

文章编号:1000-582X(2006)12-0045-03

# 双频双 Buck 换流器有功无功调节的控制算法及仿真\*

王 娟,周 维 维,杜 雄

(重庆大学 电气工程学院 高电压与电工新技术教育部重点实验室,重庆 400030)

**摘 要:**针对一种单周控制的新型双频双 Buck 型柔性换流接口电路,推导出有功无功独立可调的算法和控制方程. 基于单周控制的控制方程运用简单的控制电路就可实现交流侧有功功率与无功功率的控制,并对系统进行了仿真,结果验证了理论推导的正确性.

**关键词:**双频双 Buck 型换流器;单周控制;有功调节;无功调节

**中图分类号:**TM461

**文献标识码:**A

新能源发电的并网运行离不开换流器的作用. 根据文献[1-3],应用于高压大功率的逆变器主要具有 2 类拓扑结构:1) 两电平拓扑结构;2) 多电平拓扑结构. 两电平拓扑结构广泛应用于功率变化范围比较大的场合,电路简单、占地面积小,但是半导体开关元件的阻断电压比较大,交流侧波形畸变大,由于开关频率高,造成变换器开关损耗大. 多电平变换器作为一种新型的高压大功率变换器,无需输出变压器和动态均压电路,开关频率低,因而开关器件应力小,系统效率高. 但是电路结构比较复杂,开关损耗大. 文献[4]中提出了一种新型的双频双 Buck 型电压源换流器,与传统的电压源换流器相比,该换流器的电路结构中所用的高频开关器件的数目远远少于前者. 而所采用的单周控制电路简单可靠,属于恒频控制,控制效果好. 文中针对这种单周控制的新型双频双 Buck 型柔性换流接口电路的等效电路进行分析,推导出了基于单周控制的有功无功独立可调的算法和控制方程,最后给出了系统的仿真波形,仿真结果验证了理论推导的正确性.

## 1 结构及工作原理

双频双 Buck 型换流电路的拓扑结构如图 1 所示. 晶闸管三相桥和双向开关  $S_a$ 、 $S_b$ 、 $S_c$  将 Buck 变换器的输出电流包络逆变为三相正弦电流. 其中晶闸管工作在工频 50 Hz,双向开关工作在 2 倍工频 100 Hz. 主开关  $S_1$  和  $S_2$  工作在高频,开关  $S_{1a}$  和  $S_{2a}$  为辅助开关工作在低频(远小于高频但远大于工频). 当桥臂中某两相

的可控硅导通工作时,双向开关  $S_a$ 、 $S_b$ 、 $S_c$  中与这两相对应的开关关断,另一个开关导通. 即相电压最大的相与相电压最小的相所对应的晶闸管导通,相电压居中相所对应的双向开关导通. 文献[4]中分析得知即使主开关  $S_1$  和  $S_2$  工作在比较高的频率下,也不至于产生太大的开关损耗,虽然辅助开关  $S_{1a}$  和  $S_{2a}$  承受较大的电流,但由于开关频率比主开关频率低得多,从而减小了开关损耗,提高了效率.

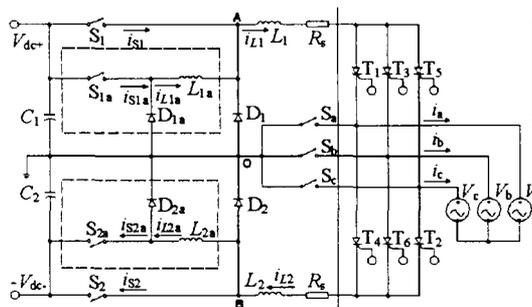


图 1 双频双 Buck 型换流电路拓扑结构

为了方便讨论,将一个工频周期分为 6 个时间段如图 3 所示. 以时间段 I 为例,此时  $v_a > v_c > v_b$ , 那么开关  $S_c$  导通,开关  $S_a$ 、 $S_b$  关断,晶闸管  $T_{ap}$ 、 $T_{bn}$  导通. 由于在不同的时间段逆变桥中晶闸管导通的情况不同,采用“ $x-y-z$ ”标示.  $x, y, z$  是  $\{a, b, c\}$  中的取值且互不相同. 设  $v_x > v_y > v_z$ , 这时开关  $S_y$  导通,  $S_x$ 、 $S_z$  关断,晶闸管  $T_{xp}$ 、 $T_{zn}$  导通. 等效电路如图 2 所示,其中  $v_{xy} = v_x - v_y$ ,  $v_{yz} = v_y - v_z$ .

