

一种光伏系统控制策略仿真分析

余 涛 梁植淇 李武强

(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要:研究了单相光伏系统在 Matlab/Simulink 下的建模与仿真。基于状态空间平均法建立了单相电压型 PWM 逆变器的数学模型,提出了增加直流侧电压控制环的双环控制策略,构建了单相光伏系统的 Simulink 模型,并进行了特性仿真。仿真结果表明,基于该控制策略的光伏系统动态响应快,输出电压总谐波畸变率低。

关键词:光伏发电;直流电压;控制策略

Abstract: The modeling and simulation on Matlab/Simulink of single - phase photovoltaic (PV) system is studied. The mathematical model of single - phase voltage PWM inverter is set up based on state - space average method. The dual - loop control strategy with the dc - link voltage control loop is proposed. And the single - phase PV system is modeled and the simulation of performances is carried out. The simulation results verify that the inverter with the proposed control strategy has a rapid dynamic response and a low total harmonic distortion (THD) of the output voltage.

Key words: photovoltaic (PV) power generation; dc - link voltage; control strategy

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2014)03 - 0073 - 04

0 引言

随着国内光伏产业规模逐步扩大、技术不断提升,光伏发电成本也逐步下降,光伏容量将大幅增加。根据不同的分类方法,光伏发电系统可以分为以下几类:按照所接入的电压等级,可分为中低压(小于 1 000 V)和高压(大于 1 000 V)发电系统;按照功率等级,可分为中小功率(一般小于 20 kW)和大功率(大于 50 kW)发电系统;按照功率传递级别,可分为单级式(一般应用于大功率系统)和两级式(一般应用于中小功率系统)光伏发电系统;按照是否含有隔离变压器,可分为隔离型和非隔离型光伏发电系统。

目前,现有研究主要集中在逆变器的电路结构^[1-2]、逆变器的控制技术^[3]、并网孤岛检测^[4-5]及孤岛时逆变器控制方式的转换^[6]等方面。

1 系统结构

下面主要研究两级式非隔离型光伏独立发电系统^[7],如图 1 所示主要由光伏阵列、BOOST 升压斩波器、电压源型单相逆变器和输出滤波器组成,具有

电路结构简单、成熟,前后级独立控制且易于模块化实现等特点,适用于中小功率的分布式发电系统中。

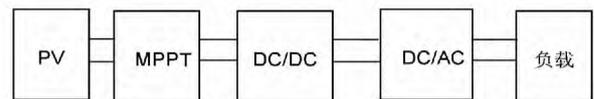


图 1 光伏系统基本结构框图

光伏独立逆变系统可以简化为图 2,假设功率开关管是理想器件,高频变压器是理想变压器,整流器也假设为理想的,那么 DC/DC 模块可以简化为一个被升压的直流电源 U_d ,即 $U_d = N \cdot V_{DC}$ 。 N 为高频变压器的匝数比; V_{DC} 为光伏电池 MPPT 输出电压。

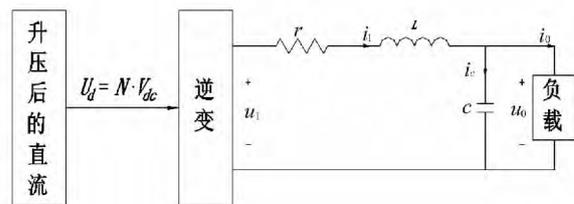


图 2 简化光伏独立逆变系统

其中 u_l 为逆变器输出电压; r 为考虑滤波电感 L 的等效串联电阻、开关管压降、线路电阻等各种阻尼因素的综合等效电阻; u_0 为逆变电源输出电压; i_l 为滤波电感 L 的电流; i_0 为负载电流,可以把它看作是系

