

微网光伏双模式逆变器双环控制策略研究

闫根弟

(太原工业学院, 山西 太原 030008)

摘要: 逆变器双环控制策略易受到干扰, 导致控制效果较差, 为此提出了微网光伏双模式逆变器双环控制策略。首先分析微网光伏双模式逆变器运行流程, 采用电容电流内环、电压外环的双环控制策略, 保证逆变器输出电压稳定性, 通过电压外环控制器与电流内环控制器的传递函数获取电容电流内环、电压外环的双环控制逆变器传递函数和闭环传递函数, 通过极点配置法设计双环控制器参数, 最终获取双环控制系统期望特征, 实现微网光伏双模式逆变器的双环控制。实验结果表明, 所提方法可有效控制微网光伏双模式逆变器, 微网光伏双模式逆变器输出电压误差小。

关键词: 微网光伏; 双模式; 逆变器双环; 控制策略

Research on double-loop control strategy of micro-grid PV dual-mode inverter

YAN Gendi

(Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China)

Abstract: The inverter double-loop control strategy improves the defect that the previous voltage single-loop control of the inverter is susceptible to interference and leads to poor control effect. The micro-grid photovoltaic dual-mode inverter dual-loop control strategy is proposed, the micro-grid photovoltaic dual-mode inverter's composition and operation process is analyzed, based on the above analysis, select the dual-loop control strategy of the capacitor current inner loop and voltage outer loop to ensure the inverter output voltage stability. Using the transfer function of the voltage outer-loop controller and the current inner-loop controller, the double-loop control inverter transfer function of the capacitor-current inner-loop voltage outer-loop is obtained. Using the closed-loop expected pole formula of the third-order control system, the closed-loop transfer function of the dual-loop controller is represented. The parameters of the dual-loop controller are designed by using the pole configuration method. Finally, the expected characteristic formula of the dual-loop control system is obtained to realize the dual-loop control of the micro-grid photovoltaic dual-mode inverter. The experimental results show that the micro-grid photovoltaic dual-mode inverter can be effectively controlled by this method, and the output voltage error of the micro-grid photovoltaic dual-mode inverter controlled by this method is only about 0.5%.

Key words: micro-grid photovoltaic; dual-mode; inverter dual-loop; control strategy

0 引言

微电网是随着电力系统不断发展而诞生的新型电网模式, 微电网可有效发挥分布式电源

作用, 有效提升电网供电的可靠性。微电网系统主要应用于局部电网的配电、发电和用电^[1]。

微网光伏发电系统主要包括控制器、逆变器

和太阳能电池板,微网光伏双模式逆变器双环控制策略已成为能源产业中重要研究方向^[2]。

光伏发电系统是指将太阳光能转换至电能实现发电的装置。光伏发电系统主要包括独立电网光伏发电系统以及并网光伏发电系统。独立电网光伏发电系统主要应用于离电网较远的偏远地区,为偏远地区供电提供基础^[3]。光伏发电系统中并网光伏发电系统可直接发送电能至用户,并将电能送回电网中。

微网光伏发电系统由于通过清洁的太阳能实现供电,符合环境保护要求^[4-6],由太阳能发电不会形成温室气体与污染物,符合国家要求的可持续发展电网需求。光伏发电系统无须蓄电池即可实现发电功能,大大降低了供电系统的供电成本。微网光伏发电系统由于无须蓄电池避免蓄电池二次污染,可提升系统供电效率,降低故障维修概率^[7]。

双闭环控制策略是利用电压外环与电流内环相结合实现双模式逆变器控制的有效策略,以往双模式逆变器主要通过电压控制^[8],电压单环控制对于微网光伏逆变器中交流侧电流调节效果较差,且容易受到外界干扰,控制效果不明显^[9]。

电流内环具有较好的抗干扰性能，且对于交流电源具有跟随性能，将电流内环与电压外环相结合，利用双环控制策略控制逆变器动态运行，从而提升微网光伏双模式逆变器的运行性能。

1 逆变器双环控制策略

1.1 微网光伏双模式逆变器

微网光伏双模式逆变器主要包括双路DC/DC Boost-ZVT、DC EMI滤波、双向DC/AC逆变、储能装置充放电、AC输出滤波、通信、人机界面以及系统控制等。微网光伏双模式逆变器功能结构如图1所示。

