



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20180386

光伏功率调节比例谐振二阶谐波抑制方法

游国栋, 徐涛, 王军, 沈延新, 苏虹霖, 李继生, 侯晓鑫
(天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

摘要: 在光伏发电并网系统中, 逆变器会产生一个两倍基频的二阶谐波, 其存在会影响工作点并恶化最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT), 本文设计了一种新的光伏功率调节系统(power conditioning systems, PCS)的二阶谐波抑制技术, 采用一个具有前馈补偿技术的比例谐振(proportional-resonant, PR)控制器, 在 Matlab 环境下进行建模仿真, 结果表明该方法可以准确提取并抑制二阶谐波分量, 优化系统结构.

关键词: 光伏; 功率调节系统; 比例谐振控制器; 二阶谐波

中图分类号: TK51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2020)01-0076-05

Photovoltaic Power Conditioning System Controlling Second-order Harmonic Wave with a Proportional-resonant Controller for

YOU Guodong, XU Tao, WANG Jun, SHEN Yanxin, SU Honglin, LI Jisheng, HOU Xiaoxin
(College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology,
Tianjin 300222, China)

Abstract: In the grid-connected system of photovoltaic (PV), inverters create a second-order harmonic wave twice the fundamental frequency, which can affect the operating points of the PV array and deteriorate the operation of the maximum power point tracking (MPPT). A new second-order harmonic wave controlling technique for the PV power conditioning system (PCS) was developed in this research. A proportional-resonant (PR) controller with feed-forward compensation was adopted and simulated in MATLAB environment. Simulation results show that the method could truly extract and restrain the second-order harmonic wave and optimize the PV generation system.

Key words: photovoltaic; power conditioning system; proportional-resonant controller; second-order harmonic wave

在不同的环境条件下, 当光伏发电系统连接到电网时, 对输入功率的有效控制仍是一个需要考虑的重要问题. 为优化光伏系统的并网发电, 国内外许多学者对光伏功率调节系统(power conditioning systems, PCS)^[1-3]方法进行了研究. 光伏 PCS 通常由一个 DC/DC 变换器和 DC/AC 逆变器组成. 为了补偿系统中的谐波, 文献[4]提出了一种自适应谐波下垂控制算法抑制谐波, 但存在不足之处, 如失谐、共振、不稳定和限制频率调整等, 影响了系统的输出性能. 文献[5]对单相微电网二次谐波和系统的稳定性进行了分析. 文献[6]将光伏逆变器设计为一个“虚拟电阻”,

进而提出了一种具有低次谐波抑制功能的光伏逆变器, 所提控制方法可以有效抑制公共连接点低次谐波.

对于比例谐振(proportional-resonant, PR)控制器, 由于谐振频率增益无限大, 既能消除稳态误差, 又能实现负载电流的失真最小化, 且 PR 控制器可用作谐振频率的数字滤波器, 又无需额外的设备, 因此本文设计一种新的光伏功率调节系统的二阶谐波抑制技术, 系统中采用一个具有前馈补偿技术的比例谐振控制器. 结果证明该方法对系统逆变器产生的二阶谐波分量能够准确地提取和有效地抑制, 是解决光伏功率调节系统二次谐波的一种新方法.

收稿日期: 2018-10-29; 修回日期: 2019-02-23

基金项目: 天津市科技支撑重点项目(17YFZCNC00230;13JCZDJC29100); 天津科技大学实验室创新基金资助项目(1902A030)

作者简介: 游国栋(1973—), 男, 山西榆社人, 副教授, yougdong1973@sohu.com.