\* 收稿日期:2006-06-07

基金项目:重庆市自然科学基金重点项目(2005BA6017)

作者简介:王 娟(1982-),女,河南三门峡人,重庆大学硕士研究生,研究方向为电力电子技术.

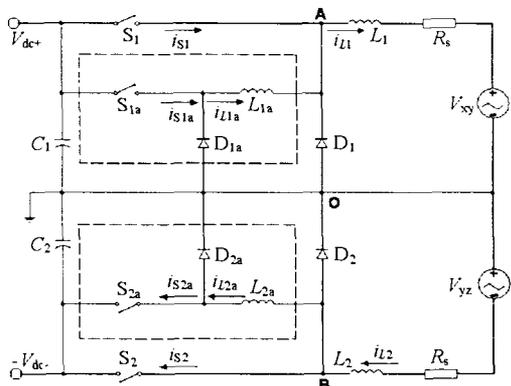


图2 主电路等效电路图

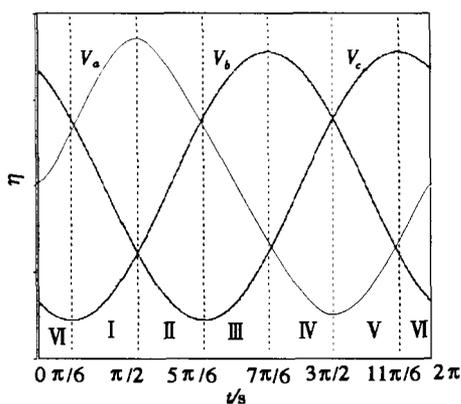


图3 交流侧三相电压波形

假设:1)交流侧三相输出电压完全对称,开关频率远大于电网电压频率,可以假设在一个开关周期内输出电压不变;2)电容  $C_1, C_2$  足够大,假设直流侧电容稳态电压  $V_{dc+} = -V_{dc-} = V_{dc}$ ,两交流侧电抗器  $L_1 = L_2 = L$ ,假设工作于连续导电模式(CCM)下;3)开关均为理想开关器件。

由于上下两组双频 Buck 型换流器的工作相同,现只分析上面一组的工作情况。由于换流器的开关器件均工作在恒频状态,那么开关  $S_1$  和  $S_{1a}$  具有4种工作状态,这4种状态分别如图4所示。其中  $R_s$  是测量电阻,非常小。

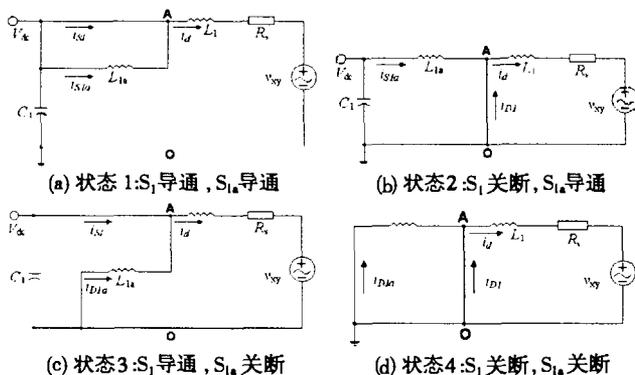


图4 4种开关状态的等效电路图

在前面的假设条件下可得:

开关  $S_1$  导通时,电感  $L_1$  两端的电压:

$$v_{L1} = V_{dc} - v_{xy} \quad (1)$$

开关  $S_1$  关断时,  $v_{L1} = -v_{xy}$ 。 (2)