统的一个外部扰动输入量 这样处理的好处是既符合
逆变电源负载多样性的要求 又可以建立一个形式简
单又不依赖具体负载类型的逆变电源数学模型。

选择滤波电容 c 两端电压 u_0 和流过滤波电感的
电流作为状态变量,可得到等效简单电路模型^[8,9] 系统的状态空间表达式如式(1)。

$$\begin{pmatrix} \frac{du_0}{dt} \\ \frac{di_1}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & -\frac{r}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_0 \\ i_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{pmatrix} u_1 + \begin{pmatrix} -\frac{1}{C} \\ 0 \end{pmatrix} i_0 \quad (1)$$

则系统开环时,单相逆变器的线性化等效模型
如图 3 所示。

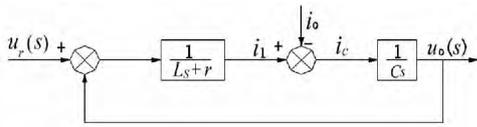


图 3 单相逆变器线性化等效模型

由逆变器的等效模型知,逆变器系统是一个多
输入单输出系统,系统要保持输出电压 $U_0(s)$ 对调
制信号 $U_r(s)$ 的快速准确跟踪,就必须对外部负载
的扰动 $i_0(s)$ 具有抑制能力,无论系统带任何负载,
系统的输出电压波形都不会发生畸变,达到完全跟
随系统的给定信号^[10,11]。

2 控制策略

前级 DC/DC 环节采用文献[12]中 MPPT 输出
电压,逆变器通常采用双环控制,逆变器的双环控制
分两类^[13]:一类是以滤波电容电流为内环被控量的电

容电流内环电压外环控制,一类是以滤波电感电流
为内环被控量的电感电流内环电压外环控制。在以
滤波电感电流为内环被控量的双环控制方式下,负
载电流 i_0 作为逆变器的外部扰动信号,处在电感电
流内环环路之外,因此电感电流内环控制对负载扰
动的抑制作用较差,输出电压波形不是很理想。

在双闭环的基础之上增加一个直流侧电压外环
控制,该控制策略使电路在直流母线电容电压上升
时,能自动调节输入功率以匹配输出功率,保证系统
额定功率输出,避免系统因直流母线过电压故障导
致的系统功率丢失,以提高光伏系统工作的可靠性。

控制策略控制框图如图 4 所示。

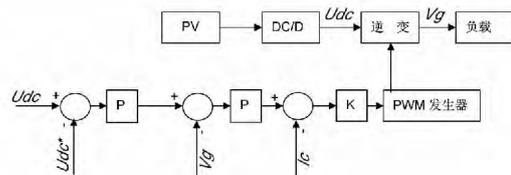


图 4 加直流外环控制控制策略框图

由于低压微网主要呈阻性,负载功率主要由其
两端电压幅值决定。该控制策略下,当光伏输出功
率与负载消耗功率不相匹配时,直流母线电压 U_{DC}
就会出现波动,其与给定信号 U_{DC}^* 的瞬时误差经过
电压 PI 调节器后直接将这种变化信息传递给交流
侧电压控制环节,从而达到提高负载功率与光伏输
出功率变化匹配性能。