1 光伏阵列及 PCS

1.1 光伏阵列

光伏系统由太阳能电池阵列组成,图1为太阳能电池等效电路。 R_p 为并联电阻; R_s 为串联电阻; I_{ph} 为光生电流; I_0 、 I_{pv} 和 U_{pv} 分别为光伏电池暗饱和电流、输出电流和输出电压。

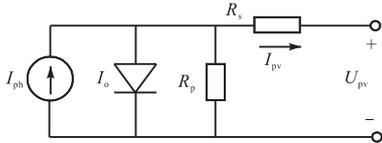


图1 光伏电池等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of a PV cell

光伏阵列输出电流的数学模型为

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{o1} \left[\exp\left(\frac{q(U_{pv} + I_{pv}R_s)}{AK_bT_k}\right) - 1 \right] - \frac{U_{pv} + I_{pv}R_s}{R_p} \quad (1)$$

式中: I_{o1} 为二极管饱和电流; q 为电荷常量($q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$); A 为二极管理想系数; K_b 为波尔兹曼常数; T_k 为光伏电池的温度。

在局部阴影条件下,由于光伏系统上分布的光照强度不同,光伏系统数学模型(1)不再有效。在阴影条件下具有一般性的光伏数学模型为

$$\Phi(I_{pv}, U_{pv}, T_k) = I_{ph} - I_{o1} \left[\exp\left(\frac{q(U_{pv} + I_{pv}R_s)}{N_s AK_b T_k}\right) - 1 \right] - I_{pv} - \frac{U_{pv} + N_s I_{pv} R_s}{N_s R_p} = 0 \quad (2)$$

式中: N_s 为串联或并联的光伏电池数。

1.2 光伏 PCS 工作原理

图2为一常见的两级单相光伏 PCS。

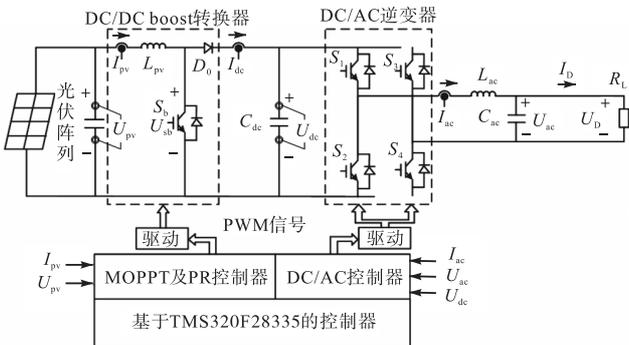


图2 两级单相光伏 PCS

Fig. 2 Diagram of a two-stage single-phase PV PCS

两级单相光伏 PCS 主要由光伏阵列、DC/DC 转换器、DC/AC 逆变器等部分组成。其中 DC/DC 转换器采用 MPPT 控制,以获取光伏阵列的最大功率,DC/AC 逆变器采用 DC/AC 控制器以控制开关 S1 ~ S4 的导通,提供发电功率。 U_{dc} 、 U_{ac} 、 I_{ac} 分别为光伏侧输出电压、电网侧输出电压和电流; I_{pv} 、 U_{pv} 分别为光伏阵列输出电流和电压。

2 二阶谐波的抑制

2.1 二阶谐波分析

两级单相光伏 PCS 的光伏阵列侧和电网侧的功率方程可以分别表示为

$$P_{pv} = I_{pv} U_{pv} \quad (3)$$

$$P_{ac} = I_{ac} U_{ac} = UI \cos^2 \omega t = \frac{UI(1 + \cos 2\omega t)}{2} = \frac{UI}{2} + \frac{UI}{2} \cos 2\omega t \quad (4)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ 为电网频率。

当输入功率(光伏阵列侧)和输出功率(电网侧)相等时,DC/DC 转换器的输入电流 I_{pv} (光伏阵列输出电流)可表示为

$$I_{pv} = \frac{U_{ac} I_{ac}}{U_{pv}} = \frac{UI}{2U_{pv}} + \frac{UI}{2U_{pv}} \cos 2\omega t \quad (5)$$

方程(5)表明, I_{pv} 随输出功率 P_{ac} 而脉动,且有一两倍基频的二阶谐波。DC/DC 转换器的输出电流 (I_{dc}) 随输出功率 P_{ac} 而脉动。这表明 I_{dc} 也存在脉动成分。由于脉动分量的存在,光伏阵列的工作点会在 MPP 附近波动,从而脉动和噪声降低了 MPPT 效率。