开关  $S_{1a}$  导通时,电感  $L_1$  两端的电压为:

$$v_{L1a} = V_{dc} - \bar{v}_{A0} \quad (3)$$

开关  $S_{1a}$  关断时,  $v_{L1a} = -\bar{v}_{A0}$ 。 (4)

由于辅助低频开关  $S_{1a}$  的工作频率远小于高频,但远高于工频。那么,在一个低频开关周期内,可以认为电流  $i_d$  的值是近似不变的,并且电阻  $R_s$  的值很小,则可以忽略电感  $L_1$  和电阻  $R_s$  上的压降,即:  $\bar{v}_{A0} \approx v_{xy}$ 。

下面一组换流器的工作情况也是一样的。

## 2 控制算法的推导

根据伏秒平衡原理,和第1节的分析,可得:

$$\begin{cases} (V_{dc} - v_{xy})d_{1a} + (-v_{xy})(1 - d_{1a}) \approx 0 \\ (V_{dc} - v_{yz})d_{2a} + (-v_{yz})(1 - d_{2a}) \approx 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $d_{1a}$  和  $d_{2a}$  分别为开关  $S_{1a}$  和  $S_{2a}$  的导通占空比。

由于交流侧电流  $i_a, i_b, i_c$  包括了有功电流分量  $i_{aac}, i_{bac}, i_{cac}$  和无功电流分量  $i_{are}, i_{bre}, i_{cre}$ ,控制目标就是通过控制电流  $i_a, i_b, i_c$ ,使其与电压  $v_a, v_b, v_c$  具有一定的相移或同相,从而使换流器能够发出或者吸收无功功率,实现对有功功率和无功功率的控制。

主开关实现有功可调的控制方程为式(6),在文献[4]中已有详细推导,文中采用类似的方法推导辅助开关的控制方程。

$$R_s \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{xac} \\ i_{zac} \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_z \end{bmatrix} - V_{mod} \cdot \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据式(5)可得:

$$\begin{bmatrix} d_{1a} \\ d_{2a} \end{bmatrix} \approx \frac{1}{V_{dc}} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于有功电流分量  $i_{aac}, i_{bac}, i_{cac}$  与电压  $v_a, v_b, v_c$  同相位,可以得到:

$$R_s \cdot \begin{bmatrix} i_{xac} \\ i_{zac} \end{bmatrix} = R_s \cdot K_1 \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_z \end{bmatrix} - R_s \cdot K_2 \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中  $K_1, K_2$  是常数。由式(7)和(8)得:

$$R_s \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{xac} \\ i_{zac} \end{bmatrix} = R_s \cdot K_1 \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_z \end{bmatrix} - R_s \cdot K_2 \cdot V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} d_{1a} \\ d_{2a} \end{bmatrix} \quad (9)$$

令:  $\begin{cases} K = R_s \cdot K_1 \\ V_{mod} = R_s \cdot K_2 \cdot V_{dc} \end{cases}$ , 得:

$$R_s \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{xac} \\ i_{zac} \end{bmatrix} =$$

$$K \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_z \end{bmatrix} - V_{mod} \cdot \begin{bmatrix} d_{1a} \\ d_{2a} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

所以式(6)和式(10)分别为主开关和辅助开关的控制方程,可以看出确定参数  $K$  可以限制最大输出电流,调节  $V_{mod}$ ,即改变有功电流的大小就可以实现对有功功率的调节, $V_{mod}$ 取值越小换流器向电网发出的功率越大;在保持有功电流不变的情况下,改变无功电流的大小就可以实现无功功率的独立调节。

### 3 换流系统的仿真

单周控制的双频双 Buck 型换流系统的仿真原理框图如图 5 所示.其中  $P$ 、 $Q$ , 分别为逆变器向交流电网发出的有功功率和无功功率.系统为双闭环结构,外环为定直流电流(或功率)的控制方式,通过控制直流侧电流实现对交流侧的控制.内环通过检测出直流侧电容电压  $v_{dc+}$ 、 $v_{dc-}$  经过 PID 调节得到一个修正量  $\Delta V_{mod}$  叠加在  $V_{mod}$  上则可保证工作过程中  $C_1$  和  $C_2$  上电压的平均值相等,即实现直流侧电容电压平衡。

