

多 VIENNA 级联型整流电路的协调控制*

范 辉¹, 孙丽丹², 汤天浩²

(1. 上海电机学院, 上海 201306; 2. 上海海事大学, 上海 201306)

摘 要: 针对级联式高压整流电路的控制问题, 采用多个 VIENNA 整流器级联构成高压直流系统, 设计了主电路拓扑与双闭环控制器, 并提出一种多 VIENNA 整流器电压平衡的协调控制策略。通过仿真试验, 验证了双闭环级联型 VIENNA 高压整流电路的稳定性及其协调控制的正确性。

关键词: VIENNA 整流器; 级联系统; 协调控制

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)05-0038-08

Coordinated Control of Multiple VIENNA Cascade Rectifier Circuits*

FAN Hui¹, SUN Lidan², TANG Tianhao²

(1. Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Focused on the cascade control problems of the VIENNA high-voltage rectifier system, based on the principle of improving system efficiency and reduce the loss, proposed a dual-loop cascade-type high-voltage rectifier circuit, established a dual-loop controller, and presented a single-phase cascade VIENNA rectifier circuit coordinated control strategy. Simulation results verified the stability and the correctness of coordination control for dual-loop cascade VIENNA high voltage rectifier circuit.

Key words: VIENNA rectifier; cascade system; coordinated control

0 引 言

近年来,随着高压变流技术的应用,各种多电平电路的研究也随之开始兴起^[1]。一种较典型的适用于高压直流输电的三电平拓扑结构 VIENNA 整流器得到了广泛关注^[2]。

国内外学者对 VIENNA 整流器做了大量研究^[3-6],特别是在控制策略方面,使得 VIENNA 整流器输入电流跟踪输入电压正弦变化,实现单位功率因数、直流母线电压恒定、直流侧中点电压平衡,且在工程应用中具有较高的可靠性。但普通的 VIENNA 整流电路都无法满足高压大功率的需求,因此提出了级联式整流电路。将两个或多个 VIENNA 整流器级联起来实现提高输出电压及功率等级的目的^[7]。

针对级联型 VIENNA 高压整流电路的稳定性问题,采用电流内环和电压外环进行控制,满足了 VIENNA 整流电路的性能要求。但为了解决级联型整流器的均压问题,研究了多个 VIENNA 整流器的协调控制方法,提出了均压和分级起动两种工作方式,并通过仿真试验证明了其正确性。

1 级联型 VIENNA 整流器的基本原理

图 1 为三相四线制 VIENNA 整流电路拓扑图。该拓扑为四线制三相三开关三电平 VIENNA 整流器。该整流器不仅有三线制的优点,并且由于中线的存在,其更是在实际应用中具有更好的环境适应性、可靠性,以及良好的防雷和电磁兼容特性^[2]。

* 基金项目: 国家自然科学基金(51007056)

作者简介: 范 辉(1973—),男,硕士研究生,研究方向为电力电子技术。

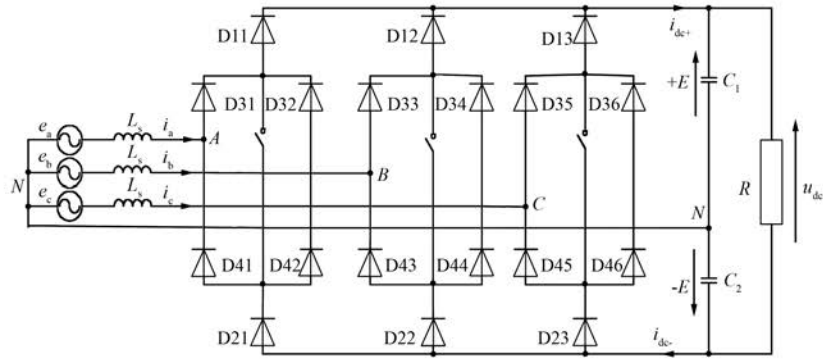


图 1 三相四线制 VIENNA 整流电路拓扑

但是,单个 VIENNA 整流器的输出电压及功率等级有限,为满足高压直流输电的需求,提出了多个 VIENNA 整流器输出以级联的方式连接起来的方案^[8-9],则可以将多个 VIENNA 整流器的输出电压累加,来实现提高输出电压及功率等级等目的,其结构如图 2 所示。

