

一种新型多电平逆变器在光伏并网系统的应用

冯 彬, 张广明

(南京工业大学, 自动化与电气工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 传统光伏并网逆变器多采用二电平逆变器, 多电平逆变器受其复杂电路拓扑的制约在光伏系统中应用较少。在传统五电平逆变器拓扑基础上, 提出一种简化的 H 桥五电平单相光伏逆变器。该逆变器采用特定谐波消除法调制控制方案, 系统并网电流采用模糊 PI 自整定控制方法, 输出电压和电流具有较低的谐波和 du/dt , 改善了系统稳定性, 提高了系统动态响应过程。构建仿真实验分析验证了控制策略的有效性和可行性。

关键词: 多电平逆变器; 电流控制; 模糊控制

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X (2011) 04-0010-03

A Novel Multilevel Inverter and Its Application in Grid-connected Photovoltaic System

FENG Bin, ZHANG Guang-ming

(Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

Abstract: Traditional grid-connected photovoltaic (PV) inverters are based on two or three-level inverter. Multilevel inverter topology constrained by its complex circuit system is seldom used in PV system. A modified H-bridge five-level single-phase grid-connected inverter on the base of the traditional five-level inverters topology is proposed. The new inverter uses selective harmonic elimination method and grid-connected current control using the self-adaptive fuzzy PI control method. The output voltage and current have less harmonics and lower du/dt , the control can improve stability of the system and dynamic response of the process. The simulation results verify that the control strategy is valid and feasible.

Keywords: multilevel inverter; current control; fuzzy control

Foundation Project: Supported by Jiangsu Science & Technology Department of Industrial Technology Project (No. BE2009166)

1 引言

随着传统能源的日益减少, 电力系统正面临巨大的变革, 光伏发电等分布式发电系统已经成为未来电力系统的发展方向。而并网逆变器作为光伏发电系统与电网接口的核心设备, 对其结构与控制方法的研究在提高系统发电效率、降低成本方面具有极其重要的意义。

多电平逆变器的输出电压谐波小, 电磁干扰小, 且能提高电源质量, 减小滤波器体积。随着光伏发电等分布式发电系统的发展, 多电平技术已经从传统的高压、大功率向中、低压功率的应用方面渗透^[1]。在此采用一种新型的五电平逆变器拓扑, 相比于传统五电平逆变器拓扑结构, 在输出相

同电平的情况下具有更少的功率开关管、箝位二极管、功率二极管以及电容器件^[2]。

在光伏并网系统中广泛使用 PI 控制、重复控制等。重复控制虽然能保证输出波形, 但其动态性能较差, 当系统参数发生变化或有非线性堵塞时, 控制不能达到理想效果, 且系统的输出波形畸变严重。为更好地提高系统性能, 并网电流控制采用模糊 PI 自整定方法, 使 PI 控制器参数能自动调节, 从而使送入 PWM 调制器的参考电压信号得到改善, 使系统具有更好的稳态和动态性能^[3-6]。

2 新型五电平逆变器拓扑及其调制方法

图 1 示出的新型五电平逆变器拓扑由一个传统全桥逆变器及一个辅助电路组成。新型逆变器的关键点在于通过由二极管 $VD_1 \sim VD_4$ 和功率开关管 VS_2 组成的辅助开关巧妙解决了输出端 a 点和直流母线中点 o 的电流传输问题。 $VD_1 \sim VD_4$ 构成了一个不可控整流器, 利用 VS_2 就能自由控制 a 点和 o 点的通断, 保证它们之间电流的双向流动, 从而有序组合出五电平电压。

基金项目: 江苏省科技厅工业科技支撑项目 (BE2009166)

