

[文章编号] 1003-4684(2019)01-0048-04

补偿不平衡负荷的三相四线光伏并网逆变器研究

冯楚游龙¹, 靳超凡¹, 席自强²

(1 湖北省电力装备有限公司, 湖北 武汉, 430060;

2 湖北工业大学太阳能高效利用储能运行控制湖北省重点实验室, 湖北 武汉, 430068)

[摘 要] 针对光伏系统, 提出一种基于指令信号生成的二极管钳位型三相四线逆变系统结构。通过建立相应的仿真模型, 对三相四线光伏并网逆变系统的工作原理进行了深入的分析。最终仿真结果显示, 研究的控制策略和调制方法能使三相四线光伏并网逆变器具备负载不平衡补偿的功能, 有效补偿了纯阻性、谐波负载等复合型负载所产生的不平衡。

[关键词] 光伏逆变器; 三相四线; 三电平

[中图分类号] TM464

[文献标识码] A

在光伏发电系统里面, 逆变器有着十分显著的作用。光伏发电系统并网电能质量很大程度上取决于逆变器工作效率。而三相不平衡问题也是逆变器中重点解决的问题之一, 三相不平衡的情况, 在系统运行中会引发比较严重的后果, 例如当旋转电机在三相不平衡时会产生很大的额外热量并且会引起振动, 从而影响旋转电机的正常运行和工作。同时由于我国电力配送网主要采用三相四线制供电, 存在着大量的单相用电单元。因此, 对带三相不平衡问题的电力系统采取相应的补偿措施具有相当重要的意义。

本文研究一种新型的三相四线光伏系统, 在实现大功率光伏并网发电的基本功能的同时还可以, 针对不平衡负荷实现不平衡补偿功能, 在深入分析现有研究的基础上, 试图通过结构的优化和控制的改进, 在解决光伏发电和不平衡补偿领域的关键科学问题方面能够有所突破。

1 并网逆变器的拓扑选择

本文采用二极管钳位型三电平逆变器拓扑结构^[1-4], 中线上选择不含有电感的结构则可以将三个桥臂分别看做三个完全独立控制的系统。逆变器拓扑结构见图 1。由图 1 可以定义开关函数如下:

$$S_j = \begin{cases} 2 & V_{1j}, V_{2j} \text{ 导通;} \\ 1 & V_{2j}, V_{3j} \text{ 导通;} \\ 0 & V_{3j}, V_{4j} \text{ 导通} \end{cases}$$

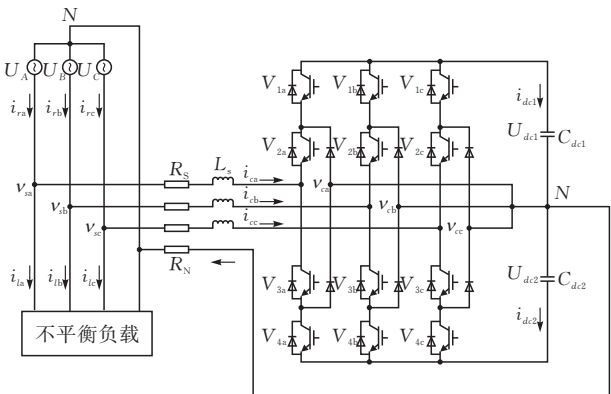


图 1 二极管钳位型三电平逆变器拓扑结构

式中 $j = a, b, c$ 。

暂不考虑直流侧上、下桥臂电容电压不平衡问题, 则各桥臂对电网中性点电压可以描述如

$$\begin{cases} u_{AN} = (S_a - 1) U_{dc} \\ u_{BN} = (S_b - 1) U_{dc} \\ u_{CN} = (S_c - 1) U_{dc} \end{cases} \quad (1)$$