2.2 PR 控制器的设计

由于 PR 控制器结构在调节正弦信号中具有消除稳态误差的能力,因此得到了广泛的应用^[7-9]。本文设计了一个 PR 控制器,该控制器没有从静止坐标到同步坐标的转换,其计算较为简便、鲁棒性好。图3为 PR 控制器,其传递函数

$$G_{PR}(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = K_{PR_p} + K_{PR_i} \frac{s}{s^2 + \omega^2} \quad (6)$$

式中: K_{PR_p} 和 K_{PR_i} 为 PR 控制器的增益常数; $\omega = 2\pi f$ 为电网频率; s 为拉普拉斯变换的变量。

为了避免无限增益的相关稳定性问题,近似(非理想)PR 控制器采用高增益低通滤波器。非理想 PR 控制器可以表示为

$$G_{PR}(s) = K_{PR_p} + K_{PR_i} \frac{\omega_c^s + \omega_c^2}{s^2 + 2\omega_c^s + \omega_c^2 + \omega^2} \quad (7)$$

式中: ω_c 为截止频率; ω 为理想频率.

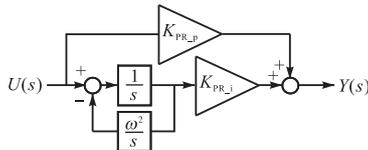


图3 PR控制器
Fig. 3 PR controller

假设 $\omega_c \ll \omega$, 方程(7)可以改写为

$$G_{PR}(s) = K_{PR_p} + K_{PR_i} \frac{\omega_c^s}{s^2 + 2\omega_c^s + \omega^2} \quad (8)$$

且非理想 PR 控制器设置相当高的有限增益, 用以消除有限稳态误差. 将 $s = \frac{2}{T_s} \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$ (双线性变换) 代入方程(8), 得到 PR 控制器的离散传递函数为

$$G_{PR}(z) = \frac{n_0 + n_1 z^{-1} + n_2 z^{-2}}{1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2}} \quad (9)$$

式中: $n_0 = \frac{(4 + 4T_s \omega_c + \omega^2 T_s^2) K_{PR_p} + 4K_{PR_i} T_s \omega_c}{4 + 4T_s \omega_c + \omega^2 T_s^2}$

$$n_1 = \frac{(-8 + 2\omega^2 T_s^2) K_{PR_p}}{4 + 4T_s \omega_c + \omega^2 T_s^2}$$

$$n_2 = \frac{(4 - 4T_s \omega_c + \omega^2 T_s^2) K_{PR_p} - 4K_{PR_i} T_s \omega_c}{4 + 4T_s \omega_c + \omega^2 T_s^2}$$

$$d_1 = \frac{-8 + 2\omega^2 T_s^2}{4 + 4T_s \omega_c + \omega^2 T_s^2}$$

$$d_2 = \frac{4 - 4T_s \omega_c + \omega^2 T_s^2}{4 + 4T_s \omega_c + \omega^2 T_s^2}$$

T_s 为采样时间.

由此, PR 控制器的数字方程可以写为

$$y(k) = n_0 u(k) + n_1 u(k-1) + n_2 u(k-2) - d_1 y(k-1) - d_2 y(k-2) \quad (10)$$

2.3 前馈补偿

PR 控制器的作用在于其共振频率 ω 附近的一个非常狭窄的频段, 可以实现对电流控制器没有任何不利影响^[10-11]. 通过级联多个广义积分器也可以减少谐波, 在所需的频率 ω 处产生共振. 因此, 谐波补偿器的传递函数可以表示为

$$G_{FC}(s) = \sum K_{PR_{ih}} \frac{s}{s^2 + (h\omega)^2} \quad (11)$$

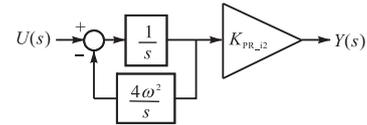
式中: h 表示谐波阶.

