

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201612017



非线性准 PR 双模逆变器的设计

赵熙临, 明航, 吴胧胧, 何晶晶, 汤倩

(湖北工业大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

摘要: 针对光伏发电系统并网与离网两种应用需求, 讨论分析并网、离网两种逆变模式的原理及控制策略. 提出一种非线性准比例谐振(PR)控制器用于光伏系统并网与离网状态切换过程中的逆变控制, 拟通过引入的非线性环节增大系统响应初期增益, 提高控制的快速性, 以消除切换过程中的电压电流畸变, 保障逆变效果的平滑性. Matlab/Simulink 仿真结果表明: 所提方法具有可行性与有效性.

关键词: 光伏系统; 逆变; 非线性 PR 控制器; 切换控制

中图分类号: TM 464 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)01-0081-05

Design on Dual Modes Inverter Based on Nonlinear Quasi PR

ZHAO Xilin, MING Hang, WU Longlong,
HE Jingjing, TANG Qian

(School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: According to the requirement of the application of photovoltaic system, the principle and control strategy of grid connected and off grid inverter modes are discussed. A nonlinear quasi proportional resonant (PR) controller for the inverter of PV system is proposed in this paper. The introduce of the nonlinear unit can increase the system at the beginning of the response, and to improve the swiftness of the system response. The effect of the nonlinear unit can eliminate the distortion at the switching moment, and to guarantee the smooth effect of inverter. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method are verified by Matlab/Simulink simulation.

Keywords: photovoltaic system; inverter; nonlinear proportional resonant controller; switching control

近年来,光伏发电系统作为清洁能源的典型应用得到了长足的发展^[1]. 在光伏系统应用中,考虑到其供电模式特征,需要对其电能进行逆变,以契合大电力系统的供电模式. 针对供电对象的不同,光伏系统的逆变存在并网与离网两种方式. 为提高太阳能的利用效率,光伏逆变器根据对象的状况进行并网模式或离网模式的选择. 考虑到供电的连续性,需要保证这两种模式之间能够实现平滑过渡^[2-3]. 文献[4-5]提出了双模式逆变器两种模式间相互切换所要满足的条件和操作步骤. 文献[6]设计了一种能够工作在并网和离网状态的双模式逆变器. 文献[7-8]提出以间接电流控制方式来完成离并网双模式的转换,具有一定的效果. 文献[9]分析了双模式逆变器从并网运行切换到离网状态的工作特性. 文献[10]提出利用交流脉冲宽度调制(pulse-width modulation, PWM)开关代替传统的并网开关,通过动态改变开关等效阻抗实现对电流冲击的抑制. 但综合考虑已有的方案,普遍存在切换过渡过程中的平滑性问题,

收稿日期: 2016-12-08

通信作者: 赵熙临(1969-),男,教授,博士,主要从事电力系统自动化的研究. E-mail: zhaoxl@mail.hbut.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61473116); 湖北省自然科学基金资助项目(2011CHB003); 湖北工业大学高层次人才科研基金资助项目(BSQD12107)

严重时威胁到电网稳定运行. 针对以上问题, 文献[11]设计了一种具有独立供电和并网发电的逆变系统, 提出采用电流控制离网作为独立工作与并网切换的过渡状态, 对切换时刻的电压电流冲击起到了缓解作用, 但无法完全消除冲击带来的影响. 为进一步减小切换过程中的电压电流畸变, 本文提出一种基于非线性准非线性比例谐振 (PR) 控制器的双模式逆变器, 在并网向离网切换时能够有效改善切换过程中出现的电流畸变, 在离网模式向并网切换时, 能够通过调整控制方式消除切换过程的电压冲击, 实现并网离网两种模式间的无缝切换.

1 逆变系统控制策略

1.1 双模式逆变器的拓扑结构

在光伏发电系统中, 双模式逆变器的主要功能是按照供电对象的不同情况, 完成不同供电方式下的逆变, 从而确保光伏系统在离网供电与并网输电两种模式间高效、平滑的切换. 全桥式单相双模式逆变系统主电路拓扑结构主要由直流电源 u_d 、滤波电容器 C 、逆变桥 (VS1~VS4)、输出滤波器 L 和本地负载 R 及无穷大电网等几部分组成, 如图 1 所示.