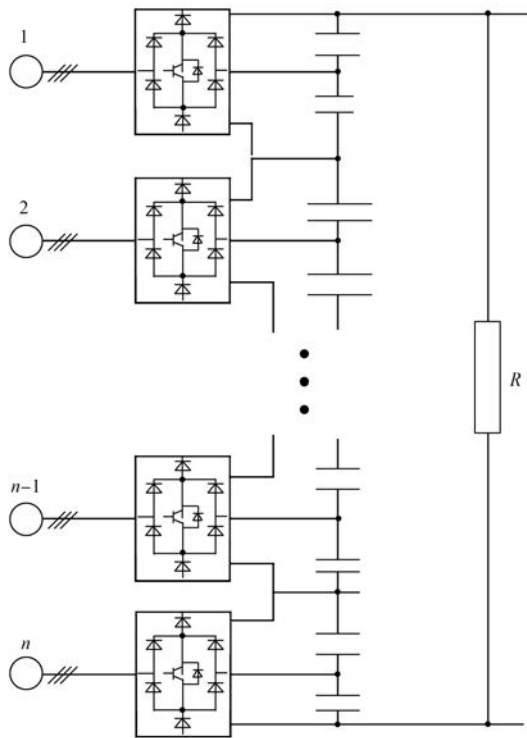


图 2 级联型 VIENNA 整流器结构

该级联拓扑结构输入端相互独立,输出端串联,总的输出电压为每个电容电压之和。每个模块电容中点与电网中点相连,因此各模块可以独立控制并共同承担总的输出电压。这种级联结构控制简单、容错性高、易于模块化。设输出端电容

相同,每个电容电压为 \$E\$。因此功率单元与中点之间的电压关系可以由等效开关函数来表示:

$$\begin{cases} U_{iAN} = S_{ia} \times E \\ U_{iBN} = S_{ib} \times E \\ U_{iCN} = S_{ic} \times E \end{cases} \quad (1)$$

其中: \$i=1,2,\dots,n\$

每个模块由基尔霍夫电压定律可知:

$$\begin{cases} e_{ia} - R_s i_{ia} - L_s \frac{di_{ia}}{dt} = U_{iAN} \\ e_{ib} - R_s i_{ib} - L_s \frac{di_{ib}}{dt} = U_{iBN} \\ e_{ic} - R_s i_{ic} - L_s \frac{di_{ic}}{dt} = U_{iCN} \end{cases} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)化简可得

$$\begin{cases} \frac{di_{ia}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_{ia} - \frac{S_{ib}}{L_s} + \frac{e_{ia}}{L_s} \\ \frac{di_{ib}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_{ib} - \frac{S_{ib}}{L_s} + \frac{e_{ia}}{L_s} \\ \frac{di_{ic}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_{ic} - \frac{S_{ic}}{L_s} + \frac{e_{ic}}{L_s} \end{cases} \quad (3)$$

对级联型 VIENNA 整流器的输出端节点应用基尔霍夫电流定律,则第一个模块和最后第 \$n\$ 个模块输出方程为

$$\begin{cases} C_1 \frac{dE_{11}}{dt} + \frac{U_{1dc}}{R} = i_{1dc+} \\ C_2 \frac{dE_{12}}{dt} + \frac{U_{1dc}}{R} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} C_{n1} \frac{dE_{n1}}{dt} + \frac{U_{ndc}}{R} = 0 \\ C_{n2} \frac{dE_{n2}}{dt} - \frac{U_{ndc}}{R} = i_{ndc-} \end{cases} \quad (5)$$

中间的模块输出电压方程为

$$\begin{cases} C_{i1} \frac{dE_{i1}}{dt} + \frac{U_{idc}}{R} = 0 \\ C_{i1} \frac{dE_{i1}}{dt} + \frac{U_{idc}}{R} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式(4)、式(5)中的和与等效开关函数的关系为

$$\begin{cases} i_{dc+} = S'_a i_a + S'_b i_b + S'_c i_c \\ i_{dc-} = S''_a i_a + S''_b i_b + S''_c i_c \end{cases} \quad (7)$$

