

基于 BOOST 变换器的小型风力机并网逆变控制系统设计

许颇¹, 张兴¹, 张崇巍¹, 曹仁贤², 赵为²

(1 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009 ; 2 合肥阳光电源有限公司, 合肥 230011)

摘要: 本文概述了基于 BOOST 变换器的小型风力机并网逆变控制系统设计方案。系统由一个 H 桥并网逆变器和一个 BOOST 升压斩波电路组成。对并网逆变器采用电流内环和电压外环双环控制, 以取得网侧电流的快速跟随性和直流侧电压的抗扰性; 对 BOOST 斩波电路进行功率控制, 实现风力发电机最大功率的跟踪。系统采用了根轨迹图解法进行控制器参数设计, 并取得了较好的动态控制性能。最后, 以 1.5Kw 并网逆变器的试验结果验证了设计的正确性。

关键词: BOOST; 并网逆变; 双环控制; 根轨迹

中图分类号: TM615 文献标示码: A

1 引言

我国是风力资源较丰富的国家, 小型风力发电作为农村能源的一种补充, 在我国边远山区、沿海岛屿和少数民族地区取得了很好的社会效益和经济效益。但大部分应用都是离网型风能利用, 要用蓄电池储存风机的电能再通过逆变器逆变给用户使用^[5], 整个系统的效率通过两级转换损失很多, 并且蓄电池的使用在增加成本的同时还会带来环境污染。目前, 大型风力发电机都采用并网运行方式, 随着可再生能源技术的发展, 在有低压电网的地区, 将小型风机的输出电能通过并网逆变器并入低压电网成为可能。小型风力机并网发电比光伏并网发电更方便、经济、实用, 是国内外风力发电应用的一个重要方向^[1, 2, 3, 4]。

本文对小型风力并网的核心装置并网逆变器的控制系统进行了研究。小型风力机采用具有良好低速特性的永磁发电机, 适用于低风速启动并具有较高的发电效率^[4]。针对小型风力机输出电压低且大范围波动的特点, 采用在并网逆变器前级加BOOST升压斩波电路的拓扑结构^[5, 6], 并通过控制BOOST电路的占空比有效跟踪风力发电机的最大功率。本文在分析并网逆变器控制系统的同时采用MATLAB根轨迹图解的仿真方法进行调节器设计^[7, 8], 从而使系统获得了良好的动、静态特性, 满足了高效、可靠发电的要求。