定稿日期: 2010-11-01

作者简介: 冯 彬 (1985-), 男, 河南平顶山人, 硕士研究生, 研究方向为太阳能光伏并网发电技术。

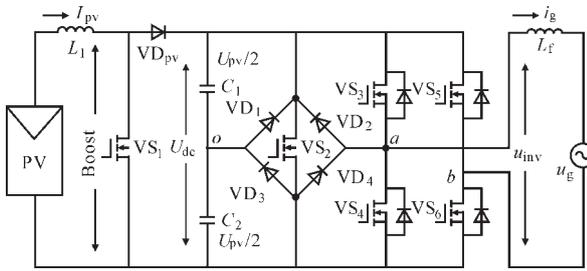


图1 新型逆变器拓扑及系统结构

2.1 新型拓扑组合出多电平原理

根据上述新型五电平逆变器的拓扑结构,分析逆变器的工作原理。设 $U_{dc}=U_{pv}$,以 o 为参考点,输出电压 u_{inv} 分别有 $0, U_{pv}/2, U_{pv}, -U_{pv}/2, -U_{pv}$ 这5种电平,分别由5种开关组合状态来实现:当 VS_3, VS_6 同时导通时, $u_{inv}=U_{pv}$;当 VS_2, VS_6 同时导通时, $u_{inv}=U_{pv}/2$;当 VS_3, VS_5 或 VS_4, VS_6 同时导通时, $u_{inv}=0$;当 VS_2, VS_5 同时导通时, $u_{inv}=-U_{pv}/2$;当 VS_4, VS_5 同时导通时, $u_{inv}=-U_{pv}$ 。表1为 U_{inv} 5种电平对应的各开关状态,其中“1”为导通,“0”为关断。

表1 5种电平对应的各开关状态

VS_2	VS_3	VS_4	VS_5	VS_6	u_{inv}
0	1	0	0	1	U_{pv}
1	0	0	0	1	$U_{pv}/2$
0	0/1	0/1	1/0	1/0	0
1	0	0	1	0	$-U_{pv}/2$
0	0	1	1	0	$-U_{pv}$

2.2 新型拓扑 PWM 控制策略

在所提出的新型五电平逆变器中,采用特定谐波消除法(SHEPWM)作为该拓扑结构的调制方式。该方法能有效消除低频次谐波,极大地降低系统的开关频率,从而降低损耗。其基本思想是通过傅里叶级数分析,得出在特定开关角下的傅里叶级数展开式,然后令某些特定的低次谐波为零,从而得到一个反映 N 个开关角的 N 个非线性独立方程组,按求解的开关角进行控制,则必定不含这些次数的谐波。

图2示出新型五电平逆变器调制原理图。采用自然采样三角载波层叠SPWM法获取开关转换角序列初始值,并得到1/4周期对称的期望输出电压波形,如图2所示。可见,逆变器输出电压波形满足Dirichlet定理,其傅里叶级数表达式为:

$$u_{ab}(\omega t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)], \quad (1)$$

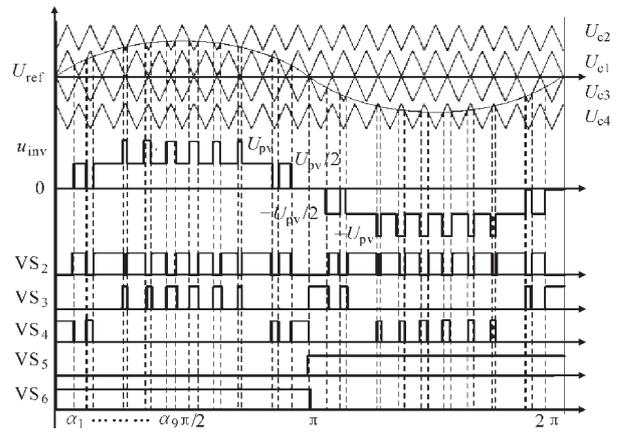


图2 新型五电平逆变器调制原理

因逆变器输出电压是1/4周期对称波形,故傅里叶级数仅含奇次正弦项谐波,则有:

$$\begin{cases} a_n=0, n=1, 2, 3, \dots \\ b_n = \begin{cases} 0, n \text{ 为偶数} \\ \frac{4E}{n\pi} [\cos(n\alpha_1) - \cos(n\alpha_2) + \cos(n\alpha_3) + \cos(n\alpha_4) - \cos(n\alpha_5) + \cos(n\alpha_6) - \cos(n\alpha_7) + \cos(n\alpha_8) - \cos(n\alpha_9) - \cos(n\pi/2)] n \text{ 为奇数} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

