制器来抑制相位落后和电网电压谐波等周期性扰动因素, 结合了无差拍控制和重复控制二者的优势。仿真结果表明了该方法的可行性和有效性。

关键词: 并网逆变器; 无差拍控制; 重复控制器; 相位落后

Abstract: Photovoltaic grid-connected inverter controlled by deadbeat control has such problems as current predict complexity and control delay, and the beat control and decreased control gain are applied to solve these two problems respectively, but the phase of output current will lag behind that of the reference current. In order to solve the problem of phase lag, a beat control strategy with plug-in repetitive controller is presented in this paper, and the design process of the repetitive controller is also given. According to this strategy, the phase lag is taken as a kind of periodic disturbance, the plug-in repetitive controller is used to restrain such periodic disturbance as phase lag and network voltage harmonic by repetitive control, which combines both advantages of deadbeat control and repetitive control. Simulation results verify the feasibility and validity of the proposed strategy.

Keywords: grid-connected inverter; deadbeat control; repetitive controller; phase lag

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177047)

0 引 言

随着传统能源的日益消耗和环境污染问题的日益严重, 发展和利用可再生绿色能源已成为各国政府和学者的研究焦点。太阳能作为理想的绿色能源, 其光伏发电技术正在快速发展^[1]。逆变器作为光伏系统的核心部件, 其常用的控制策略有 PID 控制、无差拍控制、重复控制、准 PR 控制等^[2-5]。现有的控制策略虽然在一定程度上能满足控制要求, 但均存在各自的局限性。

无差拍控制拥有动态响应快、易于数字执行等优点^[5], 随着数字控制技术的进一步发展, 其优势将更加明显, 但它存在以下不足: 对于模型参数误差和死区时间等周期性扰动因素抑制效果不理想^[6]; 在控制过程中需要对下一时刻的期望电流值进行预测, 计算量大, 而预测算法的优劣又将影响到电流的预测精度及系统的鲁棒性能^[7], 这无疑对预测算法的设计提出了较高的要求和难度, 采用差拍控制可避免预测算法的设计问题, 它以实时期望电流值代替下一时刻期望电流值, 但其输出电流相比于参考电流会落后一拍^[8-9]; 作为一种数字控制方法, 由零阶保持器及计算时间产生的控制延时是其固有缺点, 将会导致系统振荡以至不稳定, 文献^[10-12]中提出的解决方法有减小控制增益或设计状态观测器, 前者应用较为简单, 但会使得输出电流与给定的参考电流之间出现相位差。重复控制作为一种基于内模原理的控制方法, 对于周期性扰动因素具有良好的校正作用, 但它动态性能较差, 控制作用需滞后一周才起作用^[3], 因此当参考电流的幅值发生变化后, 输出电流需经过一个周期才

能再次跟踪参考电流,无法实现及时跟踪。

针对上述问题,本文把采用差拍控制引起的输出电流落后一拍问题和减小控制增益带来的输出电流滞后问题均当作周期性扰动因素进行处理,进一步提出一种内置重复控制器的差拍控制策略。在建立并网逆变器数学模型的基础上,分析差拍控制和延时控制的影响,并合理设计重复控制器来修正相位落后、死区时间等周期性扰动因素。该控制策略原理简单,易于实现,解决了无差拍控制和重复控制的不足之处,同时可有效结合两种控制方法的优势,使系统具有优秀的稳态精度与动态性能。

1 传统无差拍控制

1.1 数学模型

本文所分析的并网逆变器的主电路原理图如图1所示,其中 U_{dc} 表示光伏阵列输出电能经过处理后的等效直流电压, L 表示滤波电感, i_L 表示并网电流, u_o 表示H桥的交流侧输出电压。

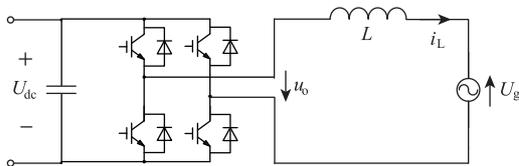


图1 并网逆变器原理图

由图1可列出方程

$$u_o = L \frac{di_L}{dt} + U_g \quad (1)$$

根据传统的无差拍电流控制算法对式(1)进行离散化处理,假设一个数字采样周期为 T ,离散后可知在第 n 个周期 $u_o(n)$ 的指令值为

$$u_o(n) = \frac{L}{T} [i_L(n+1) - i_L(n)] + \tilde{U}_{g,av}(n) \quad (2)$$

式中: $i_L(n)$ 为在 nT 时刻并网电流的瞬时值, $\tilde{U}_{g,av}(n)$ 为 nT 时刻到 $(n+1)T$ 时刻电网电压的平均值。为实现并网电流 i_L 能有效跟踪并网参考电流 $i_{L,ref}$,下个周期应该满足 $i_L(n+1) = i_{L,ref}(n+1)$,进一步可得H桥占空比 d 应满足

$$u_o(n) = d \times U_{dc} = \frac{L}{T} [i_{L,ref}(n+1) - i_L(n)] + \tilde{U}_{g,av}(n) \quad (3)$$