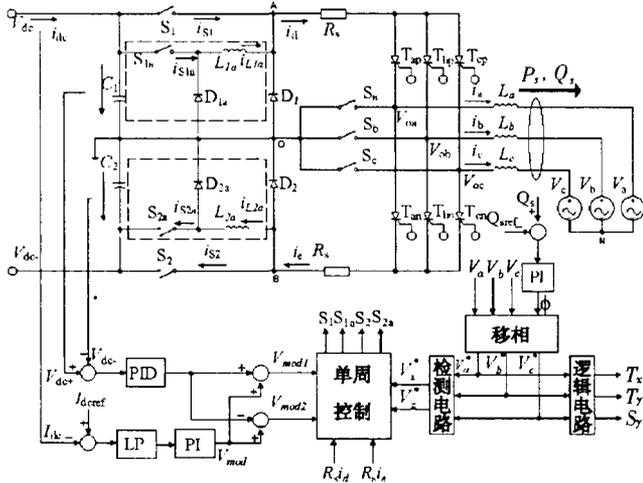


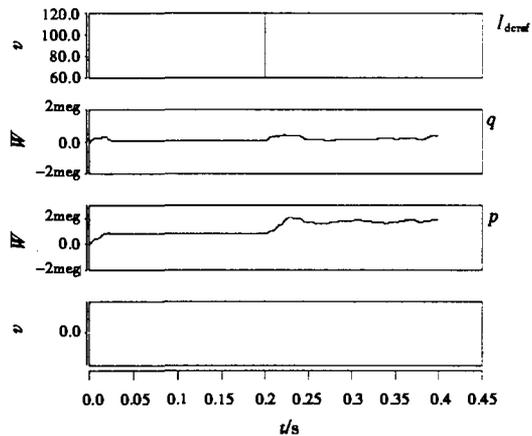
图 5 系统的仿真原理框图

根据前面的假设,可忽略换流器的损耗,在稳态下,输入和输出功率保持平衡,即直流侧有功功率的平均值等于交流侧有功功率,所以只需要检测出直流侧电流  $I_{dc}$  与参考电流  $I_{dcref}$  相比较,经 PI 调节送入控制器就可以实现交流侧有功功率的控制.根据所需要的无功功率对无功电流指令信号大小进行调节就可以实现无功功率的控制。

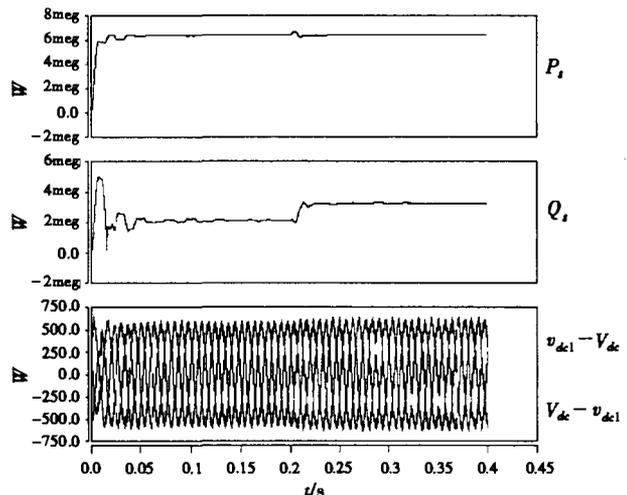
对该系统进行仿真,主要参数为:直流侧额定电压:  $V_{dc} = 20$  kV,交流系统额定电压等级为 10 kV,主开关器件  $S_1, S_2$  的开关频率为 25 kHz,辅助开关器件  $S_{1a}, S_{2a}$  的开关频率为 4 kHz,直流侧电容  $C_1 = C_2 = 1\,000$   $\mu$ F,换流电抗器  $L_a = L_b = L_c = 30$  mH,辅助

