

单相光伏并网逆变器控制系统分析与仿真研究

吴 威

(扬州供电公司, 江苏 扬州 225000)

摘 要: 介绍了单相光伏并网逆变器的拓扑结构, 建立数学模型。随后, 对目前常用的电流控制策略进行研究, 并在此基础上, 提出一种基于重复控制和带有谐波补偿功能的比例谐振电流控制策略。最后, 采用 MATLAB/Simulink 平台搭建光伏并网发电系统的仿真模型, 根据仿真结果进行相关的特性分析。

关键词: 光伏并网逆变器; 电流控制技术; simulink 仿真平台

0 引言

并网逆变器是光伏发电系统的核心器件, 其性能的优劣直接关系到输出电能的质量。与一般的逆变器相比, 光伏逆变器需要面临输入功率的随机变化, 同时还需要对孤岛效应的发生做出及时有效的响应。因此, 控制策略的研究变得尤为重要^[1]。

1 单相光伏并网逆变器的系统结构与数学模型

1.1 单相光伏并网发电系统电路与控制目标

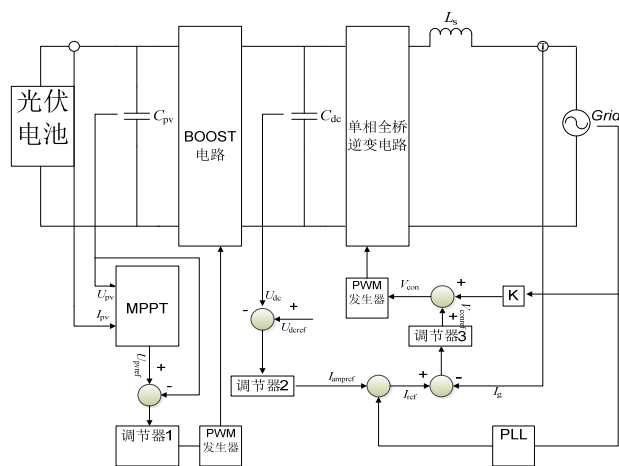


图1 单相光伏并网发电系统控制流程图

图1给出了单相两级式光伏并网发电系统的电路图, 前级DC-DC直流变换器采用BOOST升压电路, 后级逆变器采用单相全桥电路, 电容 C_{pv} 、 C_{dc} 起到缓冲和稳压的作用, 逆变器输出串联一阶L滤波器与电网直接相连。

整个发电系统的控制目标可以描述为:

(1) 前级 BOOST 升压电路的主要功能是将

光伏电池输出电压泵升到直流母线所需的电压等级, 同时采用 MPPT 控制策略, 使得光伏阵列在最大功率点处运行。

(2) 后级单相全桥逆变电路的主要功能是保持直流母线电压稳定在参考值附近, 并通过电流控制环节, 使得并网电流与电网电压同频同相, 并且满足并网标准。由于前后两级的控制目标相互独立, 因此在控制策略和控制环节上面都实现了解耦, 这也是两级式系统相对于单级式系统的优势之一。

1.2 单相光伏并网逆变器的拓扑结构与数学模型^[2]

由 1.1 节的分析可知, 光伏发电系统的前后两级实现了独立解耦控制, 因此, 本小节将单独对逆变环节进行分析研究。

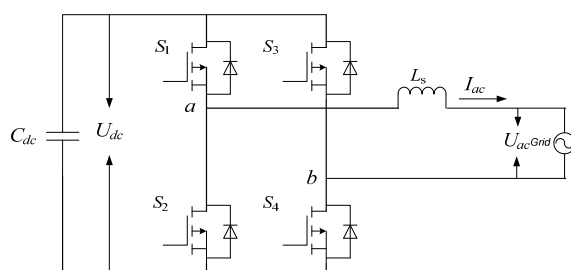


图2 单相全桥逆变器拓扑结构

图中, $S_1 \sim S_4$ 为 MOSFET 高频开关器件; C_{dc} 为直流母线电容, 起到稳压和缓冲的作用; L_s 为电感, 起到滤波的作用; U_{dc} 为直流母线电压, I_{ac} 为输出并网电流, U_{ac} 为交流侧电网电压。该电路可以用方程组描述为:

$$L \frac{di_{ac}}{dt} = u_{ab} - u_{ac} \quad (1)$$

$$C \frac{du_{dc}}{dt} + i_{ab} = 0 \quad (2)$$

其中:

$$U_{ab} = u \times U_{dc} = \begin{cases} U_{dc} & S_1 \text{ 和 } S_4 \text{ 导通} \\ 0 & S_1 \text{ 和 } S_2 \text{ 或 } S_3 \text{ 和 } S_4 \text{ 导通} \\ -U_{dc} & S_2 \text{ 和 } S_3 \text{ 导通} \end{cases} \quad (3)$$

$$i_{ab} = u \times i_{ac} = \begin{cases} i_{ac} & S_1 \text{ 和 } S_4 \text{ 导通} \\ 0 & S_1 \text{ 和 } S_2 \text{ 或 } S_3 \text{ 和 } S_4 \text{ 导通} \\ -i_{ac} & S_2 \text{ 和 } S_3 \text{ 导通} \end{cases} \quad (4)$$