2 系统的组成

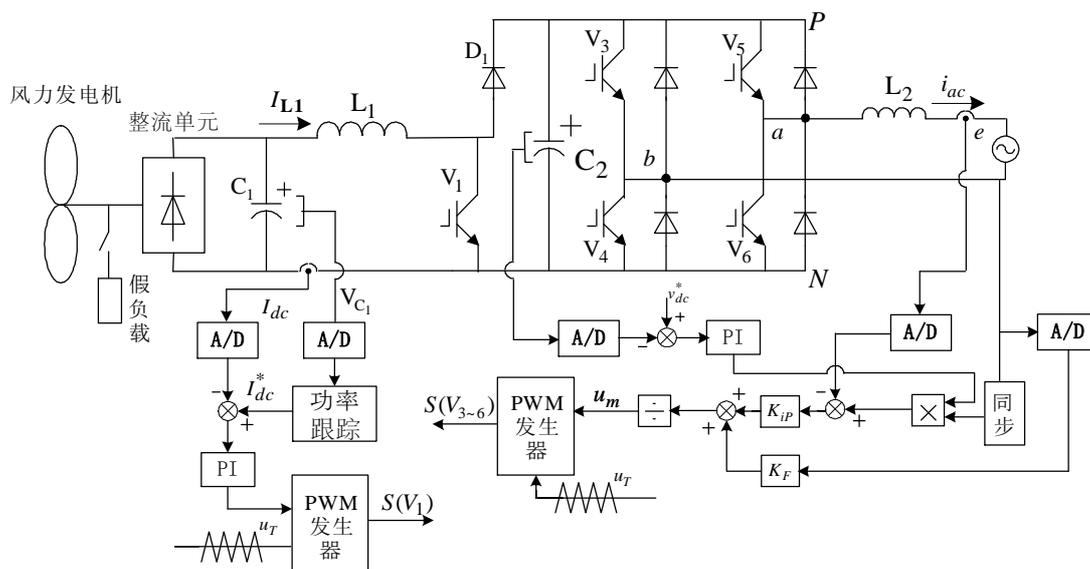


图 1 系统拓扑与控制结构

Fig.1 The system topology and control configuration

为了实现风机的并网发电，本系统采用电压型 H 桥并网逆变器进行并网电流控制。考虑到电机的绕组隔离特性，本系统在交流输出侧直接并网，而不需要变压器隔离。由于风力机的输出是三相交流电，因此采用交—直—交电能变换实现本系统的并网功能。风机的输出经过二极管三相桥整流得到直流电压，再通过 BOOST 升压斩波电路得到并网逆变器要求的直流母线电压。为了满足电压型并网逆变器的工作条件，即直流侧电压至少要达到电网电压的峰值，在 H 桥并网逆变器的直流侧前级加 BOOST 斩波升压电路。系统的拓扑如图 1。

3 并网逆变器控制系统设计

3.1 控制原理

H 桥 PWM 并网逆变器是具有电流控制特性的电压型逆变器。通过对交流并网侧电感电流的控制来实现电能的单位功率因数并网运行。

根据图 1，H 桥交流侧电路方程是：

$$\begin{cases} v_{ab} - e = L_2 p i_{ac} \\ v_{ab} = S v_{c2} \end{cases} \quad (1)$$

其中 v_{ab} 、 e 、 i_{ac} 、 L_2 、 p 、 v_{c2} 分别为交流斩波电压、电网电压、交流电流，交流电感、

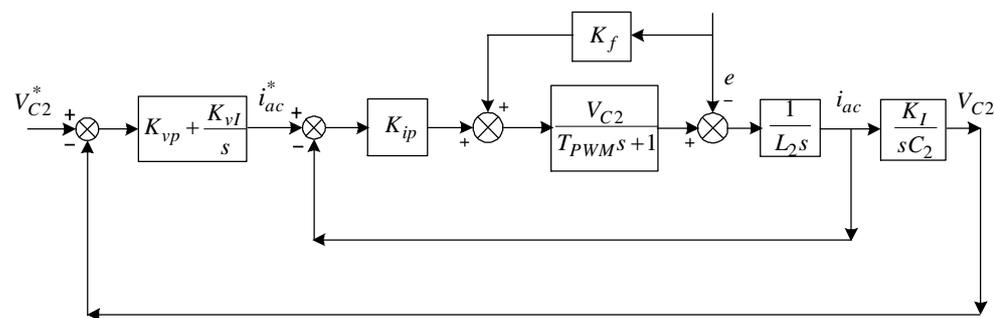
微分算子、直流母线电压。 S 为开关函数 $S = \begin{cases} 1 & V_4, V_5 \text{管导通} \\ 0 & V_3, V_6 \text{管导通} \\ -1 & V_3, V_5 \text{管导通或} V_4, V_6 \text{管导通} \end{cases}$

由式 (1)，易得

$$V_C = \frac{I_C}{sC} = \frac{I_L - I_{dc}}{sC} \quad (2)$$

显然，式 (2) 表明，系统可通过控制开关函数 S 的 PWM 调制来实现交流电流的并网控制。

为了实现并网逆变器网侧电流的单位功率因数控制，同时稳定直流母线侧电压，这里采用双闭环控制结构。其中，电流内环进行正弦电流的跟踪控制；而电压外环稳定直流母线电压。整个并网逆变器的控制结构如图 2



K_f ——电网前馈系数； K_{ip} ——电流内环比例调节器系数； V_{C2} ——PWM 逆变器母线直压； T_{PWM} ——PWM 逆变器时间常数； K_l ——交流到直流比例系数； K_{vp} ——电压外环 PI 调节器比例系数； K_{vl} ——电压外环 PI 调节器积分系数