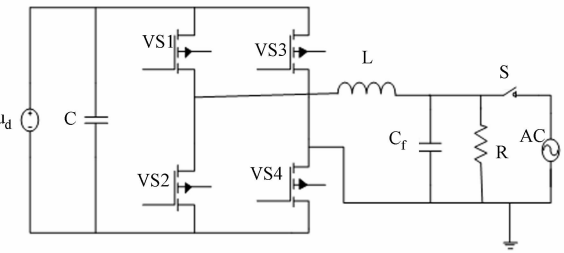


图 1 单相双模式全桥逆变电路拓扑
Fig. 1 Single-phase dual mode full bridge inverter circuit topology

1.2 离网工作模式

当双模式逆变器离网进行独立运行时, 所要控制的对象为逆变器输出电压, 所以一般采用控制效果较好的输出电压外环, 电感电流内环的双环电压控制策略. 离网模式下系统整体拓扑与控制框图, 如图 2 所示.

由图 2 及高频正弦脉冲宽度 (SPWM) 调制原理可知: 开关状态是不连续的, 但由于输出频率远小于开关频率, 因此, 可利用状态空间平均法求得连续的频域模型. 由图 2 中所示拓扑结构, 可推出负载端输出电压 u_0 与逆变桥输出电压 u_m 间的传递函数为

$$G_0(s) = \frac{u_0(s)}{u_m(s)} \frac{1/R + Cs}{\frac{1}{1/R + Cs} + Ls} = \frac{1}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1}. \tag{1}$$

1.3 并网工作模式

当电网正常工作时, 需要让逆变器工作在并网模式, 将光伏系统发出的电能输送到电网. 在并网瞬间, 为了确保光伏逆变系统不会对电网产生冲击, 多采用并网电流环与同步锁相相结合的方式实现并网电流对电网电压频率和相位的跟踪. 并网模式下系统拓扑与控制框图, 如图 3 所示.

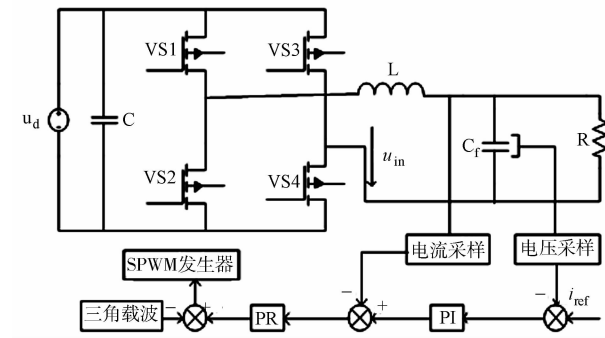


图 2 离网模式下系统拓扑与控制结构

Fig. 2 Control block diagram of grid-connected mode

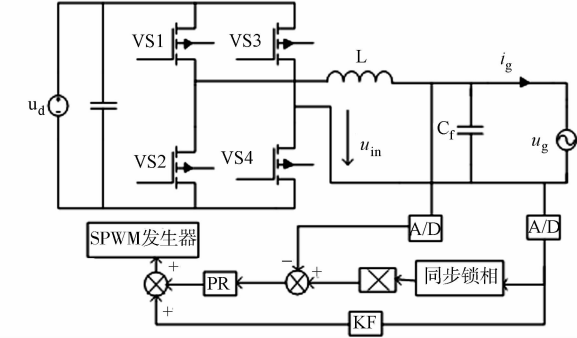


图 3 并网模式下系统拓扑与控制框图

Fig. 3 Control block diagram of grid-connected mode

图 2, 3 中: L 为滤波电感; C_f 为滤波电容; u_d 为直流输入电压; u_m 为逆变桥输出电压; i_g 逆变器输出的并网电流; u_g 为电网电压; i_{ref} 并网电流参考值. 由图 3 可推出, 并网模式下逆变器并网电流 i_g 与参考电流 i_{ref} 和电网电压 u_g 的传递函数为

$$i_g = \frac{K_{\text{PWM}} G_{\text{PR}}(s)}{s_L + R + K_{\text{PWM}} G_{\text{PR}}(s)} i_{\text{ref}} - \frac{1}{s_L + R + K_{\text{PWM}} G_{\text{PR}}(s)} u_g. \quad (2)$$

式(2)中: $G_{\text{PR}}(s)$ 为控制器的传递函数.

2 并/离网切换控制方法

由于离并网工作特性和控制策略的不同,在两种模式之间进行切换必然引起电压或电流冲击. 为了实现无缝切换,必须使冲击尽可能减小,在操作模式上采用主电路上的并网开关与控制电路上的模式转换开关相互配合的操作方式.