光伏系统输出的有功功率和无功功率分别表示为:

$$P = U_{ac} I_{ac} \cos \theta \quad (5)$$

$$Q = U_{ac} I_{ac} \sin \theta \quad (6)$$

式中, U_{ac} , I_{ac} 分别为电网电压和并网电流, θ 为相位差。

式 (1) ~ (6) 即为单相光伏并网逆变器的数学模型。

2 并网电流控制算法分析

2.1 PI 控制

PI 控制算法简单, 系数对系统元件参数的依赖度较低, 易于整定, 鲁棒性好, 可靠性高, 广泛应用于自动控制领域。传递函数如式 (7) 所示, 由式可知, 系数 K_p 、 K_i 的选取决定了该控制算法性能的好坏。

$$G(s) = \frac{k_p s + k_i}{s} \quad (7)$$

PI 控制系统理论来说是一个无差调节系统, 但时, 当被控制量是正弦参考量时, 无法实现稳态零误差, 具有一定的局限性。

2.2 重复控制 (RC, Repetitive control)

重复控制是基于内模原理的一种控制理论, 其基本思想是假定在前一基波周期中出现的波形畸变在下一基波周期的同一时刻重复出现, 给定信号与反馈信号的差值经过控制器输出校正信号, 该信号在下一个基波周期中与控制信号相加, 以此来消除波形处出现的重复畸变。由于重复控制器内存在基波周期延迟环节, 输出逐周期进行调节, 在负载产生阶跃变化的第一个基波周期内, 重复控制器不产生任何调节作用, 等同于开环状态, 动态响应较差^[3]。

2.3 谐振控制

谐振控制也是一种基于内模原理的控制理论, 该算法实现简单, 鲁棒性好, 不依赖系统元件参数, 是目前研究比较热门的控制算法之一。其基本思想是, 根据内模原理, 将被控信号的动力学模型嵌入到控制回路之中, 控制系统会对该信号进行稳态零误差跟踪甚至将误差完全消除^[4]。式 (8) 给出了谐振控制的传递函数, 由式可知, 谐振在指定频率 ω 处增益为无穷大, 而在非谐振频率处增益很小, 因此, 在算法中增加指定频率处的谐振控制, 对该频率信号的跟踪误差理论上具有无穷大的衰减作用。

$$G(S) = \frac{2K_R S}{S^2 + \omega^2} \quad (8)$$

式中: K_R 为谐振增益; ω 为电网基波角频率。

工程实践中, 受到数字系统以及模拟系统参数精度的限制, 谐振控制不易实现, 当电网频率发生偏移时, 在非基频处增益非常小, 不能有效抑制电网引起的谐波干扰, 因此, 在工程应用中, 较多地采用准谐振控制算法, 该算法既可保持控制器的高增益, 同时还可以减小电网频率偏移对并网电流波形的影响。其传递函数如式 (9) 所示:

$$G(S) = \frac{2K_R \omega_c S}{S^2 + 2\omega_c S + \omega_o^2} \quad (9)$$

式中 ω_c 不仅关系到控制器的增益, 也与控制器的带宽密切相关, 因此, 该值的选取决定了准谐振控制器的控制效果。

3 单相逆变器控制策略

3.1 双闭环控制分析

单相并网逆变器采用双闭环控制策略, 并引入电网电压前馈技术。控制流程如图 3 所示, 具体描述为:

(1) 采样直流母线电压信号 U_{dc} , 与设定参考值 U_{dc}^* 相比较, 差值经过调节器 1, 产生参考电流的幅值 I_{ampref} ;

(2) 利用锁相环获取电网的相位, 该相位信号与步骤 (1) 中所述的参考电流的幅值 I_{ampref} 相乘, 产生并网参考电流信号 I_{ref} ; 该信号与电网实际电流信号 I_g 相减, 差值进入调节器 2, 产生 V_{conref}

信号;