3 仿真分析

在 Matlab/Simulink 中进行建模仿真,仿真模型
如图 5 所示。

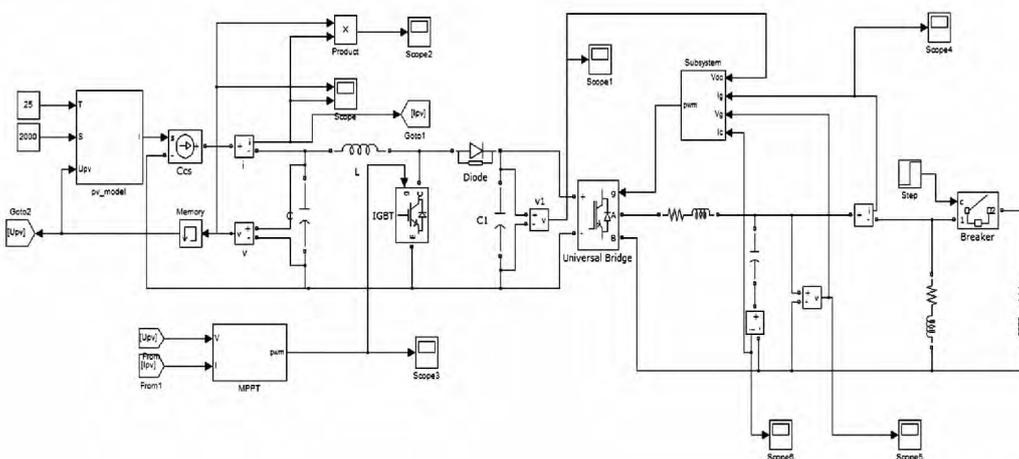


图 5 单相光伏系统仿真模型

光伏模块直接引用文献 [14] 中模块, 仿真中参数设置如下, $T = 25$, $S = 2\ 000$, 即光照强度增强至 $2\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$, 直流电压外环的 PI 参数取 $K_p = 0.41$, $K_i = 0.1$, 逆变器电压外环 PI 参数取 $K_p = 10$, $K_i = 2\ 000$, 电流内环取 $K_p = 0.5$, 经 DC/DC 变换后的空载的输出电压波形如图 6 所示。

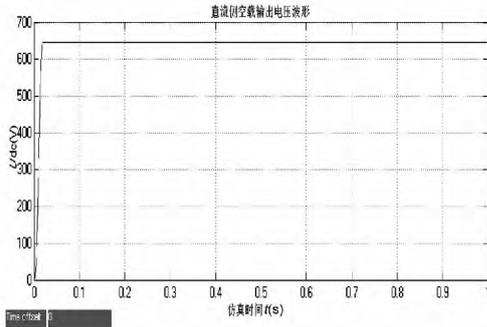


图 6 直流侧控制电压输出波形

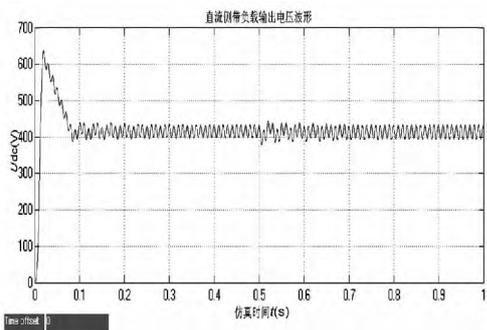


图 7 带负载后直流侧输出波形

该光伏系统接一个单相逆变器, 所带负载为一个 $33\ \Omega$ 的电阻与一个 $10\ \text{mH}$ 的电感串联构成, 待仿真运行到 $0.5\ \text{s}$ 时再并入一个相同的负载, 仿真运行时间一共 $1\ \text{s}$ 。带负载运行后直流侧输出电压波形如图 7 所示。可以看出并入一个负载以后直流侧电压略有波动, 但很快恢复平衡, 且始终停在给定电压附近。输出的电压电流波形如图 8 所示。对输出电压进行 FFT 分析, 分析结果如图 9 所示。

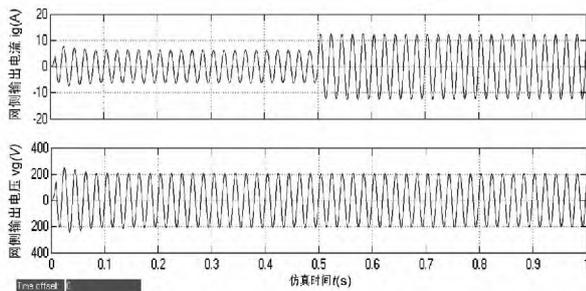


图 8 输出电压电流波形

从仿真结果可以看到, 当系统进入稳定运行以后, 电压波动基本不大, 在增加负载时, 经过短时间调整, 也很快恢复稳定运行, 其电压总谐波畸变率 (THD) 含量也相当低, 低于 2% 。同时, 而负载在 $0.5\ \text{s}$ 增加时,