微网光伏双模式逆变器运行流程如图2所示。

由图2可以看出,通过微网光伏双模式逆变

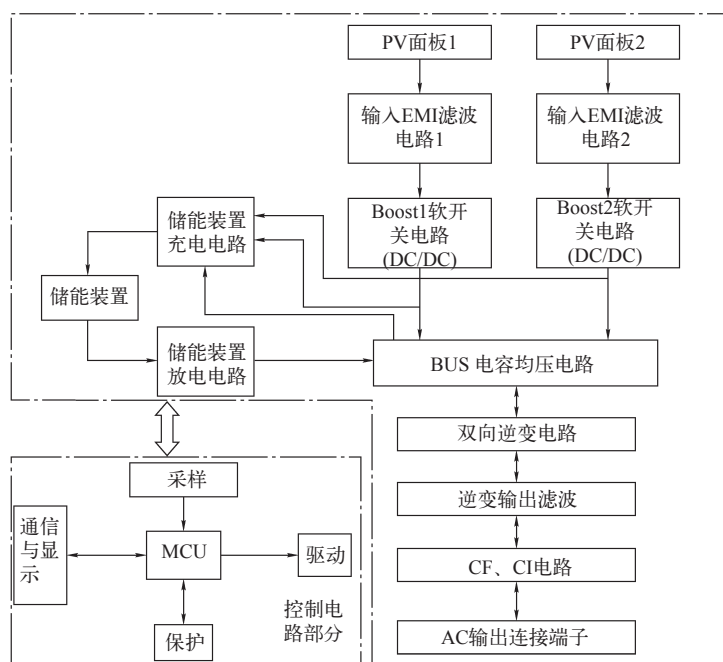


图1 微网光伏双模式逆变器功能结构

Fig. 1 Functional structure of micro grid photovoltaic dual-mode inverter

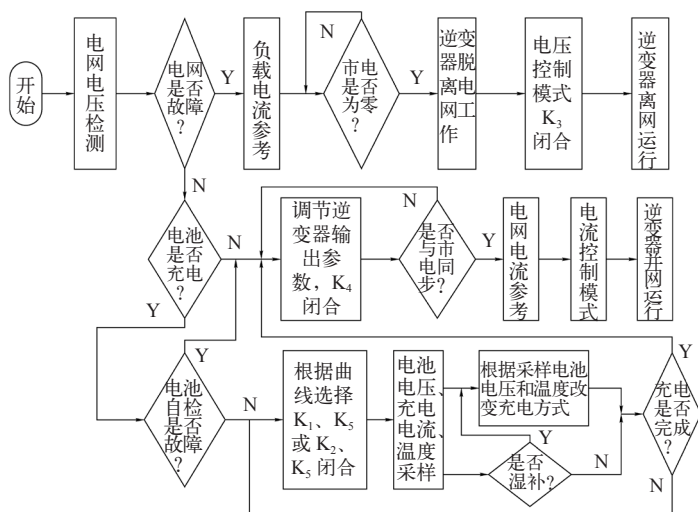


图2 逆变器运行流程

Fig. 2 Operation process of inverter

器可实现微网中离网、并网以及电池充电等不同工作模式时切换以及判断等不同功能^[10]。

1.2 电流电压双环控制策略

通过电压外环、电流内环的双环控制策略,保证逆变器输出电压的稳定性。利用电流内环形成电流随动系统,通过电压外环实现逆

变器输出电压稳定,提升逆变器抗干扰性能。微网光伏双模式逆变器依据状态变量差异,分为电容电流内环、电压外环以及电感电流内环、电压外环,逆变器负载扰动受电感电流内环控制效果较差,因此选取电容电流内环、电压外环的双环控制策略。电容电流内环、电压外环的双环控制策略总体结构如图3所示。