考虑到在无差拍控制中PWM信号的调制目标是使H桥输出与指令电压值等效的电压,因此可

认为逆变器等效增益 $K_{PWM} = 1$,可得无差拍控制离散结构框图如图2所示,其中控制增益 $D(z) = L/T$,电感传递函数 $G_L(s) = 1/sL$, $G_L(s)$ 在零阶保持器下离散化可得

$$G_L(z) = (1 - z^{-1})Z\left[\frac{G_L(s)}{s}\right] = \frac{T}{L} \times \frac{1}{z-1} \quad (4)$$

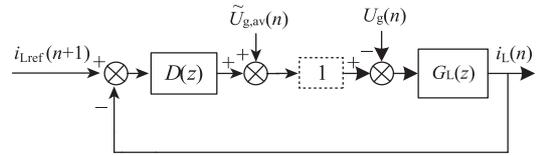


图2 无差拍控制离散结构框图

根据图2可知系统极点满足

$$1 + D(z)G_L(z) = 0 \quad (5)$$

即极点 $z=0$,系统稳定。

1.2 差拍控制及延时控制的影响

由式(3)可知,无差拍控制在控制过程中需要对下一时刻的期望电流值 $i_{L,ref}(n+1)$ 进行预测,由于预测算法的优劣会影响到电流的预测精度及系统的控制效果等,因此预测算法的存在不仅加大了计算量,还使系统设计变得更加复杂和困难。若在式(2)中令 $i_L(n+1) = i_{L,ref}(n)$ 进行计算,即采用差一拍控制,便无需考虑预测算法的问题,但在不考虑控制延时的情况下,其输出电流相比于参考电流会落后一拍。

另一方面,无差拍控制作为一种数字控制技术,需考虑控制延时问题,这部分延时来自信号滤波、AD采样、数字计算等环节,因此通常采用滞后一拍的控制方式^[6,10],即在并网逆变器传递函数的前向通道引入一个控制周期的延时,即图2中虚线框部分以 z^{-1} 代入,此时极点满足

$$1 + D(z)z^{-1}G_L(z) = 0 \quad (6)$$

即极点 $z = \frac{1 \pm j\sqrt{3}}{2}$,此时极点位于单位圆上,将出现 $1/6$ 采样频率的振荡,解决方法可以是减小控制增益,当增益系数 m 满足 $0 < m \times D(z) < D(z)$ 时,极点可以重新回到单位圆内,该方法应用简单,但会使输出电流与给定的参考电流之间出现较大的相位差^[6,10]。

2 内置重复控制器的差拍控制

基于前文分析,为了弥补无差拍控制的不足之处,本文首先采用差拍控制,并减小控制增益,然

后把两者带来的输出电流相位落后问题视为 50Hz 周期性扰动，利用重复控制对周期性扰动因素的校正作用，进一步提出了一种内置重复控制器的差拍控制策略，顺利实现了对并网参考电流的快速、准确跟踪。

内置重复控制器的差拍控制结构如图 3 所示，图中 m 为增益系数，用来减小控制增益； Q 为小于 1 的常数或具有低通性质的函数， Q 的存在可保证系统的稳定性； $C(z)$ 为补偿函数； N 为每个基波周期内的采样次数。

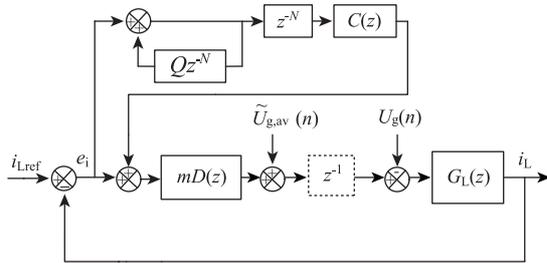


图 3 内置重复控制器的差拍控制结构图

根据图 3，可知系统的闭环传递函数为

$$\frac{i_L(z)}{i_{L,ref}(z)} = \frac{\{1 - z^{-N}[Q - C(z)]\} \frac{mD(z)z^{-1}G_L(z)}{1 + mD(z)z^{-1}G_L(z)}}{1 - z^{-N}[Q - C(z)] \frac{mD(z)z^{-1}G_L(z)}{1 + mD(z)z^{-1}G_L(z)}} \quad (7)$$