图 2 H 桥并网逆变器双环控制传递框图

Fig.2 The double loop control frame of H-Bridge grid-connected inverter

3.2 电流内环设计

并网逆变器的电流内环需要有快速的电流跟踪特性，以保证单位功率因数正弦波电流的输出。

1) 电网前馈系数 K_f 的设计：

由式 (2) 和图 2 得出，电网电压在控制结构中属于扰动量，其波动直接影响系统的动

态性能。因此，在内环系统中加入电网电压前馈控制以增强系统的抗扰性。

由控制结构图得：

$$e \times K_f \times \frac{V_{C2}}{0.5T_{PWM}s + 1} - e = 0 \quad (3)$$

若忽略 PWM 逆变器对象的时间常数，则前馈系数为

$$K_f \approx \frac{1}{V_{C2}} \quad (4)$$

2) 电流调节器系数 K_{ip} 的设计：

加入电网前馈后，电流环的对象传递函数是

$$W_{oi}(s) = \frac{V_{C2}}{(T_{PWM}s + 1)Ls} \quad (5)$$

对于开关频率为 10KHz 的 50Hz 正弦波电流控制，综合考虑频带关系，取电流闭环的自然频率 $\omega_{ni} = 1500\text{Hz}$ ；又考虑到电流环要具有良好的跟随性，综合考虑响应速度和超调关系，取内环阻尼 $\xi_1 = 0.5$ 。

根据根轨迹的图解设计方法，通过 MATLAB 仿真工具对式 (5) 进行根轨迹仿真（参数见表 1）。通过改变增益根轨迹经过系统要求工作点 A (1500Hz, 0.5)，此时，比例调节器系数 $K_{ip} = 0.143$ ，如图 3。

加入比例调节器后电流环的闭环传递函数为

$$W_{ci}(s) = \frac{K_{ip}V_{C2}}{T_{PWM}Ls^2 + Ls + K_{ip}V_{C2}} \quad (6)$$

通过根轨迹法的控制设计，电流内环选择比例调节器，阻尼和自然振荡频率被确定且满足系统要求。

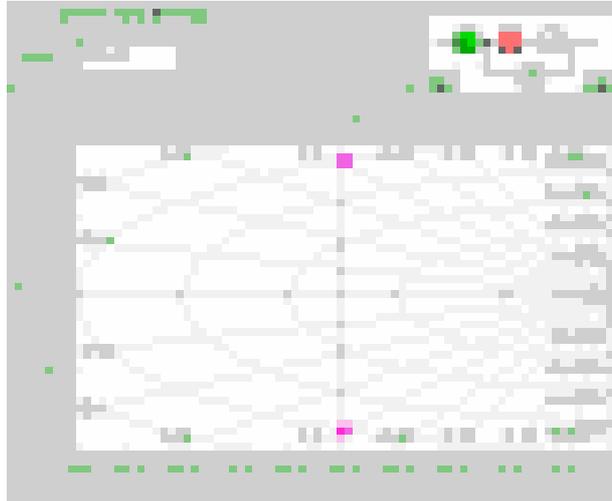


图 3 电流内环的根轨迹设计图

Fig.3 The root locus scheme of current inner loop

3.2 电压外环设计

电压外环控制目的是稳定直流侧电压，在单位功率因数条件下，根据并网逆变器交、直流侧功率平衡原则，忽略损耗，有：

$$V_{C2}I_{dc} = I_{ac}E \quad (7)$$

则，并网逆变器交流电流到直流电流的稳态关系是

$$I_{dc} = \frac{E}{V_{C2}} I_{ac} = K_I I_{ac} \quad (8)$$

式中， $K_I = E/V_{C2}$ 为交流到直流的传递系数， I_{dc} 为直流母线电流， E 为电网电压有效值。

设计电压外环时，可以将电流内环看成一个对象系统，根据控制图 2 和式 (6) 得电压外环的对象传递函数为

$$W_{ov}(s) = \frac{K_{ip} V_{C2} K_I}{(T_{PWM} L s^2 + L s + K_{ip} V_{C2}) s C_2} \quad (9)$$