但在实际操作中,考虑到两种开关动作的不同步,可能导致系统工作在电流控制离网运行,或电压控制并网运行的不稳定状态. 如果突然出现电压控制并网运行时参考值由负载电流突变为电压,必然导致巨大的电流冲击,严重危害逆变器和电网的安全. 而鉴于电流控制对离网模式的破坏性相对较小,提出了一种基于准 PR 控制器以电流控制离网状态作为切换过渡瞬态减缓冲击的控制方法.

基于比例谐振原理的 PR 控制器的传递函数为

$$G_{\text{PR}}(s) = k_p + \frac{2k_r s}{s^2 + \omega_0^2}. \quad (3)$$

PR 控制器在基波频率处的增益为

$$G_{\text{PR}}(s)(j\omega_0) = \sqrt{k_p^2 + \left(\frac{2k_r \omega_0}{-\omega_0^2 + \omega_0^2}\right)^2}. \quad (4)$$

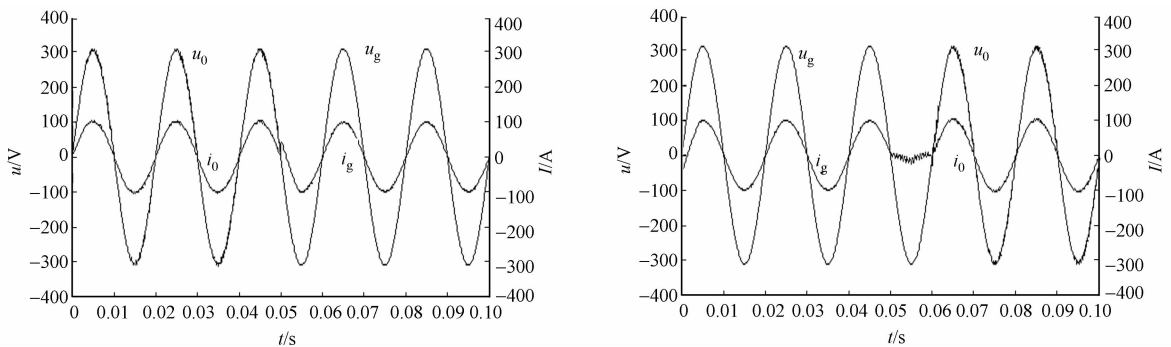
由式(3),(4)可知:PR 控制器在 $j\omega$ 轴上增加了两个固定频率的开环极点,形成此固定频率下的谐振,使 PR 控制器能够在该频率处得到无穷大增益,最终达到对参考交流信号的无静差跟踪^[12]. 因此,在光伏系统中更适合采用 PR 控制器完成对逆变器输出交流信号的调节.

在实际应用时,考虑到 PR 控制器实现难度大,对电网频率偏移适应性差,采用一种性能更好的准 PR 控制器,其传递函数为

$$G_{\text{PR}}(s) = k_p + \frac{2k_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2}. \quad (5)$$

式(5)中: k_p 是比例系数; k_r 为谐振比例系数; ω_c 为系统带宽; ω_0 为谐振频率取电网基频 $314 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$. 为提高系统性能,需要对准 PR 控制器的 3 个参数 k_p, k_r, ω_c 进行设计. 根据控制理论相关内容,并由仿真实验,设计出一组性能较好的准 PR 控制参数: $\omega_c = 8, k_r = 200, k_p = 120$, 此时的准 PR 控制器能够实现逆变输出较好跟踪电网电压的目标.

由离网切换到并网时,检测逆变器输出电压将其调至与电网电压同频同相,将模式控制开关切换至电流控制方式,调节参考电流至负载电流值,待电网电压过零点时合上并网开关. 在准 PR 控制策略下以电流控制离网作为过渡状态,从离网切换至并网的仿真波形,如图 4(a)所示.



(a) 离网切换

(b) 并网切换

图 4 准 PR 控制并网切换时输出波形

Fig. 4 Waveform of switching between grid-connect and standalone with quasi PR

由并网切换到离网时,检测电网故障,将并网参考电流调节到输出负载电流值,待电网电压过零点时打开并网开关,将模式开关切换至电压控制模式并保持稳定运行. 在准 PR 控制策略下以电流控制离

网作为切换过渡状态,从并网切换至离网时的仿真波形,如图 4(b)所示.由图 4(a),(b)可知:在准 PR 控制下从离网切换到并网时,在切换点 $t=0.05\text{ s}$ 时,出现一个明显的电流冲击,而从并网切换到离网时,在切换点附近逆变器输出电流幅值下降明显且存在较大震荡.由此说明在准 PR 控制下,以电流控制离网状态作为并网和离网两种模式切换的过渡状态的这种切换控制策略是不能够满足双模式逆变器平滑切换要求的.