式中 U_{dc} 表示逆变器直流侧电压的 1/2, 即直流侧中点无偏移的情况下单个电容的电压。

根据图 1 以及式 (1) 可以得到输出电感上的电流、电压关系如下:

$$\begin{aligned} U_{sa} &= (S_a - 1) U_{dc} + L_s \frac{di_{ca}}{dt} + R_s i_{ca} + R_N i_{cN} \\ U_{sb} &= (S_b - 1) U_{dc} + L_s \frac{di_{cb}}{dt} + R_s i_{cb} + R_N i_{cN} \\ U_{sc} &= (S_c - 1) U_{dc} + L_s \frac{di_{cc}}{dt} + R_s i_{cc} + R_N i_{cN} \end{aligned}$$

[收稿日期] 2018-03-14

[第一作者] 冯楚游龙(1991-), 男, 湖北黄冈人, 工学硕士, 湖北省电力装备有限公司助理工程师, 研究方向为电能质量控制

其中： i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 为逆变器输出电流， L_s 为输出连接电感， R_s 为线路等效电阻， R_N 为中线等效电阻。

2 并网逆变器的工作原理分析

2.1 逆变器的工作模式分析

本文逆变器拓扑结构通过改变开关管的状态可以实现图 2 及表 1 所示的三种工作模式^[5-6]。由于三个桥臂均能够实现独立控制，故选取其中一个桥臂进行分析，依据开关的不同组合，可以得到三种工作状态：“P”态（或称“1”态），“O”态（或称“0”态），“N”态（或称“-1”态）。

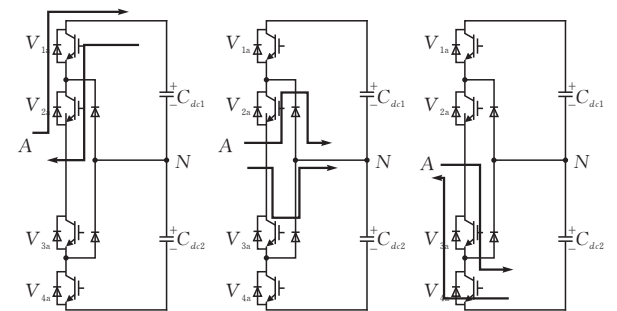


图 2 不同开关组合下 A 桥臂输出状态示意图

1) “P”态：当 S_{a1} 、 S_{a2} 导通而 S_{a3} 、 S_{a4} 关闭，同时电流方向从中性点经过二极管流向配电网侧，则 A 点电压 $U_A = 1/2U_{dc}$ ；而当 S_{a3} 、 S_{a4} 关闭，电流方向由配电网侧经二极管流向中性点，此时同样也有 A 点电压 $U_A = 1/2U_{dc}$ 。

2) “O”态：当 S_{a2} 、 S_{a3} 导通而 S_{a1} 、 S_{a4} 关闭，同时电流方向从中性点经过二极管流向配电网侧，此时有 A 点电压 $U_A = 0$ ；还有一种情况是电流由 A 流入，电流方向由配电网侧经二极管流向中性点，此时 A 点电压 $U_A = 0$ 。

3) “N”态：当 S_{a3} 、 S_{a4} 导通而 S_{a1} 、 S_{a2} 关闭，同时电流方向从中性点经过二极管流向配电网侧，则 A 点电压 $U_A = -1/2U_{dc}$ ；而当 S_{a1} 、 S_{a2} 关闭，电流方向由配电网侧经二极管流向中性点，有 A 点电压 $U_A = -1/2U_{dc}$ 。

表 1 三电平逆变器的每相开关状态

开关	S_{1x}	S_{2x}	S_{3x}	S_{4x}	V_x
P	ON	ON	OFF	OFF	$V_{dc}/2$
O	OFF	ON	ON	OFF	0
N	OFF	OFF	ON	ON	$-V_{dc}/2$

通过特定的规律改变每一桥臂开关管的通断情况，由控制之后的相电压 U_A 和 U_B ，可以推得线电压 U_{ab} 。保障逆变系统的输出相电位在 $U_{dc}/2$ 、0 和 $-U_{dc}/2$ 这三种电位状态之间变化。