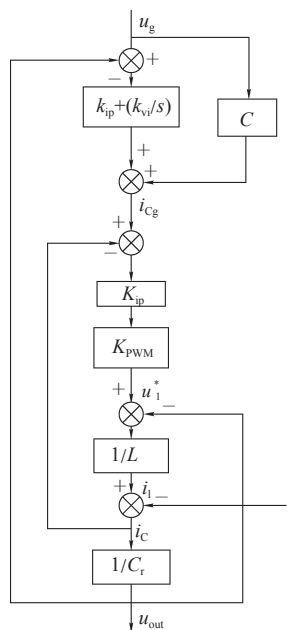


图3 电压电流双环控制结构

Fig. 3 Voltage and current double loop control structure

设 u_g 与 u_{out} 分别表示电压给定信号以及输出电压反馈信号,利用 u_g 与 u_{out} 获取电压误差;采用电压调节器形成电流给定信号,用 i_{cg} 表示;电容电流反馈信号 i_c 与 i_{cg} 相比获取电流误差信号,通过电流调节器产生的控制量用 u_1^* 表示,利用 u_1^* 实现逆变器的控制。设 $(p_{vp}+p_{vi})/t$ 与 p_{ip} 分别为电压外环控制器与电流内环控制器的传递函数,用 P_{PWM} 表示电容电流内环、电压外环的双环控制逆变器传递函数。电流内环传递函数如下

$$i_c = \frac{p_{ip} P_{PWM} Cs}{LCs^2 + p_{ip} P_{PWM} Cs + 1} i_{cg} - \frac{LCs^2}{LCs^2 + p_{ip} P_{PWM} Cs + 1} (i_0 + i_z) \quad (1)$$

式中, L 为电感线圈的自感系数; C 为电容器的电容; (i_0+i_z) 为电容电流。

电流比例增益传递函数为

$$Q_i(s) = \frac{p_{ip} P_{PWM} Cs}{LCs^2 + p_{ip} P_{PWM} Cs + 1} \quad (2)$$

电压外环传递函数为

$$u_{out} = \frac{p_{ip} P_{PWM} Cs^2 + p_{ip} P_{PWM} p_{vp} s + p_{ip} P_{PWM} p_{vi}}{LCs^3 + p_{ip} P_{PWM} Cs^2 + (p_{ip} P_{PWM} + 1)t + p_{ip} P_{PWM} p_{vi}} u_{ref} - \frac{Lt^2}{LCs^3 + p_{ip} P_{PWM} Cs^2 + (p_{ip} P_{PWM} p_{vp} + 1)t + p_{ip} P_{PWM} p_{vi}} (i_0 + i_z) \quad (3)$$

式中, t 为极点。

可得

$$u_{out} = Q_v(t) u_{ref} - Z(t) (i_0 + i_z) \quad (4)$$

式中, $Q_v(t)$ 与 $Z(t)$ 分别为电压比例增益传递函数和逆变器等效输出阻抗。

通过以上公式可知双环控制器闭环传递函数为三阶控制系统,利用极点配置法设计控制器参数^[15],双环控制系统闭环特征根公式为

$$F(t) = t^3 + \frac{p_{ip} P_{PWM}}{L} t^2 + \frac{p_{ip} P_{PWM} p_{vp} + 1}{LC} t + \frac{p_{ip} P_{PWM} p_{vi}}{LC} \quad (5)$$

式中, LC 为振荡电路。

可得三阶控制系统闭环期望极点公式为

$$\begin{cases} t_{1,2} = -\tau\omega_r \pm j\omega_r \sqrt{1-\tau^2} \\ t_3 = -n\tau\omega_r \end{cases} \quad (6)$$

式中, $t_{1,2}$ 与 t_3 分别为主导极点以及非主导极点; n 为三阶控制系数。

双环控制系统期望特征公式为

$$F_r(t) = (t-t_1)(t-t_2)(t-t_3) = (t^2 + 2\tau\omega_r t + \omega_r^2)(t + n\tau\omega_r) \quad (7)$$

整理以上公式可得

$$\begin{aligned} p_{ip} &= \frac{\tau\omega_r(2+n)L}{P_{PWM}} \\ p_{vp} &= \frac{\omega_r^2(1+2n\tau^2)LC-1}{p_{ip} P_{PWM}} \\ p_{vi} &= \frac{n\tau\omega_r^3 LC}{p_{ip} P_{PWM}} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, τ 为期望阻尼比; ω_r 为自然振荡频率。