3 基于非线性准 PR 控制器的并离网切换

3.1 非线性准 PR 控制器设计

针对图 4(a),(b)表现出的问题,考虑在 PR 控制器前加入非线性环节以提高响应的快速性.非线性环节能够保证在起始时刻提供一个大的增益,系统增益的提高将加快系统响应速度,弥补原控制系统响应不及时导致的问题.下面引入非线性函数 $y(e)$,非线性函数 $y(e)$ 的表达式为

$$y(e) = k_0 + k_1 \times \left[1 - \frac{2}{\exp(k_2 e) + \exp(k_2 (-e))} \right]. \tag{6}$$

式(6)中:变量 e 为系统实际输出与输出参考值之间的差值; k_0, k_1, k_2 为非线性函数的 3 个系数,取值分别为 1,4,1.

当以阶跃信号作为输入,将闭环反馈系统的输出与输入信号的差值送入非线性环节,得到非线性环节的响应特性曲线,如图 5 所示.由图 5 可知:在响应初期约 0.3 s 时,非线性环节给系统提供了一个较大的增益,极大地提高了系统的响应速度,能有效解决系统响应较慢和输出幅值震荡问题.

为尽可能减小切换冲击,保障逆变器和电网安全稳定运行,设计一种基于非线性的准 PR 控制器.非线性环节与准 PR 控制器在控制系统中连接方式,如图 6 所示.

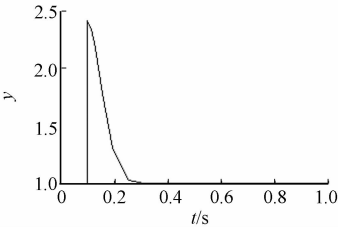


图 5 非线性环节的特性曲线

Fig. 5 Characteristic curve of nonlinear

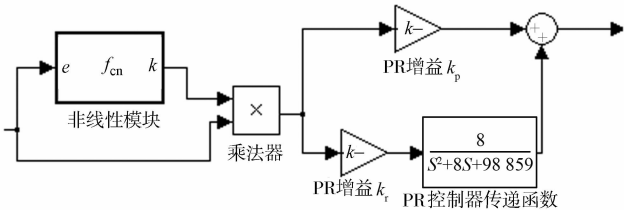


图 6 非线性准 PR 控制器结构框图

Fig. 6 Controller block diagram of quasi PR with nonlinear

3.2 仿真验证

并网到离网切换时,在以电流控制离网工作瞬态作为切换过渡状态的基础上,利用控制器的非线性补偿功能弥补单纯准 PR 控制器在切换点附近的增益不够幅值跟踪响应迟缓,切换瞬间震荡剧烈等显著缺点.具体的操作步骤和前面一致,先检测电网故障,再调整并网参考电流值,接着,待并网电压过零断开并网开关进行脱网.最后,操作模式控制开关,将电流控制切换为电压控制,最终实现在非线性准 PR 控制方式下并网到离网的平滑切换.

离网到并网切换时,检测电压控制独立工作模式下逆变器的输出电压并进行调整使其与电网同频同相,在达到并网要求后动作模式控制开关使系统工作在电流控制下的独立工作模式,缓慢调节参考电流至负载电流给定值,待电网电压幅值过零时,合上并网开关,并将电流参考调节至并网运行时的给定值,至此完成由离网至并网的切换.

通过搭建 Matlab 仿真模型,在以电流控制离网工作瞬态作为切换过渡状态的基础上,对所提出的将非线性与准 PR 控制相结合的双模式光伏逆变器进行了仿真.仿真参数设置如下:光伏逆变器的输入直流母线电压为 $u_d=400\text{ V}$;电网电压为 u_g ;并网频率 $\omega_0=50\text{ Hz}$;滤波电感 $L=30\text{ mH}$;滤波电容 $C=2\text{ }\mu\text{F}$;PR 控制参数为 $\omega_c=8, k_r=200, k_p=120, \omega_c$ 由截止频率带宽决定, k_r 与 k_p 通过综合系统的稳定性和增益选取.引入非线性准 PR 控制策略的双模式逆变器,在 $t=0.05\text{ s}$ 时,从并网切换到离网,以及离网切换到并网的仿真波形,如图 7 所示.