令 $P(z) = \frac{mD(z)z^{-1}G_L(z)}{1 + mD(z)z^{-1}G_L(z)}$ ，根据式(7)可知系统的稳定性条件为 $|z^N| = |Q - C(z)P(z)| < 1$ ， $P(z)$ 可看作该控制策略下重复控制器的等效控制对象。补偿函数常采用 $C(z) = K_r z^k S(z)$ 的形式， $C(z)$ 的设计目标是实现受控对象中低频段零增益、零相移，高频段快速衰减，因此需根据 $P(z)$ 的特性针对 $C(z)$ 展开设计。

在这里取 $m = 0.5$ 进行分析，则 $P(z) = \frac{1}{2z^2 - 2z + 1}$ ，采样频率取 10kHz，则 $N = 10\,000/50 = 200$ ， Q 则按照工程经验取 0.95。 $P(z)$ 的伯德图见于图 4，可见它在中低频段具有零增益的特性，无需针对中低频段进行幅值补偿， K_r 取 1 即可。 $P(z)$ 在高频段区间有幅值略微变大的现象，最大幅值约为 3dB(增幅很小)，因此无需特意为其设计梳状滤波器，针对高频段只需设计一个二阶低通滤波器使受控对象拥有高频衰减特性即可，在此选择滤波器的截止频率为 1000rad/s，阻尼系数为 0.6，得

$$S(s) = \frac{1\,000^2}{s^2 + 2 \times 0.6 \times 1\,000s + 1\,000^2} \quad (8)$$

离散化可得

$$S(z) = \frac{0.004\,802z + 0.004\,614}{z^2 - 1.878z + 0.886\,9} \quad (9)$$

最后根据 $P(z)$ 和 $S(z)$ 两者的合成相移大小来设计超前补偿环节 z^k ，当取 $k = 13$ 时，可使受控对象在中低频段拥有零相移特性。基于以上分析，补偿函数 $C(z)$ 设计如式(10)所示，其相应环节的伯德图同见于图 4。

$$C(z) = \frac{0.004\,802z + 0.004\,614}{z^2 - 1.878z + 0.886\,9} z^{13} \quad (10)$$

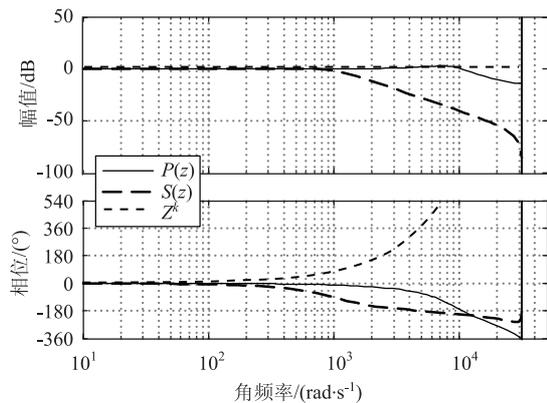


图 4 伯德图

基于图 3 和式(10)的改进差拍控制策略设计简单、易于实现，对相位落后、死区时间和通态管压降等周期性扰动因素均能起到良好的校正作用，可满足相关要求。

3 系统仿真分析

在 MATLAB/Simulink 平台上对内置重复控制器的差拍控制策略在逆变器中的控制效果进行了仿真实验，参数设计如下：直流侧电压 $U_{dc} = 400V$ ，H 桥开关频率为 10kHz，采样频率为 10kHz，滤波电感 $L = 5mH$ ，控制增益 $D(z) = L/T = 50$ ，电网电压 U_g 为 220V/50Hz。仿真结果如图 5~9 所示。

为了解决无差拍控制的电流预测复杂问题，可采用差拍控制，当不考虑控制延时问题时逆变器的并网电流仿真波形如图 5 所示。局部放大图可以看出输出电流在 0.030 1s 过零，表明采用差拍控制会使并网电流相比于参考电流落后一个采样周期，刚好落后一拍。