2.2 补偿不平衡负荷的指令信号生成方法

指令信号生成方法是基于无功电流检测中零序

电流分离法^[7-9]的研究分析，首先检测三相负载电流 i_a 、 i_b 、 i_c 中的各相零序分量，然后分别把零序分量从此三相负载电流中消除，把消除零序之后的电流进行 3/2 变换，即可求得相应的有功分量和无功分量。断开 I_q 通道， I_d 经低通滤波器后获得相应的直流分量 i_a' 、 i_b' 、 i_c' ，再进行坐标反变换得到基波有功分量，并用三相负载电流 i_a 、 i_b 、 i_c 减去 i_{af} 、 i_{bf} 、 i_{cf} ，得到所需补偿的信号 i_{ar} 、 i_{br} 、 i_{cr} ，其中含有三相负载电流的无功、基波负序、零序以及谐波分量。

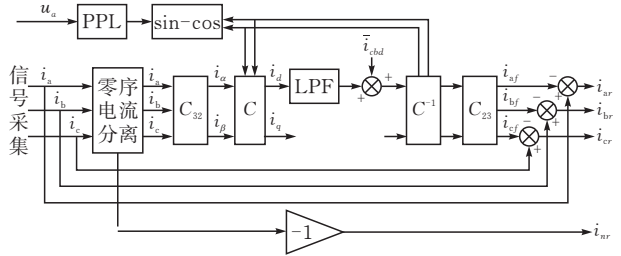


图 3 零序电流分离法原理图

3 三电平三相四线制逆变系统调制方式

本文选用单正弦波双三角波调制^[10-13]作为该逆变系统的调制方法。参考正弦波为 R_x ，两个三角载波分别为 T_{r1} 和 T_{r2} ，且两者幅值、相位均相同。其中 T_{r1} 位于正象限，而 T_{r2} 位于负象限。

此时开关管控制规律如下：在 $R_x > T_{r1}$ 时， S_{x1} 、 S_{x2} 导通，输出相电压为 $1/2U_{dc}$ ，在 $R_x < T_{r1}$ 时， S_{x2} 、 S_{x3} 导通，输出相电压为零电平，为高电平有效；在 $R_x > T_{r2}$ 时， S_{x2} 、 S_{x3} 导通，输出相电压为零电平，在 $R_x < T_{r2}$ 时， S_{x3} 、 S_{x4} 导通，输出相电压为 $-1/2U_{dc}$ ，为低电平有效。其中驱动波形见图 4。

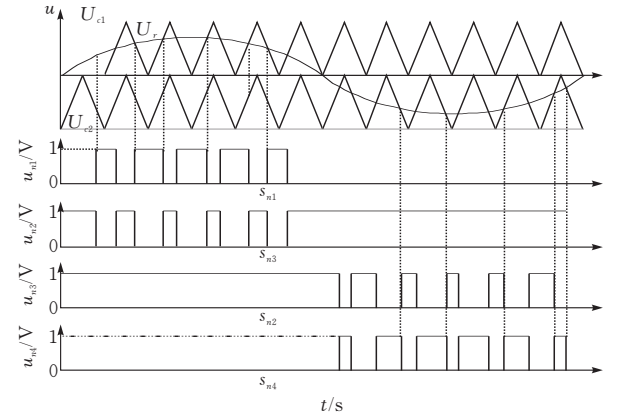


图 4 三电平逆变器 SPWM 驱动策略示意图

4 实验验证

基于以上检测方法和调制方法的研究，通过

Matlab/Simulink 建立仿真模型,进行仿真实验研究。电网取线电压为 380 V 的三相电源,频率为 50 Hz,负载为含有电阻电感的三相不平衡负载情况进行仿

真分析,三相负载的电阻分别为 $4\ \Omega$ 、 $10\ \Omega$ 、 $10\ \Omega$,电感为 4 mH,开关频率为 18 kHz。仿真模型图如图 5 所示。