则，将表格 1 数据代入式 (9)，可以对电压外环进行根轨迹设计

为了增强系统的抗扰性，取阻尼 $\xi_v = 0.9$ ；双环控制时，考虑到外环频带比内环频带衰减十倍，则取外环自然频率为 150Hz。在对象的根轨迹图上，通过增益的改变不能使根轨迹经过系统要求点 B (150Hz, 0.9)。因此，要通过调节器改造对象，实现根轨迹设计。

本系统同时要求电压外环实现无差跟踪，稳定在 350V。因此调节器中必须有积分项来消除误差，加入积分后的根轨迹如图 4.a。由图分析，此时有两个根在虚轴右侧，系统处于不稳定状态。为了使系统稳定，由根轨迹设计原则，给对象再加一个零点，使根轨迹向左移，使系统稳定。

系统对零点进行选择，使根轨迹经过点 B (150Hz, 0.9) (如图 4.b)，最终调节器选定为 PI 调节器，参数见表格 1。

加入 PI 调节器后电压外环的开环传递函数为

$$W_{ov}(s) = \frac{K_{ip} V_{C2} K_I (K_{vp} s + K_{vi})}{(T_{PWM} L s^2 + L s + K_{ip} V_{C2}) s^2 C_2} \quad (10)$$

通过对电压外环进行根轨迹设计，使其最靠近主导极点的两个根达到了系统要求根的位置 (150Hz, 0.9)，满足了外环系统的动态响应和稳态特性。

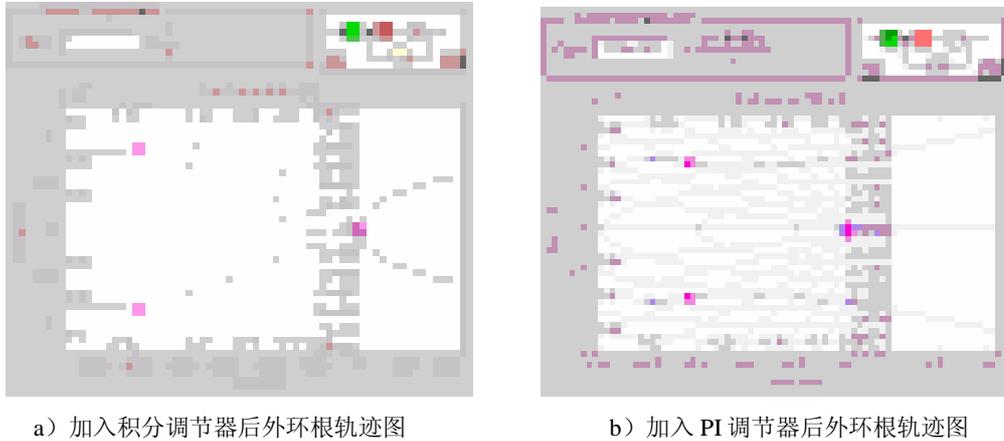


图 4 电压外环根轨迹设计图

fig.4 The root locus scheme of voltage outer loop

4 BOOST 环节功率跟踪控制

对于风力永磁同步发电机，其输出功率与风速、转速的关系如图 5.a^[8]，总有一个最佳转速对应于最大输出功率，通过对转速的闭环控制来对输出功率进行检测比较、寻优就控制了风机系统的最大功率输出。但对转速进行检测就要用到编码器，增加了系统的复杂性。

对于小型永磁同步风力发电系统，忽略定子电阻和漏抗，其输出电压与转速的关系为^[10]

$$U_s \approx 4.44 \frac{\omega_r}{2\pi} n_p \psi_{rs} \quad (11)$$

式中， U_s 为风机定子输出电压， ω_r 为风机旋转角速度， n_p 为磁极对数， ψ_{rs} 为转子磁通对定子的磁链相量，相对于永磁电机，为定值。

同时，风机输出交流电压 U_s 与二极管整流桥整流后直流电压 V_{C1} 成正比，故 V_{C1} 与风机转速成正比。因此，将不同风速下风机输出最大功率连线用一条斜线近似替代，则风机输出近似最大功率与直流电压关系如图 5.b，其中水平线表示当超出系统总功率时，恒功率输出。