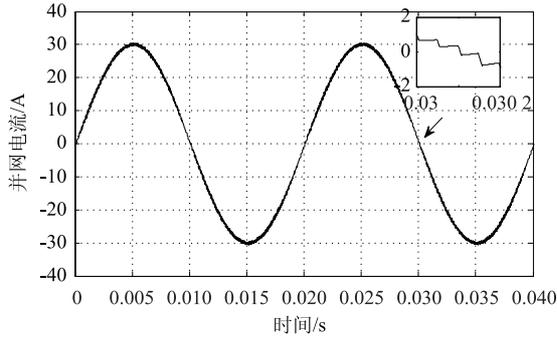


图5 采用差拍控制时的并网电流波形

在控制延时一拍的情况下，图6为当控制增益保持不变(增益系数 $m=1$)时，在差拍控制作用下逆变器的并网电流仿真波形。仿真结果可以看出输出电流以 $1/6$ 采样频率进行振荡，说明了无差拍控制的控制延时问题会导致系统振荡以至不稳定。

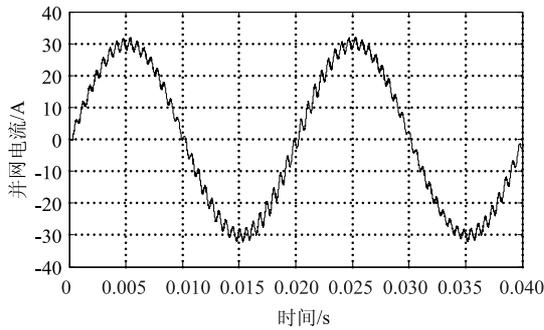


图6 $D(z)$ 不变时控制延时一拍的并网电流波形

为了解决无差拍控制的控制延时问题，可减小控制增益，即令增益系数 $m=0.5$ ，此时在差拍控制作用下逆变器的并网电流仿真波形如图7所示。仿真结果表明减小控制增益可使输出电流不再出现振荡现象，此时系统重新稳定，但输出电流与给定的参考电流之间会出现较大的相位差(约为 4.5°)，无法实现对参考电流的准确跟踪。

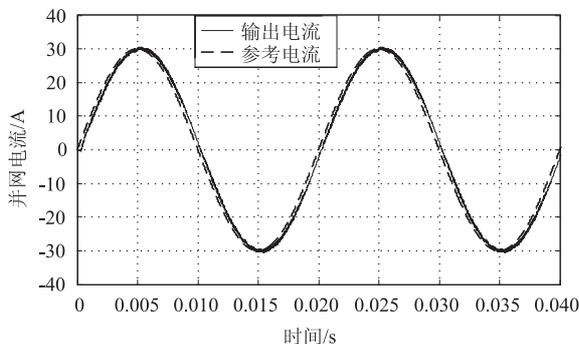


图7 $D(z)$ 减小时控制延时一拍的并网电流波形

在上述基础上，为了进一步解决采用差拍控制和减小控制增益带来的相位落后问题，本文采用内置重复控制器的差拍控制方法，此时逆变器的并网电流仿真波形如图8所示。仿真结果表明在第一个周期输出电流和参考电流仍然存在较大的相位差，而从第二个周期起输出电流和参考电流不再存在相位差，这是由于重复控制器需滞后一个周期后才能发挥控制作用，由此可见该控制方法解决了无差拍控制的不足之处，顺利实现了对参考电流的准确跟踪。

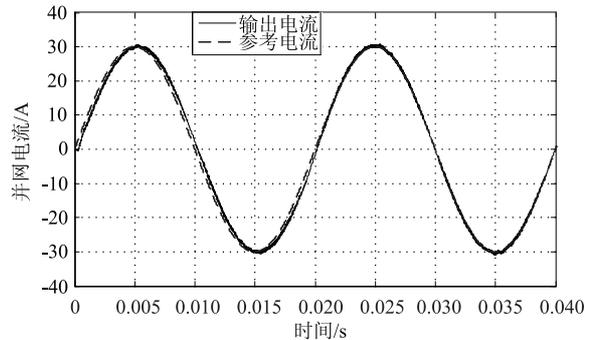


图8 内置重复控制器的差拍控制下的并网电流波形

为验证系统的抗干扰性能及动态性能，设置死区时间为 $3\mu s$ ，设置 IGBT 和二极管的导通压降均为 $0.7V$ ，并在电网电压中加入一定程度的谐波干扰，同时令参考电流幅值在 $t=0.06s$ 时刻发生变化，此时并网电流的仿真波形如图9所示。从仿真结果可以看出，周期性扰动因素对并网电流波形质量的影响受到抑制，系统可持续输出高质量的并网电流(放大后观察可知只有 $0\sim 0.02s$ 和 $0.06\sim 0.08s$ 两个周期由于重复控制器尚未作用而存在相位落后)；当参考电流幅值发生变化后输出电流可立刻跟踪，而若使用单独重复控制，输出电流幅值需在 $t=0.08s$ 后才能发生变化，可见该控制方法