由图 7 的仿真结果与图 4 对比可知:当采用非线性与准 PR 控制相结合后,双模式逆变器并离网切

换过程的电流波形得到了明显改善,有效地消除了准 PR 控制下在两种模式切换点附近出现的电压电流冲击,实现了平滑过渡无缝切换的要求,能够使逆变器在两种模式及切换瞬态保持正常平稳运行。

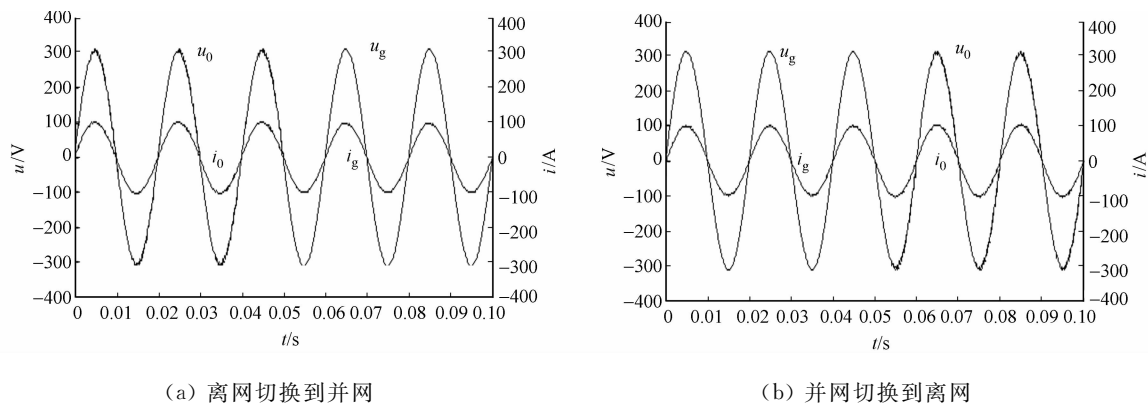


图 7 基于非线性准 PR 的并网离网切换输出波形

Fig. 7 Waveform of switching between grid-connect and standalone quasi PR with nonlinear

4 结束语

分析了并离网双模式逆变器在并网运行和离网工作两种模式下的控制方式,针对双模式逆变器在并网运行和离网工作两种模式间切换时出现的电压电流冲击问题,提出一种基于非线性准 PR 控制器的无缝切换方法,能够有效地减小切换瞬间输出电压电流冲击。最后,通过 Matlab/Simulink 对切换方法和控制策略进行了仿真验证。结果表明:这种控制方式能够确保双模式逆变器在两种模式下稳定工作,并能实现离并网的平滑过渡,该研究为中小型光伏发电系统的离并网切换打下了基础。

参考文献:

[1] 洪雪梅. 三相正弦波逆变器容错控制[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 498-502. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201604021.

[2] TIRUMALA R, MOHAN N, HENZE C. Seamless transfer of grid-connected PWM inverter between utility-interactive and stand-alone modes[C]// Proceedings of the Applied Power Electronics Conference and Exposition. Dallas: IEEE Press, 2002: 1081-1086. DOI: 10. 1109/APEC. 2002. 989378.

[3] 王晓寅, 张纯江. 分布式发电并网无缝切换控制算法设计与实现[J]. 电网技术, 2012(7): 191-194. DOI: 10. 13335/j. 1000-3673. pst. 2012. 07. 043.

[4] 王晓明, 肖文娟. 双模式逆变器无缝切换控制策略的仿真分析[J]. 电气自动化, 2012, 34(4): 31-33. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-3886. 2012. 04. 012.

[5] 高健, 刘昆. 一种新颖有效的逆变器无缝切换方法[J]. 电力电子技术, 2006, 40(5): 56-57. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-100X. 2006. 05. 021.

[6] 王赞, 肖岚, 姚志垒, 等. 并网独立双模式控制高性能逆变器设计与实现[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 61-64.

[7] 过亮, 许爱国, 谢少军. 间接电流控制独立并网双模式逆变器的研究[J]. 电力电子技术, 2008, 4(42): 36-38.

[8] KWON J, YOON S, CHOI S. Indirect current control for seamless transfer of three-phase utility interactive inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 773-781.

[9] HUANG Shengli, KONG Li, XU Haiping. Control algorithm research on seamless transfer for distributed resource with a LCL filter[C]// Proceedings of the International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Nanjing: IEEE Press, 2008: 2810-2814.

[10] 王玉斌, 王广柱. 基于开关电容技术的新型交流 PWM 开关及其在微电网模式切换中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 211-215.

[11] 林旭成, 杨苹, 吕茵. 基于 DSP 控制的双模式逆变系统研究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(2): 56-59.

[12] 孟建辉, 石新春, 付超, 等. 基于 PR 控制的光伏并网电流优化控制[J]. 电气自动化设备, 2014, 34(2): 43-44.