又忽略损耗，风机电磁功率为

$$P_o \approx V_{C1} I_{L1} \quad (12)$$

且稳态时，电感电流的拉氏方程为

$$i_{L1} = \frac{V_{C1} - (1 - D_1)V_{C2}}{L_1 s + R_1} \quad (D_1 < 1) \quad (13)$$

其中 D_1 为 BOOST 导通占空比； L_1 和 R_1 分别为 BOOST 电感和等效电阻。

因此，通过控制 BOOST 斩波电路的占空比 D_1 来控制直流电流 I_{L1} ，从而稳定直流电压 V_{C1} ，实现风机最大输出功率的跟踪。

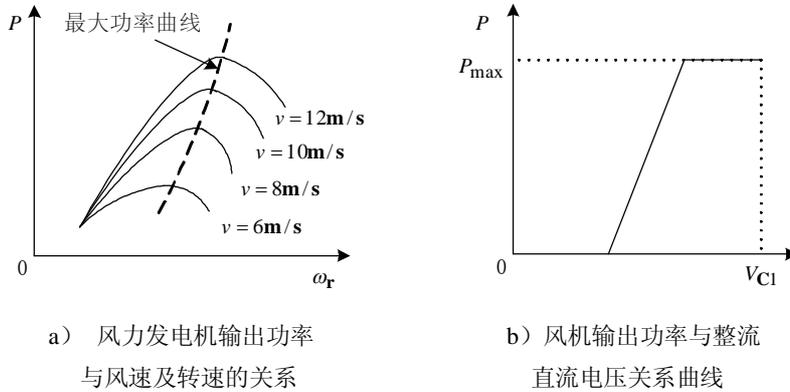


图 5 风力发电机输出功率曲线图

Fig.5 The wind generator output power graph

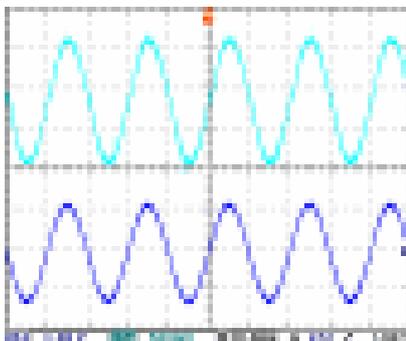
5 实验及结论

为了验证方案的正确性，制作了一台 1.5Kw 风机并网系统。取电路实验参数如表 1:

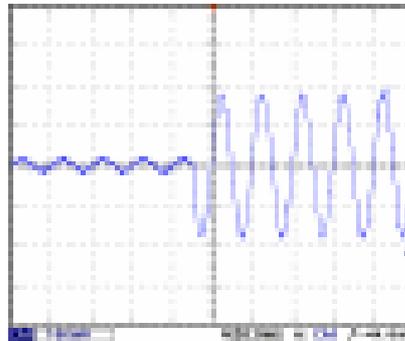
表 1 1.5Kw 并网逆变器电路参数及调节器系数

Table 1 The circuit parameter and controller coefficient of 1.5Kw grid-connected inverter

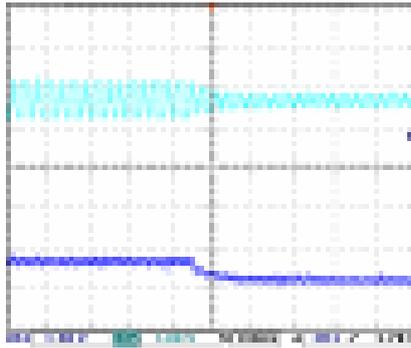
L_2	L_1	C_2	V_{C2}	K_I	K_f	K_{ip}	K_{vp}	K_{vI}
5mh	1.2mh	1500u	350V	0.628	0.0028	0.0714	235.5	1.5



a) 并网电压、电流波形
(上一并网电流，下一并网电压)