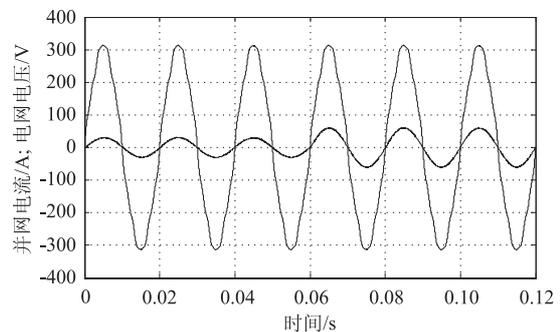


图9 周期性干扰下并网电流的动态仿真波形

保留了无差拍控制优秀的动态性能, 解决了单独重复控制动态性能较差的问题。

4 结 论

本文介绍了传统无差拍控制策略在光伏并网逆变器中的工作原理, 给出了系统的数学模型, 讨论了其存在的电流预测复杂问题和控制延时问题, 分别以采用差拍控制和减小控制增益作为这两个问题的解决措施, 其效果是简单而有效的, 但会导致输出电流相位落后于参考电流。本文在此基础上把相位落后问题视为一种周期性扰动, 构建了一个重复控制器对周期性扰动因素进行有效校正, 从而得到了一种内置重复控制器的差拍控制策略, 改善了无差拍控制的缺陷。仿真结果表明了该策略的有效性, 系统在存在干扰的情况下仍能实现对参考电流的准确快速跟踪。

参 考 文 献

- [1] 晋鹏娟, 赵兴勇, 梁元元. 光伏发电双模式运行无缝切换控制策略研究 [J]. 现代电力, 2014, 31(2): 55-59.
- [2] 董密, 罗安. 光伏并网发电系统中逆变器的设计与控制方法 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 97-102.
- [3] 马兆彪, 惠晶, 潘建. 基于重复 PI 控制的光伏并网逆变器的研究 [J]. 电力电子技术, 2008, 42(3): 25-27.
- [4] 周林, 张林强, 廖波, 等. 单相光伏逆变器控制技术的研究 [J]. 电网技术, 2012, 36(9): 25-30.
- [5] 黄天富, 石新春, 魏德冰, 等. 基于电流无差拍控制的三相光伏并网逆变器的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 36-41.
- [6] 梅红明, 刘建政. 基于电流观测器的三相变流器重复控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(27): 59-65.
- [7] 王宏佳, 徐殿国, 杨明. 永磁同步电机改进无差拍电流预测控制 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 39-45.
- [8] 彭晓涛, 程时杰, 宁联辉, 等. 差拍控制在有源电力滤波器中的应用 [J]. 继电器, 2004, 32(8): 40-44.
- [9] 路小俊, 杨雷雷, 吴在军. 基于无差拍控制的两级式单相光伏并网逆变器的研究 [J]. 低压电器, 2012(11): 18-22.
- [10] Hung G K, Chang C C, Chen C L. Analysis and implementation of a delay-compensated deadbeat current controller for solar inverters [J]. IEE Proc. Circuits, Devices and Systems, 2001, 148(5): 279-286.
- [11] 李春龙, 沈颂华, 卢家林, 等. 基于状态观测器的 PWM 整流器电流环无差拍控制技术 [J]. 电工技术学报, 2006, 21(12): 84-89.
- [12] Nishida K, Rukonuzzman M, Nakaoka M. Advanced current control implementation with robust deadbeat algorithm for shunt single-phase voltage-source type active power filter [J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 2004, 151(3): 283-288.

收稿日期: 2014-09-25

作者简介:

朱立刚(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式能源并网技术, E-mail: kobe497875695@126.com;

张建成(1965—), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为新型储能技术和可再生能源发电控制技术, E-mail: zhang_jiancheng@126.com;

丁晓哲(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏系统 MPPT 控制技术, E-mail: ncepu_dxz@163.com。

(责任编辑: 杨秋霞)