电感  $L_{1a} = L_{2a} = 20$  mH.忽略输电线路以及逆变器的损耗。

直流侧电流与无功功率的整定值分别做不同阶跃变化时的仿真结果如图 6 所示.可以看出:各被控量的整定值在不同的情况下做阶跃变化,该电路仍有较快的响应速度和较好的稳定性,能够实现有功功率和无功功率可调。



(a) 有功功率调节



(b) 无功功率调节

图 6 仿真波形图

### 4 结论

在新能源发电并网逆变器中,新型双频双 Buck 电压源换流器是一种很有技术优势和经济优势的换流器.文中对双频双 Buck 逆变器实现有功功率和无功功率独立调节进行了研究,提出了基于单周控制理论的有功功率和无功功率单独调节的算法.推导了基于单周控制思想的控制方程,并对该算法进行了仿真研究,仿真结果证实了算法的正确性。

(下转第 60 页)

## Analysis of the Effect of Compositive Meteorology Index on Power Load

DU Yan-wei<sup>1</sup>, LIN Li<sup>1</sup>, MU Dao-huai<sup>1</sup>, HE Xiao<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology,

Ministry of Education, Electrical Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Changshou Power Supply Bureau of Chongqing, Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 401220, China)

**Abstract:** The four indexes sensory temperature, temperature-humidity index, cold-humidity index, amenity index in biology meteorology are introduced to compositive analyses the effect of meteorologic factor to power load. Take Chongqing for example, the relation between each compositive index and load is analyzed, and the relation curve of power load and compositive index in observation year is also drawn. The analysis indicates: the load amenity index ratio curve is very stable in all axis range, this indicates amenity index can better reflect the change of power load relative to temperature. At the same time, the effect of rainfall to power load is qualitatively analyzed.

**Key words:** power load; sensory temperature; temperature-humidity index; cold-humidity index; amenity index

(编辑 李胜春)

(上接第47页)

### 参考文献:

- [1] GEOMAR MACHADO MARTINS, JOSE ANTEENOR POMILIO, SIMONE BUSO. A Single-Phase Low-frequency Commutation Inverter for Renewables[C]. Industrial Electronics Society, 2001, IECON 01. The 27th Annual Conference of the IEEE, 2001, 3(2):1976-1981.
- [2] 吴洪洋,何湘宁. 级联型多电平变换器 PWM 控制方法的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8):42-46.
- [3] OMAR BOUHALI, EI MADJID BERKOUK, BRUNO FRANCOIS, et al. Direct Generalized Modulation of Electrical Con-
- versions Including Self Stabilization of the DC-Link for a Single Phase Multilevel Inverter Based AC Grid Interface[J]. Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004, 35:1385-1391.
- [4] 彭容,杜雄,周锥维. 一种新型的电压源换流器[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2005, 28(3):16-21.
- [5] 周锥维,彭容,杜雄. 单周控制双 Buck 型电压源换流器[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17):11-14.
- [6] 李广凯,梁海峰,赵成勇,等. 适用于风力发电的输电技术——轻型直流输电技术[J]. 国际电力, 2004, 8(1):38-40.

## A Control Algorithm to Regulate the Active and Reactive Power and Simulation Research of Dual-frequency Dual-Buck Inverter

WANG Juan, ZHOU Luo-wei, DU Xiong

(Key Laboratory of High voltage and Engineering and Electrical New Technology of Ministry of Education, Collge of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** This paper deduces the control algorithm, which can both regulate the active and reactive power of the novel dual-frequency dual-Buck inverter, and the control function. The control function based on one cycle control can control the AC-side active and reactive power by simple circuit. The simulation is given and the results prove the validity of the theory analysis. This inverter is valuable for the research of grid-connected inverters.

**Key words:** dual-frequency dual-Buck inverter; one cycle control; the regulate of active power; the regulate of reactive power

(编辑 陈移峰)