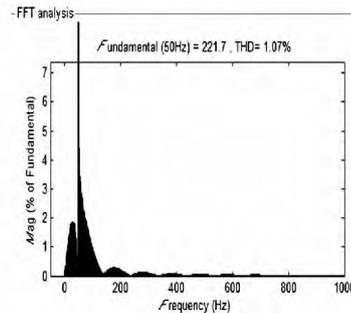


图 9 输出电压 FFT 分析

负载电流增大, 直流侧电压略微下降, 从而导致网侧电压幅值略微下降, 从而在光伏功率一定的情况下, 一定范围内调节输入功率与输出功率的功率匹配问题。

4 结 语

建立了以太阳能电池为基础的单相光伏发电系统的 Matlab/Simulink 模型, 在控制策略中引入一个直流侧电压外环控制, 该控制策略下, 在光伏系统功率大于逆变电路功率时, 自动调节直流侧流入功率仪匹配输出功率。从仿真波形中可以看到这种控制能有效地使直流母线电压稳定在预设电压值附近, 同时满足系统额定功率输出, 提高系统运行的可靠性。

参考文献

- [1] Xiao Huafeng, Xie Shaojun, Chen Yang, et al. An Optimized Transformerless Photovoltaic Grid-connected Inverter [J]. IEEE Trans. on Industry Electronics 2011, 58 (5): 1887 - 1895.
- [2] Mazumder S K, Burra R K, Huang R, et al. A Universal Grid-connected Fuel-cell Inverter for Residential Application [J]. IEEE Trans. on Industry Electronics 2010, 57(10): 3431 - 3447.
- [3] Ahn S, Park J, Chung I, et al. Power-sharing Method of Multiple Distributed Generators Considering Control Modes and Configurations of a Microgrid [J]. IEEE Trans. On Power Delivery 2010, 25(3): 2007 - 2016.
- [4] Lopes L A C, Sun Huili. Performance Assessment of Active Frequency Drifting Islanding Detection Methods [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion 2006, 21(1): 171 - 180.
- [5] 刘方锐, 余蜜, 张宇, 等. 主动移频法在光伏并网逆变器并联运行下的孤岛检测机理研究 [J]. 中国电机工程学报 2009, 29(12): 47 - 51.
- [6] Chen C, Wang Y, Lai J, et al. Design of Parallel Inverters for Smooth Mode Transfer Micro-grid Applications [J]. IEEE Trans. on Power Electronics 2010, 25(1): 6 - 15.
- [7] 张浙波, 刘建政, 梅红明, 等. 两级式三相光伏并网发电系统无功补偿特性 [J]. 电工技术学报, 2011, 26

(1): 242 - 246.

[8] Reshadi ,MMishra ,R. Dutt ,N. Instruction Set Compiled Simulation: A Technique for Fast and Flexible Instruction Set Simulation [C]. Design Automation Conference , Proceedings 2003: 758 - 763.

[9] 刘凤君. 现代逆变技术及应用[M]. 北京: 电子工业出版社 2006: 202 - 209.

[10] 许道飞. 基于 DSP 的在线式数字 UPS 数字控制技术 [D]. 杭州: 浙江大学 2003.

[11] 许爱国 ,谢少军. 电容电流瞬时值反馈控制逆变器的数字控制技术研究[J]. 中国电机工程学报 2005 25

(1): 49 - 53.

[12] 徐鹏飞. 太阳能光伏逆变器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 2009.

[13] 熊娥. 光伏独立逆变电源的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学 2009.

[14] 冒波波. 微电网运行与控制的建模与仿真[D]. 成都: 西南交通大学 2012.