(3) 采样电网电压信号 U_g , 该信号经过调节器 3 之后, 与步骤 (2) 中的 V_{conref} 信号相加, 产生信号 V_{con} 经过 PWM 发生器驱动逆变电路工作。

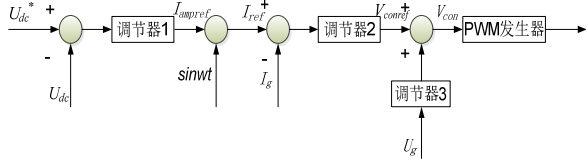


图 3 双闭环控制流程图

电网电压前馈技术, 可以从理论上降低噪声扰动, 减轻反馈控制的调节负担, 减小误差, 有利于增强系统的稳定性。

电压外环一般采用 PI 调节即可满足控制要求, 电压可以保持较高的稳定性, 电流环节的控制是并网逆变器研究工作的关键。

3.2 并网电流内环控制

图 4 为电流内环控制框图, 其控制逻辑具体描述为: 当 I_{ref}^* 大于 I_g 时, 两者差值增加, 通过 PI 调节器之后, 控制信号 V_{con} 也随之增加, 最终使输出电流 I_g 增加, 误差值将会减小, 从而形成了一个闭环控制系统。在电流内环的控制环节中引入电网电压前馈技术, 消除图中 U_g 的扰动对系统造成的影响, 同时也减轻了 PI 调节器的负担。

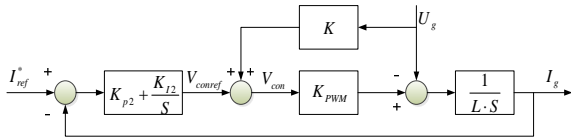


图 4 电流内环控制框图

由于逆变环节的开关频率为 10 kHz, 远高于电网频率, 为了便于分析, 可将 PWM 单元近似看作一个增益环节 K_{PWM} 。要从理论上消除 U_g 的干扰, 设计参数需要满足式 (12):

$$U_g \cdot K \cdot K_{PWM} - U_g = 0 \quad (12)$$

由表达式可知, 当:

$$K = \frac{1}{K_{PWM}} \quad (13)$$

表达式成立, 由 K_{PWM} 的定义可以得到:

$$K_{PWM} = \frac{U_{ab}}{V_{con}} \quad (14)$$

式中 U_{ab} 如图 2 中所示, V_{con} 为载波幅值, 其值为 1。

式 (15) 给出了电流内环的传递函数, 电流环可以看作一个典型的二阶系统。

$$G_{Iclose}(s) = \frac{I_g(s)}{I_{ref}^*(s)} = \frac{\left(\frac{K_{PWM} \cdot K_{P2}}{L}\right) \cdot s + \frac{K_{PWM} \cdot K_{I2}}{L}}{s^2 + \left(\frac{K_{PWM} \cdot K_{P2}}{L}\right) \cdot s + \frac{K_{PWM} \cdot K_{I2}}{L}} \quad (15)$$

4 并网电流控制策略研究

4.1 基于准 PR 和谐波补偿 (HC) 的并网电流控制策略^[5]

传统的 PI 控制参数整定比较复杂, 并且对正弦参考量难以消除稳态误差, 为了解决上述问题, 本文采用比例谐振控制策略, 该策略是根据光伏并网逆变器控制目标和数学模型提出来的。

根据第 2 节的分析, 比例谐振控制器的传递函数如下:

$$G(S) = K_p + \frac{2K_R S}{S^2 + \omega^2} \quad (16)$$

考虑到实际工程中的实用性, 本文采用准比例谐振控制器, 其传递函数表达式为:

$$G(S) = K_p + \frac{2K_R \omega_c S}{S^2 + 2\omega_c S + \omega_o^2} \quad (17)$$

其简化的控制框图如图 5 所示。

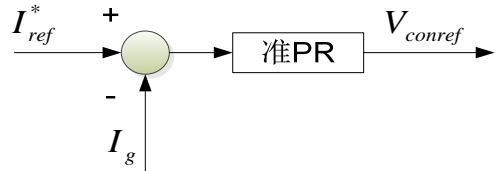


图 5 准 PR 简要控制框图

很多学者研究将准 PR 应用于光伏并网逆变器的控制之中, 该算法具有很好的动态响应能力和稳态跟踪性能, 但是仍然存在大量的高次奇数谐波, 影响了输出波形的质量, 因此, 需要在此基础上对相应次数的谐波进行补偿, 本文采用特定次谐波补偿 (HC, Harmonic compensator) 控制来解决这个