b) 电流内环指令阶跃突增波形



c) 电压外环指令阶跃突减波形（上一交流电流，下一直流电压）

图6 逆变器实验波形

Fig.6 The experiment wave of inverter

图 6. a 是稳态工作时并网逆变器电压，电流波形，从图中可以看出，电流谐波小且与电压相位相同，实现了单位功率因数运行（50%负载条件下，实测功率因数为 0.98）；图 6. b 是当电流环指令阶跃增加时并网电流波形，显然，电流内环有很好的动态跟踪性能；图 6. c 是电压指令突减时直流电压与交流电流波形，电压无超调，过渡过程时间为 100ms，满足了系统要求。

本文论述了基于 BOOST 变换器的小风机并网逆变器的整体控制方案。系统对 H 桥并网单元采用双环控制，保证了逆变器输出电流的单位功率因数跟踪；对 BOOST 功率控制单元进行闭环控制，实现了最大功率的跟踪。并且通过仿真工具 MATLAB 的根轨迹图仿真对控制系统进行根轨迹图解设计。最终，通过 1.5Kw 并网实验装置的动、静态实验验证了分析的正确性。

参考文献：

- 1 R. Pena, R. Cardenas, R. Blasco, G. Asher, and J. Clare. A cage induction generator using back-to-back PWM converters for variable speed grid connected wind energy system[J]. in Proc. IECON'01 Conf., vol. 2, 2001, pp. 1376–1381.
- 2 R. Tirumala and N. Mohan. Seamless transfer of a grid-connected PWM inverters between utility-interactive and stand-alone modes[J]. Proc. APEC'02 Conf., vol. 2, 2002, pp. 1081–1086.
- 3 Remus Teodorescu, Frede Blaabjerg. Flexible Control of Small Wind Turbines With Grid Failure Detection Operating in Stand-Alone and Grid-Connected Mode[J]. IEEE Transactions On Power Electronics, VOL. 19, NO. 5, SEPTEMBER 2004.PP: 1323-1332
- 4 促进中国农村地区分散型可再生能源发电系统发展的政策研究[R] 中国能源研究会 2002年7月
- 5 曹仁贤，赵为，屠运武等 变速风力发电系统的电源变换技术[J]. 变频器世界 2004年第十一期
- 6 J.Myrzik. Power Conditioning of Low Voltage Generators with Transformerless Grid Connected Inverter Topologies[C]. European Power Electronics Conference, Trondheim 1997
- 7 M. Veerachary. Modeling and control of interleaved boost converters and their application to photovoltaic supplies. Dr.Eng. dissertation, Dept. Elect. Electron. Eng., Univ. Ryukyus, Nakagami, Okinawa, Japan, 2002.
- 8 张崇巍，张兴 PWM整流器及其控制[M] 机械工业出版社 2003年10月
- 9 Katsuhiko Ogata. Modern Control Engineering[M] 电子工业出版社 2003年7月
- 10 陈伯时 电力拖动自动控制系统[M] 机械工业出版社 2003年1月

The grid-connected inverter based on BOOST converter control system design of small wind machine

Xu Po¹, Zhang Xing¹, Zhang Chongwei¹, CaoRenxian², zhaowei²

(¹Hefei University of technology, Hefei 230009, China;

²HeFei Sunlight Power Supply(SPS) Co. Ltd, Hefei 230011, China)

Abstract: in this paper, a control system design scheme about the grid-connected inverter based on Boost converter for small wind generator is summarized. The system is constituted with an H-bridge grid-connected inverter and a Boost chopping circuit. In order to obtain the grid current fast tracking character and the DC voltage anti-disturb character, the double loop control about current inner loop and voltage outer loop is adopted for grid-connected inverter; in order to realize the maximum power tracking, the power control is adopted for Boost chopping circuit. The root locus scheme method is adopted to design the controller parameters, which gets the better dynamic control capability. Finally the experiment results of 1.5Kw grid-connected inverter validates the validity of design.

Keywords: BOOST; grid-connected inverter; double loop control; root locus