作者简介:

余 涛(1988), 硕士研究生, 研究方向为微电网运行控制技术。

(收稿日期: 2013 - 12 - 02)

(上接第 72 页)

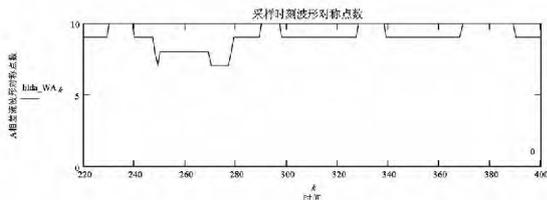


图 8 故障后 200 ms A 相差流波形对称点(电抗率 12%)

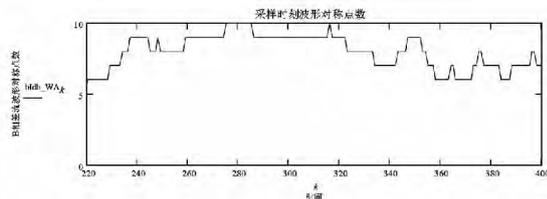


图 9 故障后 200 ms B 相差流波形对称点(电抗率 12%)

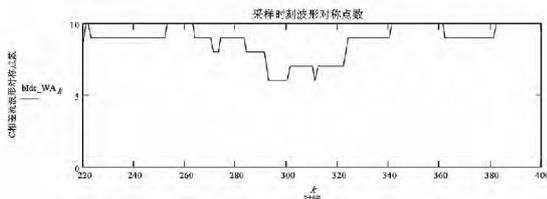


图 10 故障后 200 ms C 相差流波形对称点(电抗率 12%)

4 结 语

对并联电容器中电抗率选择、系统故障时放电电流对变压器保护的影响进行了分析, 得出了以下结论: ①并联电容器在系统故障时会形成振荡放电回路, 其振荡频率与电容器中电抗率有紧密的关系。②当变压器区内发生故障时, 并联电容器的放电电流会计入差流, 增大差流中的谐波含量。③放电电流会造成变压器保护尤其是高阻抗变压器保护中励磁涌流判别元件误闭锁差动保护, 导致差动保护延时动作甚至拒动。④考虑到 3 次谐波判据为 2 次谐波制动判据的补充辅助判据, 但在电容器 12% 电抗率情况下 3 次谐波会闭锁差动保护, 建议在判为区内故障时取消 3 次谐波闭锁, 只保留 2 次谐波闭锁, 防止差动保护拒动。⑤在电容器 6% 电抗率情况

下, 波形对称原理会闭锁差动保护, 建议在判为区内故障时采用滤波算法滤除差流中含有的 4 次谐波, 防止 4 次谐波增大而导致判为不对称, 防止差动保护拒动。

综上所述, 变压器保护必须考虑并联电容器放电电流的影响, 采取措施提高差动保护的可靠性。

参考文献

[1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理及应用(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社 2001.

[2] 王志杰, 季美红. 低压并联电容器装置中串联电抗器的选用[J]. 电工电气 2009(8): 32 - 34.

[3] 洪贞贤. 减少谐波电流对补偿电容器影响的措施[J]. 电力电容器, 2007(5): 39 - 40.

[4] 孙志杰, 陈云仑. 波形对称原理的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 1999(4): 42 - 46.

[5] 孙志杰, 曾献华, 汤汉松, 等. 磁通制动原理在变压器差动保护中的应用[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(1): 160 - 164.

[6] 李贵存, 刘万顺, 腾林, 等. 基于波形相关性分析的变压器励磁涌流识别新算法[J]. 电力系统自动化, 2001 25(17): 25 - 28.

[7] 赵永彬, 卢毅. 主设备变压器保护谐波制动改进[J]. 电力自动化设备 2002 22(7): 1 - 5.

[8] 杨帆, 李晓明, 郑秀玉, 等. 电力系统分数次谐波的产生机理、危害与特征[J]. 高电压技术 2007 33(12): 153 - 156.

[9] 束洪春. 电力工程信号处理应用(第一版)[M]. 北京: 科学出版社 2009.

[10] 吴国沛, 刘育权, 任震. 电力系统谐波对继电保护的影响[J]. 电力自动化设备 2007 22(7): 78 - 79.

作者简介:

陈 实(1985), 助理工程师, 硕士生在读, 主要从事电力系统继电保护的研究;

张 尧(1984), 助理工程师, 硕士生在读, 主要从事电力系统继电保护的研究;

郭 晓(1982), 工程师, 硕士, 主要从事电力系统继电保护的研究。

(收稿日期: 2014 - 03 - 04)