对提取的二次谐波, 谐波补偿器设计如下

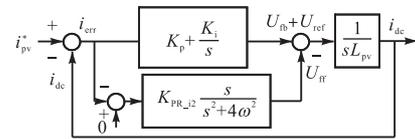
$$G_{FC}(s) = \sum K_{PR_{ih}} \frac{s}{s^2 + (h\omega)^2} \Big|_{h=2} = K_{PR_{i2}} \frac{s}{s^2 + (2\omega)^2} \quad (12)$$

PR 控制器进行设置, 当 ω 为 100 Hz 时, 假设参数 $K_{PR_p} = 1$, $K_{PR_i} = 20$, $\omega = 754 \text{ rad/s}$, $\omega_c = 10 \text{ rad/s}$, 则可作 PR 控制器的波德图, 该控制器可实现高增益.

图 4(a) 为对谐波补偿的 PR 控制器. 从 PR 控制器中提取的二阶谐波可以用来补偿 100 Hz 波纹, 提取二次谐波的输出被添加到控制器作为一前馈分量. 图 4(b) 中 K_p 和 K_i 为 PI 控制器的增益常数.



(a) 控制器 PR 的谐波补偿



(b) 带前馈补偿的 PI 电流控制器

图4 控制器 PR 的谐波补偿及带前馈补偿的 PI 电流控制器

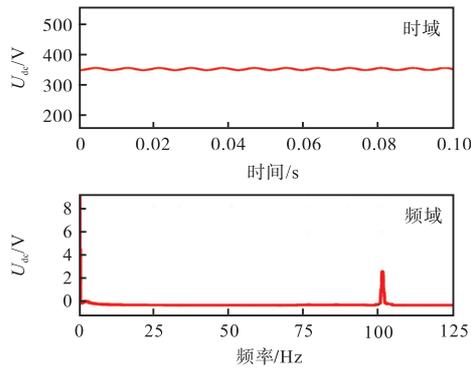
Fig. 4 PR controller for harmonic wave compensation and PI current controller with feed-forward compensation

3 仿真及实验

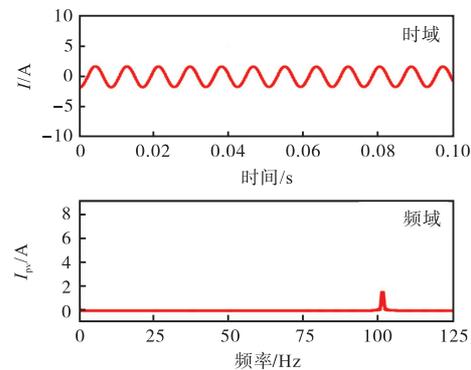
为验证本文控制策略的有效性和可行性, 在 Matlab 环境下, 构建了一个仿真模型, 在实验室设计了一套基于 DSP(TMS320F28335) 的控制系统, 如图 2 所示. 仿真参数设定如下: 光伏侧输出直流电压 U_{dc} 和电网侧输出交流工频电压 U_{ac} 分别等于 400 V、350 V, 开关频率为 1 kHz, 额定负载 R_L 为 34 Ω , 电感 L_{ac} 和电容 C_{ac} 分别为 $(4 \pm 2) \text{ mH}$ 、 $(28.2 \pm 15) \mu\text{F}$. 图 5(a) 为直流母线电压的仿真波形, 在时域特性中, 由于二阶谐波的影响, 直流母线电压是脉动的; 在频域特性中, 频域中的脉动分量代表二阶谐波. 图 5(b) 为使用 PR 控制器提取的二阶谐波分量仿真波形, 从其时域和频域特性可以看出, 可以准确提取谐波分量. 利用所提取的成分, 可减轻光伏电流的二次谐波.

图 6 为补偿前后的光伏电流和 FFT 的仿真波形. 由图 6(a) 可知, 在时域特性中, 光伏电流随直流母线电压脉动, 频域特性中有二阶谐波. 图 6(b) 表明, 纹波电流得到了减小, 证实了具有前馈补偿的 PR 能够有效降低二阶谐波. 开关频率设置为 5 kHz 时, 如图 6(c) 所示, 系统只补偿了二阶谐波, 对栅极电流和电压不产生影响. 由于直流环节电容较大, 补

偿算法并不影响电网侧电压和电流.