利用式(8)实现微网光伏双模式逆变器双环控制。

2 仿真实验

2.1 实验环境

为检测本文研究微网光伏双模式逆变器双环控制策略的有效性, 利用Matlab仿真平台模拟某市电力系统中5 kW微电网光伏逆变器系统, 采用本文方法控制该逆变器, 系统实验相关参数如表1所示。

表1 实验参数设置

Tab. 1 Experimental parameter settings

参数编号	参数名	取值
1	系统输入电压/V	150 ~ 600
2	输出功率/kW	5
3	开关频率/kHz	25
4	电网电压/V	210
5	电交流电压/V	200 ~ 220

2.2 实验结果与分析

采用本文方法控制微网光伏双模式逆变器获取的电流控制参数性能, 如图4、图5所示。通过图4、图5实验结果可以看出, 采用本文方法控制的微网光伏双模式逆变器获取的电流环可实现无差跟踪, 电流环频带较宽, 可体现较好的动态性能, 相位裕度大于 90° , 符合逆变器指标要求。

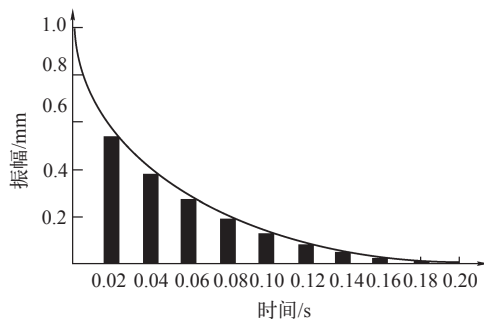
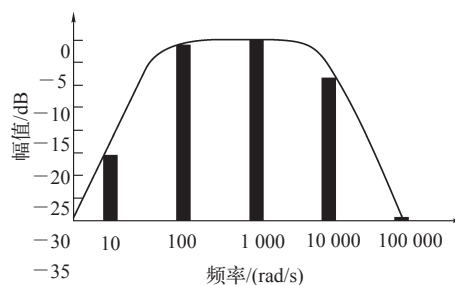


图4 电流的环阶跃响应

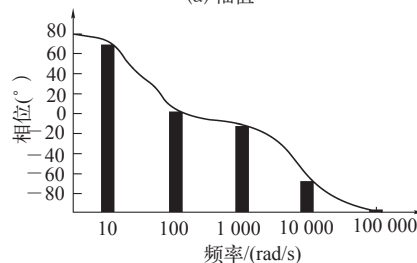
Fig. 4 Loop step response of current

本文方法的微网光伏双模式逆变器电压控制参数性能如图6、图7所示。从图6、图7可以看出, 本文方法的微网光伏双模式逆变器获取的电压环调整时间小于0.1 ms, 具有较好的动态性能, 相位裕度大于 140° , 具有较小的超调量。

本文方法的微网光伏双模式逆变器输出电压采样结果与给定电压关系如表2所示。由表



(a) 幅值



(b) 相位

图5 电流的环频率响应

Fig. 5 Loop frequency response of current

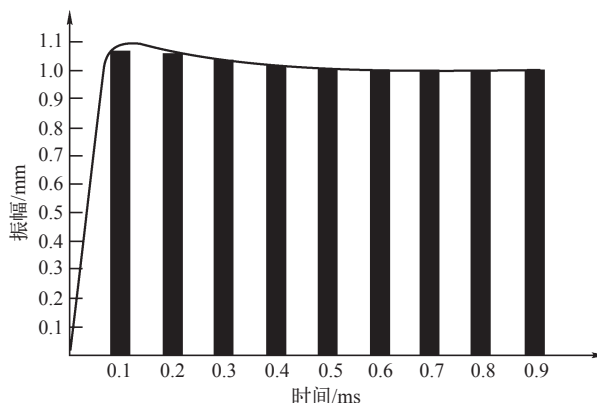


图6 电压环阶跃响应

Fig. 6 Step response of voltage loop

2可知, 本文方法的微网光伏双模式逆变器输出电压变化幅度为1 V左右, 输出电压误差为0.5%左右, 微网光伏双模式逆变器输出电压相位跟踪效果好, 而且具有稳定性。