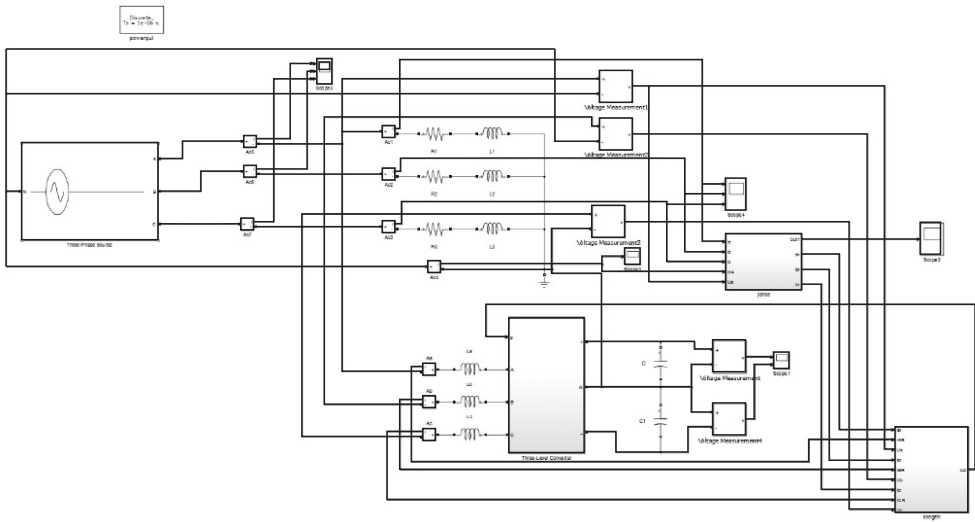


图 5 逆变部分仿真

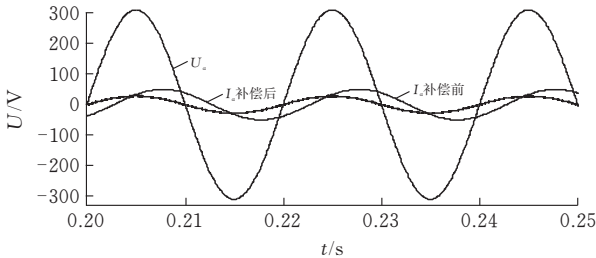


图 6 ABC 三相电压补偿前

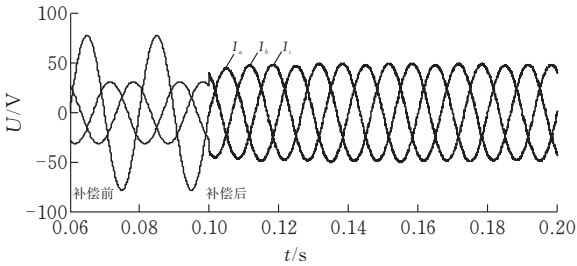


图 7 ABC 三相补偿后实现了三相平衡

通过三相不平衡负载情况下补偿前后电压波形对比,补偿作用前电流滞后于电压,补偿后电压与电流实现了相位相同,达到了无功补偿的目的。补偿后三相电压达到了平衡。验证了此系统能实现不平衡负载情况下的补偿功能。

5 结论

本文采用基于零序电流分离的指令信号生成方法和 SPWM 双三角波调制相结合的新型复合控制策略,对三电平三相四线光伏逆变器中不平衡负载补偿实现了三相平衡。实验结果表明,本文提出的通过指令信号生成方法补偿光伏并网系统中的不平衡负载具有良好的动态性能和稳态性能,是正确

可行的。

[参 考 文 献]

[1] 魏晓光,王新颖,高冲,等. 三相 T 型三电平光伏逆变器技术研究[J].中国电机工程学报,2014(34): 218-225.

[2] 赵成勇,李路遥,翟晓萌,等. 基于三电平逆变器的有源电力滤波器研究[J].电力系统自动化,2014, 38(4): 72-78.

[3] 李真贵,胡杨昊,余海湘,等.三电平逆变器改进型 SVPWM 研究与实现[J].计算技术与自动化,2014 (4):49-54.