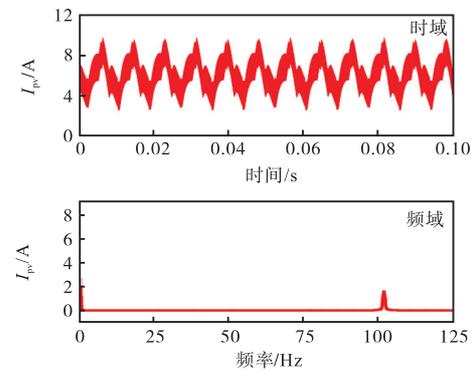


(a) 直流母线电压波形

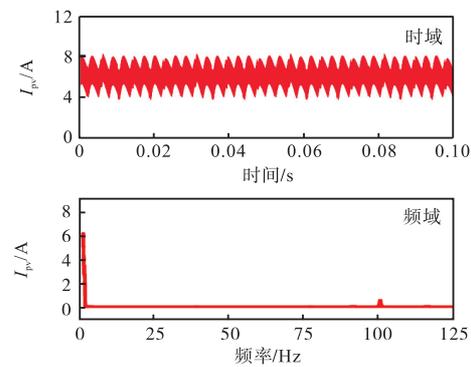


(b) 二次谐波分量波形

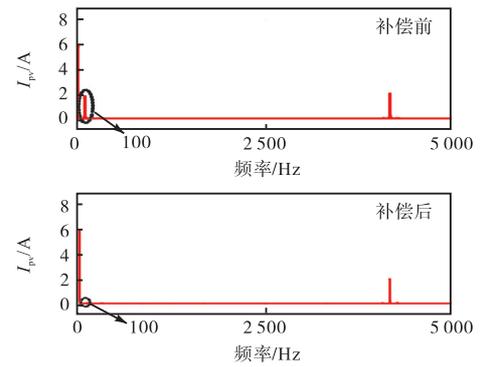
图5 直流母线电压和二次谐波分量的仿真波形
Fig. 5 Simulation wave forms of DC-link voltage and the second-order harmonic wave component



(a) 不带补偿



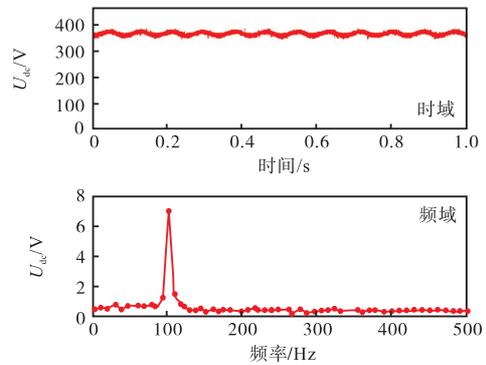
(b) 带补偿



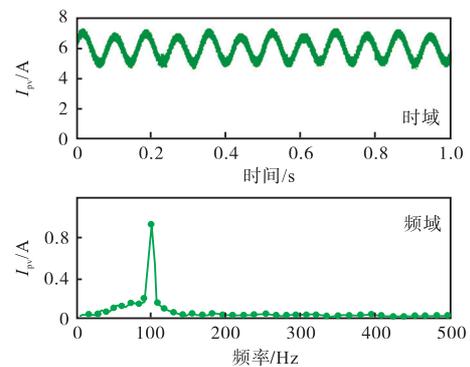
(c) FFT波形

图6 补偿前后的光伏电流、FFT的仿真波形
Fig. 6 Simulation wave forms of PV current and FFT before and after compensation

图7为直流母线电压波形、二阶谐波分量波形和补偿前后的光伏电流. 由图7(a)可看出, 直流母线电压波形包括一个幅度约7V的脉动分量. 从图7(c)可见提取的分量为100Hz. 图7(b)为不带补偿的光伏电流波形, 图中显示, 由于存在脉动分量, 光伏电流产生脉动, 光伏电流在 (6 ± 0.95) A (15.8%) 范围内浮动. 为了补偿脉动分量, PR控制器从光伏电流中提取二阶谐波分量, 如图7(c). 图7(d)为采用前馈补偿的PR控制器的波形, 在其时域特性中, 光伏电流只由直流分量组成, 且在 (6 ± 0.05) A (0.008%) 内波动, 而频域特性中的二阶谐波几乎完全被消除.