为便于计算,令 $E=1$,即将直流侧电压归一化,则 $b_1=M$, M 为调制。上式化简为:

$$\begin{cases} b_1=M \\ b_n=0, n=3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, \dots \end{cases} \quad (3)$$

方程组(2),(3)可统一为 $f(\alpha)=[M, 0, \dots, 0]^T$,此式为一个非线性超越方程组,采用牛顿迭代法,利用Matlab数学工具,即可解出 $\alpha_1 \sim \alpha_9$ 的值,从而实现电路的SHEPWM控制。

由图2可见一个周期内主、从开关 $VS_2 \sim VS_6$ 的导通状态分布。在前半周期内,主开关 VS_6 一直导通,主开关 VS_3 和 VS_4 分别以载波频率进行通断动作,从开关 VS_2 分别跟随 VS_3 和 VS_4 作同频率的互补通断动作,进而得到 $0, U_{dc}/2, U_{dc}$ 的三电平PWM输出电压波形。同理得到后半周期内 $0, -U_{dc}/2, -U_{dc}$ 的三电平PWM输出电压波形。

3 控制系统设计

图3示出整个系统控制结构,它主要由一个最大功率跟踪控制器、一个直流端电压控制器及一个并网电流控制器构成。MPPT的功能是调节占空比,通过改变占空比改变PV电池板的电压输出。直流端电压控制的作用是保持DC/DC升压变换器 U_{dc} 恒定。同步锁相电路保证光伏逆变器的输出电流的频率和相位与电网电压严格同步。经锁相环得正弦波与前面经离散PI控制器得到的

电流相乘就能得到逆变器的具体电流参考信号。

并网电流控制采用模糊 PI 自整定方法,通过自整定 PI 控制器产生参考电压信号送入 PWM 调制器中进行调制,以产生驱动开关动作信号。

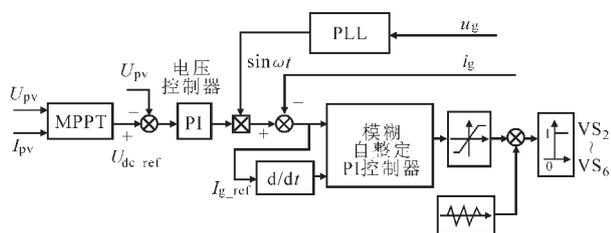


图 3 系统控制框图

模糊自整定 PI 控制器采用两输入-两输出形式,输入变量是电流误差 e 和误差变化率 ec ,输出变量为 K_p, K_i ,其量化等级均为 {NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB},论域均定义为 $[-3, 3]$ 。隶属函数 NB, PB 选为高斯函数,其余均选为三角函数。

接下来确定模糊控制规则,在不同的 e 和 ec 条件下,被控对象对参数 K_p, K_i, K_d 的自整定要求应满足以下规律:①当 $|e|$ 较大时,应取较大的 K_p 和较小的 K_d ,使系统响应加快;②当 $|e|$ 中等时,应取较小的 K_p 及适当的 K_i 和 K_d ,使系统具有较小的超调;③当 $|e|$ 较小时,应取较大的 K_p 和 K_i 以及适当的 K_d ,以避免在平衡点附近出现振荡,使系统具有较好的稳态性能。由上述调整原则能确定模糊 PI 自整定控制器的参数调整规则。经过上述过程,可得模糊 PI 控制器主要参数 K_p 和 K_i 的整定值。