[4] Rivera S, Wu B, Kouro S, et al. Electric vehicle charging station using a neutral point clamped converter with bipolar DC bus[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4):1999-2009.

[5] Chen H C, Liao J Y. Design and implementation of sensorless capacitor voltage balancing control for three-level boosting PFC[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7):3808-3817.

[6] Yaramasu V, Bin W.Predictive control of a three-level boost converter and an NPC inverter for high-power PMSG-based medium voltage wind energy conversion systems[J]. IEEE Trans. Power Electron, 2014, 10 (29):5308-5322.

[7] 张珍珍,许春雨.三电平 NPC 型逆变器中点电位稳压器的设计[J].电气传动,2014(12):26-31.

[8] Prasadarao V S K, Rao K V K, Rao P B K, et al. Power quality enhancement in grid connected pv systems using high step up dc-dc converter.[J]. International Journal of Electrical & Computer Engineering, 2017,7(2):720-728.

[9] Ahmadzadeh S, Markadeh G A. Incremental conductance based MPPT using a high step-up Y-source DC-DC Converter[C]// Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference. IEEE, 2017.

[10]王新宇,何英杰,刘进军.注入零序分量 SPWM 调制三电平逆变器直流侧中点电压平衡控制机理[J].电工技术学报,2011(5):70-77.

[11] 张志,谢运祥,乐江源,等.二极管钳位型单相三电平

逆变器空间矢量脉宽调制方法[J].中国电机工程学报,2010(27):62-68.

[12] 李国丽,史晓锋,姜卫东,等.二极管钳位型多电平逆变器脉宽调制时电容电压均衡方法[J].电工技术学报,2009(7):110-119.

[13] 杨超,谢维达,袁登科,等.一种新型的三电平逆变器拓扑结构研究[J].机电一体化,2009(5):74-77.

Research on Three-phase Four-wire Photovoltaic Grid-connected Inverter with Unbalanced Load

FENG Chuyoulong¹, JIN Zhuofan¹, XI Ziqiang²

(1 Hubei Electric Power Equipment Co., Ltd. Wuhan 430060, China ;

2 Hubei Key Laboratory for High-efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System , Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: With the rapid development of power system, some of the contradictions associated with the power system are also increasingly prominent, three-phase imbalance will lead to more serious consequences for three-phase four-wire photovoltaic system, based on the instruction signal generated diode clamped three - phase four - wire photovoltaic inverter. The simulation model of the corresponding PV system was established, and the working principle of the three - phase four - wire photovoltaic grid - connected inverter was analyzed deeply. The experimental results show that the control strategy and the modulation method can make the three-phase four-wire photovoltaic grid-connected inverter achieve the purpose of load unbalance compensation, which effectively compensates for the imbalance caused by the composite load such as pure resistance and harmonic load.

Keywords: PV inverter; three-phase four-wire; three level

[责任编辑：张岩芳]

(上接第 33 页)

Finite Element Analysis on a New Type of Steel Tubular Assembled Buckling Restrained Brace

LI Hong, XIAO Benlin, WU Weibo, LIU Bei

(School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ.of Tech.,Wuhan 430068,China)

Abstract: A new steel tube buckling restrained brace was proposed based on the analysis and summary of the problems in the existing buckling restrained braces. The finite element analysis of ABAQUS software was carried out, to compare the seismic performance of the seismic performance and the buckling constraint braces of the open double pipe and the buckling restraint of the triplex pipe, and analyse the number of axial gear rows, the ratio of coaxial gear size gear diameter, and the influence of connection form on support performance. The results indicate that, under the condition of the same length, cross section area and yield state, the energy dissipation capacity of the new steel tube buckling restrained brace is the best. The number of axial gear rows should be greater than 2 rows; the ratio of coaxial gear size gear diameter should not be greater than 3. It is suggested that the connection form of the brace should be designed to be fixed.

Keywords: buckling restrained brace; finite element analysis; energy dissipation capacity; seismic action

[责任编辑：裴 琴]