(a) 直流母线电压波形



(b) 补偿前

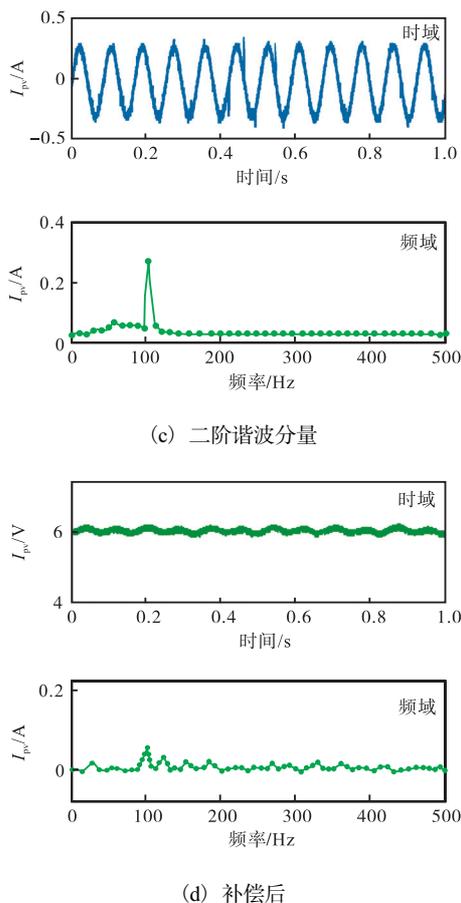


图7 直流母线电压波形、二阶谐波分量波形和补偿前后的光伏电流

Fig.7 Magnitude of DC-link voltage, the second-order harmonic wave component, and PV current before and after compensation

4 结 语

针对光伏功率调节系统的二阶谐波,本文提出一种采用比例谐振控制器的二阶谐波抑制技术,并通过仿真实验进行了验证.结果表明:具有前馈补偿的比例谐振控制器可对系统的二阶谐波分量进行准确提取,能够有效地抑制二阶谐波;由于直流环节电容较大,该补偿算法并不影响电网侧的电压和电流;该二阶谐波分析技术无需增加额外设备及复杂计算,降低了系统成本,提高了系统结构灵活性.

参考文献:

- [1] 陈鹏伟,肖湘宁,陶顺,等. 直流微网电能质量问题探讨[J]. 电力系统自动化,2016,40(10):148-158.
- [2] 汪飞,雷志方,梁东,等. 单相逆变器低频脉动电流抑制机理分析与方法综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):184-191.
- [3] 张国荣,陈夏冉. 能源互联网未来发展综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):1-7.
- [4] 黄骏翹,曾江,杨林,等. 低压微网逆变器自适应谐波下垂控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):204-210.
- [5] Kwon J B, Wang X, Blaabje R G F, et al. Harmonic instability analysis of a single-phase grid-connected converter using aharmonic state-space modeling method[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(5):4188-4200.
- [6] 凌毓畅,曾江,刘洋,等. 具有低次谐波抑制功能的虚拟电阻型光伏逆变器[J]. 电力系统自动化,2018,42(9):114-119.
- [7] Hae G J, Gwang S K, Kyo B L. Second-order harmonic reduction technique for photovoltaic power conditioning systems using a proportional-resonant controller[J]. Energies, 2013(6):79-96.
- [8] Yang Y, Zhou K, Blaabje R G F. Current harmonics from single-phase grid-connected inverters-examination and suppression[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4):221-233.
- [9] 钟庆,冯俊杰,王钢,等. 闭环控制下单相 VSC 低次谐波分析模型与抑制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):52-58.
- [10] He J, Li Y, Wang R, et al. Analysis and mitigation of resonance propagation in grid-connected and islanding microgrids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(1):70-81.
- [11] 孙孝峰,蔡瑶,马群,等. 基于末端微电网结构的配电网系统谐波抑制策略研究[J]. 太阳能学报,2018,39(5):1449-1558.

责任编辑:郎婧