4 实验结果

为验证上述新型五电平逆变器拓扑以及控制方法的可行性和正确性,使用了 Matlab/Simulink 软件对所提出的新型拓扑和控制方法进行了仿真研究。光伏模板的仿真模型参数如下:短路电流 $I_{sc}=5.45$ A,开路电压 $U_{oc}=22.2$ V,最大功率点电流 $I_{mp}=4.95$ A,最大功率点电压 $U_{mp}=17.2$ V。而两个直流端电容 $C_1=C_2=1100$ μ F,电感 $L_1=2.2$ mH,滤波电感 $L_f=3$ mH,直流侧电压 $U_{dc}=200$ V,取调制比 $M=0.9$,载波频率为 1100 Hz,输出电压频率为 50 Hz。

图 4a 为逆变器输出电压波形,由图可见,共有 5 种不同的电平 (0, ± 100 V, ± 200 V) 输出。输出电压波形与理论分析结果一致。仿真设置输出频率为 50 Hz,1/4 周期内开关角 $N=9$,9 个开关角即可消除 8 个低频次谐波,因为是单相电路,故理论上 SHEPWM 技术可消除 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15,

17 次共 8 个低频次谐波。从图 4b 可见, SHEPWM 消谐效果很好,低次谐波基本都被消除。图 4c, d 为系统并网电流波形及频谱图,由图可见,在 0.1 s 仿真时间内输出了 5 个周期标准正弦波电流,并网电流波形质量好,电流谐波畸变率低,完全能够与电网电压实现同频同相。

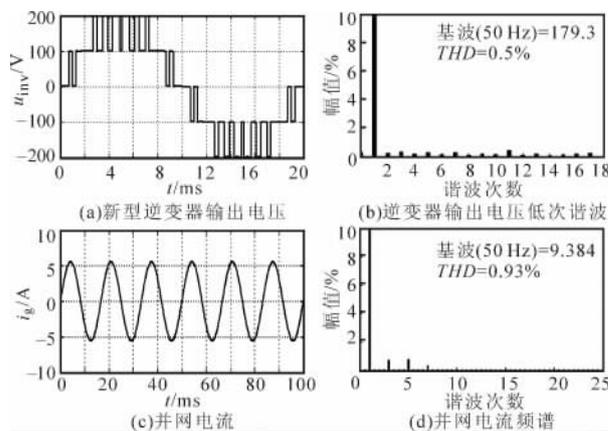


图 4 实验波形

5 结论

提出一种新型单相五电平逆变器在光伏系统中的应用。新型五电平逆变器拓扑所需开关器件少,开关损耗小,成本低。运用特定谐波消除法调制方式,对开关管的控制简单有效,产生的波形质量较高,有效地消除了低频次谐波,这对于提高电网安全性和稳定性都具有重大意义。光伏逆变器并网电流采用模糊自整定 PI 控制,提高了系统动态和稳态特性。与传统二电平逆变器相比,该五电平逆变器具有更小的谐波畸变率,输出波形质量大大提高,对于光伏并网系统而言是一个不错的选择,具有很好的发展前景。

参考文献

- [1] 王成智,邹云屏,徐湘莲,等.新型数字化单相五电平逆变器系统的实现[J].电力电子技术,2006,40(1):21-23.
- [2] 张云,孙力,吴凤江,等.一种具有高性价比的五电平逆变器拓扑[J].电机与控制报,2010,12(4):385-390.
- [3] 雷惠芳.智能控制在电流控制电压型逆变器中的应用[D].武汉:华中科技大学,2003.
- [4] Rahim NA, Selvaraj J. Five-level Inverter with Dual Reference Modulation Technique for Grid-connected PV System[J]. Renewable Energy, 2010, 35(5):712-720.
- [5] Tolbert LM, Haberler TG. Novel Multilevel Inverter Carrier-Based PWM Method[J]. IEEE Trans. on Industry Application, 1999, 35(5):98-107.
- [6] Pandey A, Singh B, Singh BN, et al. A Review of Multilevel Power Converters[J]. Journal EL, 2006, 8(6):220-231.