2.3 其他方法的控制准确度对比

为了测试本文控制策略的优越性, 选择传统方法进行仿真对比实验, 每一种方法进行5次仿真实验, 统计它们的控制准确度, 结果如表3所示。从表3可以看出, 相对于传统方法, 本文方法大幅度提高了微网光伏双模式逆变器控制准确度, 减少了微网光伏双模式逆变器控制误差, 具有十分明显的优越性。

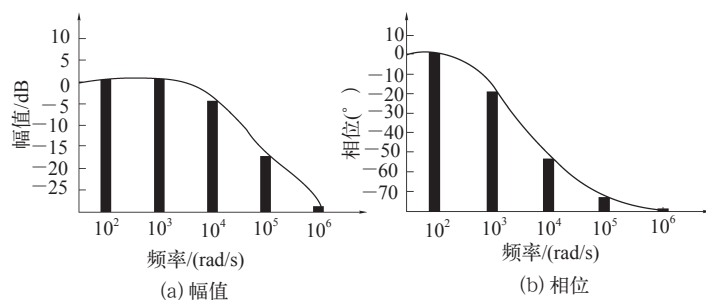


图7 电压环频率响应

Fig. 7 Frequency response of voltage loop

表2 本文方法控制结果

Tab. 2 Control results of this method

时间/ms	给定电压/V	输出电压/V	误差 (%)
0	195	196	0.51
10	202	203	0.49
20	210	209	0.48
30	202	203	0.49
40	195	196	0.51
50	202	203	0.49
60	210	209	0.48
70	202	201	0.49
80	195	196	0.51
90	202	203	0.49
100	210	211	0.48

表3 与传统方法的控制准确度对比

Tab. 3 Comparison of control accuracy with traditional methods

实验编号	本文方法	对比方法
1	88.62	95.25
2	88.77	95.60
3	89.59	96.79
4	90.72	95.86
5	89.58	95.25

3 结束语

为提升微网光伏双模式逆变器的控制性能,提出了微网光伏双模式逆变器双环控制策略。选取电容电流内环、电压外环的双环控制策略,实现微网光伏双模式逆变器控制。实验结果表明,采用该方法控制的微网光伏双模式逆变器具有较好的稳定性以及动态性能,该方法可应用于微网光伏双模式逆变器实际控制中。

参考文献

[1] 胡麟,张昌华,肖凡,等.小信号模型微网逆变

器下垂控制单环与双环动态特性研究[J].电测与仪表,2018,55(1):27-33.

[2] 王振浩,李丹,贺微,等.LCL型逆变器接入弱电网下的谐振分析及抑制方法研究[J].电工电能新技术,2018,37(6):34-42.

[3] 李虹,房春雪,郝瑞祥,等.带有源钳位光伏并网逆变器谐波形成机理与抑制方法研究[J].中国电机工程学报,2017,37(23):6971-6980.

[4] 裴淑曼,张军.基于自适应虚拟阻抗的微电网控制策略研究[J].电测与仪表,2018,55(12):82-87.

[5] 李彦哲,保婷婷.三相LCL光伏并网逆变器的新型入网控制策略[J].控制工程,2018,25(8):1511-1515.

[6] 王娜,党森.电压扰动情况光伏并网逆变器控制策略研究[J].电气传动,2019,49(6):49-53.

[7] 蒋俊祁.基于非奇异快速终端滑模控制光伏并网逆变器最大功率跟踪研究[J].可再生能源,2018,36(7):1022-1026.

[8] 麦倩屏,陈鸣.基于自抗扰控制技术的光储微电网无功支撑策略[J].电网技术,2019,43(6):2132-2138.

[9] 王旭,康家玉,曹举.基于H6拓扑非隔离单相光伏并网逆变器无功调制策略研究[J].电子器件,2019,42(3):622-626,632.

[10] 刘中原,王维庆,王海云,等.并网型光伏系统无功电压稳定性控制策略研究[J].电力电容器与无功补偿,2017,38(6):130-137.

作者简介



闫根弟

闫根弟(1967-),女,讲师,硕士,主要研究方向为电气自动控制、新能源发电技术。

(收稿日期:2019-07-16)EA