问题。

谐波补偿控制算法的传递函数如式 (18) 所示:

$$G_{HC}(S) = \sum_{h=3,5,7,9,\dots} \frac{2K_{RH}\omega_{ch}S}{S^2 + 2\omega_{ch}S + (h\omega_0)^2} \quad (18)$$

式中, K_{RH} 为 h 次谐波对应的谐振系数; ω_{ch} 为 h 次谐波对应的谐振频率附加项; $h\omega_{ch}$ 为 h 次谐波对应的谐振频率。

将该算法嵌套于准 PR 控制器之中, 其传递函数及控制框图如式 (19) 和图 6 所示。

$$G(S) = K_p + \sum_{h=1,3,5,7,9,\dots} \frac{2K_{RH}\omega_{ch}S}{S^2 + 2\omega_{ch}S + (h\omega_0)^2} \quad (19)$$

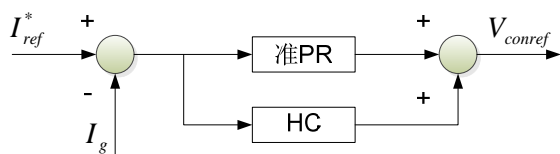


图 6 准 PR+HC 控制简要框图

根据上述的分析, 在 MATLAB/Simulink 平台搭建光伏逆变系统仿真模型, 对准 PR 控制、准 PR+HC 控制策略进行对比研究。

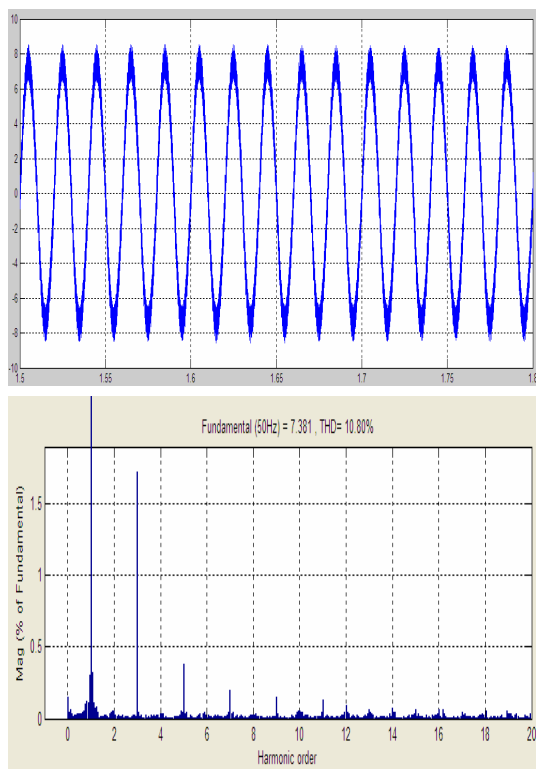


图 7 准 PR 控制的电流波形和谐波分析

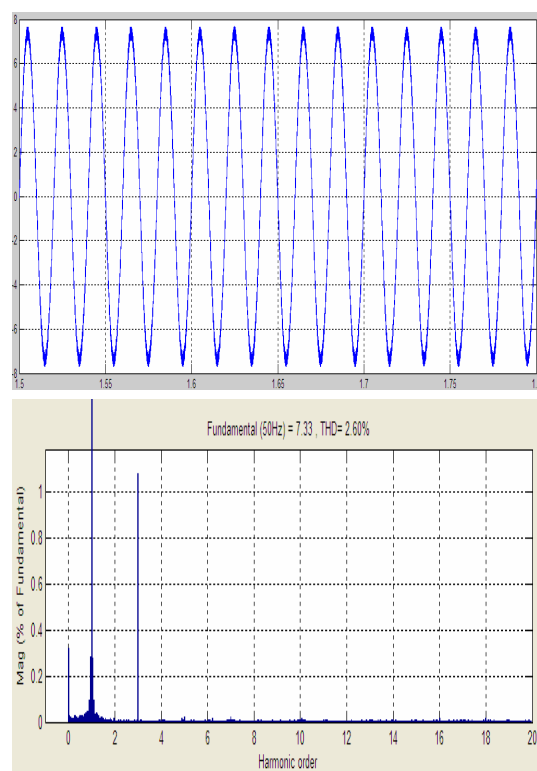


图 8 准 PR+HC 控制的电流波形和谐波分析

由两种算法的对比仿真 (图 7、8) 可以看到, 采用准 PR+HC 控制较单独采用准 PR 控制, THD(总谐波失真度)从 10.8%降到 2.6%, 3, 5, 7, 9 等奇次谐波明显得到了降低, 具有更优异的稳态性能。

4.2 一种复合型并网电流控制策略

从图 8 可以看到, 输出电流波形仍然存在一定含量的高频奇次谐波, 在稳态运行状态下重复出现的波形畸变问题, 并没有得到很好地解决, 而重复控制能够消除波形周期性畸变, 并且其控制简单, 容易实现, 在实际工程中也得到了一定程度的应用。本文提出一种基于重复控制和带有谐波补偿功能的准比例谐振控制的复合型并网电流控制策略, 将重复控制的优势体现出来, 对输出波形进行进一步优化。

该复合型控制策略具体描述为: 将准 PR 控制器、HC 控制器、RC 控制器并联使用, 电流误差信号, 分别经过三个控制器, 再将输出的控制信号相互叠加, 得到最终的控制信号, 驱动逆变器工作。图 9 给出了该算法的简要控制框图。

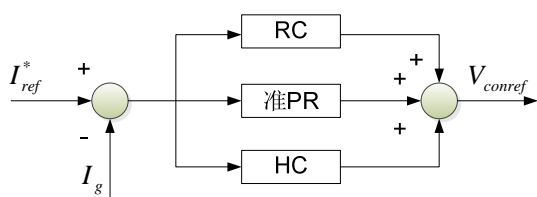


图9 复合型控制简要框图

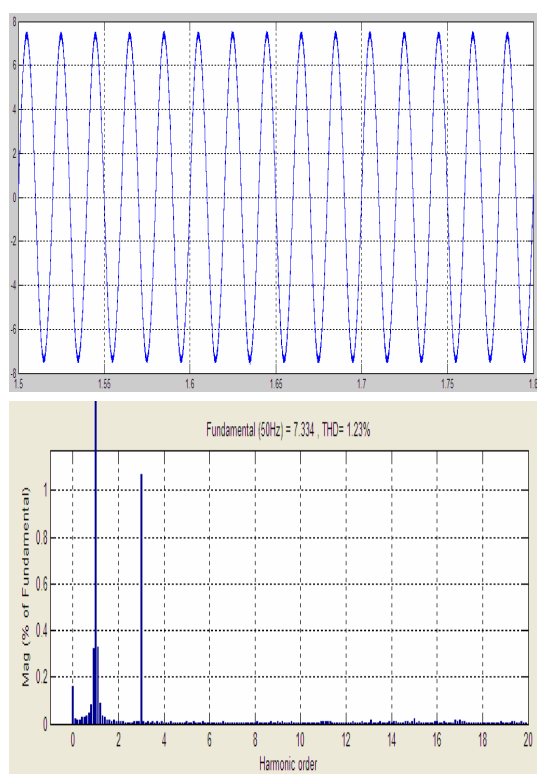


图10 采用复合型控制算法得到的并网电流波形和谐波分析

由图10可知,采用该复合控制算法,THD从原来的2.6%下降到1.23%,大大降低了高次谐波的干扰,重复控制能够消除周期性波形畸变的特点,得到了明显的体现。

5 结束语

本文采用直流母线电压外环,并网电流内环的双闭环控制方案,外环采用PI控制稳定电压,内环采用一种复合式并网电流控制算法,具体表述为:采用准比例谐振控制改善并网逆变器的动态性能;引入谐波补偿控制,消除特定低次谐波;叠加重复控制,消除周期性畸变的干扰。并引入电网电压前馈技术,从理论上消除电网波动对输出电能质量的影响。最后,搭建仿真模型,仿真结果表明,本文所提出的复合式控制策略,在稳态性能、动态响应、高奇次谐波的控制等都具有明显的优势。

参考文献:

- [1] 王辉.户用光伏并网系统的分析与研究[D].武汉:华中科技大学,2007.
- [2] 殷桂梁,杨丽君,王琨.分布式发电技术[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [3] Y.Thiagarajan, T.S.Sivakumaran, P.Sanjeevikumar. Design and simulation of fuzzy controller for a grid connected stand alone PV system[J].IEEE Transactions on ICCCN,2008:01-06.
- [4] 陈燕东,罗安,谢三军,等.一种无延时的单相光伏并网功率控制方法[J].中国电机工程学报,2012,32(25): 118-125.
- [5] 戴训江,樊艳芳.基于阻尼谐振的光伏并网逆变器谐波补偿控制[J].电力自动化设备,2011,31(1):79-83.

作者简介:

吴威(1987-),男,江苏扬州人,硕士研究生,从事变电检修工作。