其中:上标'和''代表等效电流开关函数。当有电流流入直流母线时,开关函数等于1,否则为0,如表1所示。

表1 级联型 VIENNA 整流器的开关函数表

电源电压	S	S'	S''
正半周期	1	1	0
	0	0	0
负半周期	-1	0	-1
	0	0	0

由式(5)~式(7)可得级联型 VIENNA 整流器的数学模型:

$$\begin{cases} \frac{di_{1a}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_{1a} - \frac{S_{1a}}{L_s} E + \frac{e_{1a}}{L_s} \\ \frac{di_{1b}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_{1b} - \frac{S_{1b}}{L_s} E + \frac{e_{1b}}{L_s} \\ \frac{di_{1c}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_{1c} - \frac{S_{1c}}{L_s} E + \frac{e_{1c}}{L_s} \\ \frac{dE_{11}}{dt} = \frac{S'_{1a}}{C} i_{1a} + \frac{S'_{1b}}{C} i_{1b} + \frac{S'_{1c}}{C} i_{1c} - \frac{2E}{RC} \\ \frac{dE_{12}}{dt} = \frac{S''_{1a}}{C} i_{1a} + \frac{S''_{1b}}{C} i_{1b} + \frac{S''_{1c}}{C} i_{1c} \\ \vdots \\ \frac{di_{ia}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_{ia} - \frac{S_{ia}}{L_s} E + \frac{e_{ia}}{L_s} \\ \frac{di_{ib}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_{ib} - \frac{S_{ib}}{L_s} E + \frac{e_{ib}}{L_s} \\ \frac{di_{ic}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_{ic} - \frac{S_{ic}}{L_s} E + \frac{e_{ic}}{L_s} \\ \frac{dE_{i1}}{dt} = \frac{S'_{ia}}{C} i_{ia} + \frac{S'_{ib}}{C} i_{ib} + \frac{S'_{ic}}{C} i_{ic} \\ \frac{dE_{i2}}{dt} = \frac{S''_{ia}}{C} i_{ia} + \frac{S''_{ib}}{C} i_{ib} + \frac{S''_{ic}}{C} i_{ic} + \frac{2E}{RC} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $i = 1, 2, 3 \dots$ 代表模块的个数。相对于

普通三相 VIENNA 整流器,级联型 VIENNA 整流器拓扑更为复杂,但是通过对其数学模型的分析,方便了对其结构的了解及控制器的设计。

2 单相级联 VIENNA 整流电路拓扑结构

三相四线制的 VIENNA 拓扑整流器由于输入中线和输出电容中点相连,三相物理解耦,故三相可单独控制。基于三相独立的特点,在具体分析时,可以聚焦于其中一相。因此以单相级联 VIENNA 整流电路为例,如图3所示。

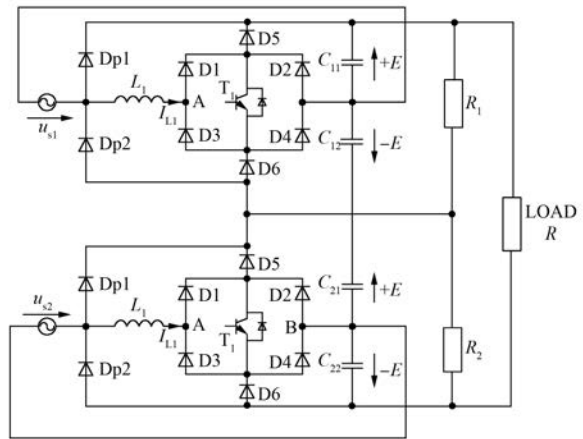


图3 单相级联 VIENNA 整流电路拓扑

由图3的电路拓扑结构可见,它不仅交流输入电源相互独立,而且整流功率单元也相互独立,因此可以分别对每个模块进行单独控制,以便实现单位功率因数及对每个模块输出电压的调整。直流输出端相当于把4个直流输出电容串联,即:

$$U_{tol} = U_{dc1} + U_{dc2} = E_{11} + E_{12} + E_{21} + E_{22} \quad (9)$$

则根据输入输出功率平衡关系可知:

$$3e_1 I_1 + 3e_2 I_2 = U_{tol}^2 / R \quad (10)$$

简化可得

$$U_{tol} = \sqrt{3R(U_1 I_2 + U_2 I_2)} \quad (11)$$

式中: U_1, U_2 ——分别为两模块输入交流电压有效值;

I_1, I_2 ——分别为输入电流的有效值;

$U_{tol}, U_{dc1}, U_{dc2}$ ——总的负载、模块1和模块2的输出直流电压。

级联型 VIENNA 整流器每模块的换流模式与单相拓扑的换流模式相同,现以两模块输入电压

均处于正半周期为例,每个开关器件有两种开关状态,那么两模块级联 VIENNA 整流器拓扑在正

半周期内,即 $e_1、e_2$ 均大于 0 时,开关状态如图 4 所示。

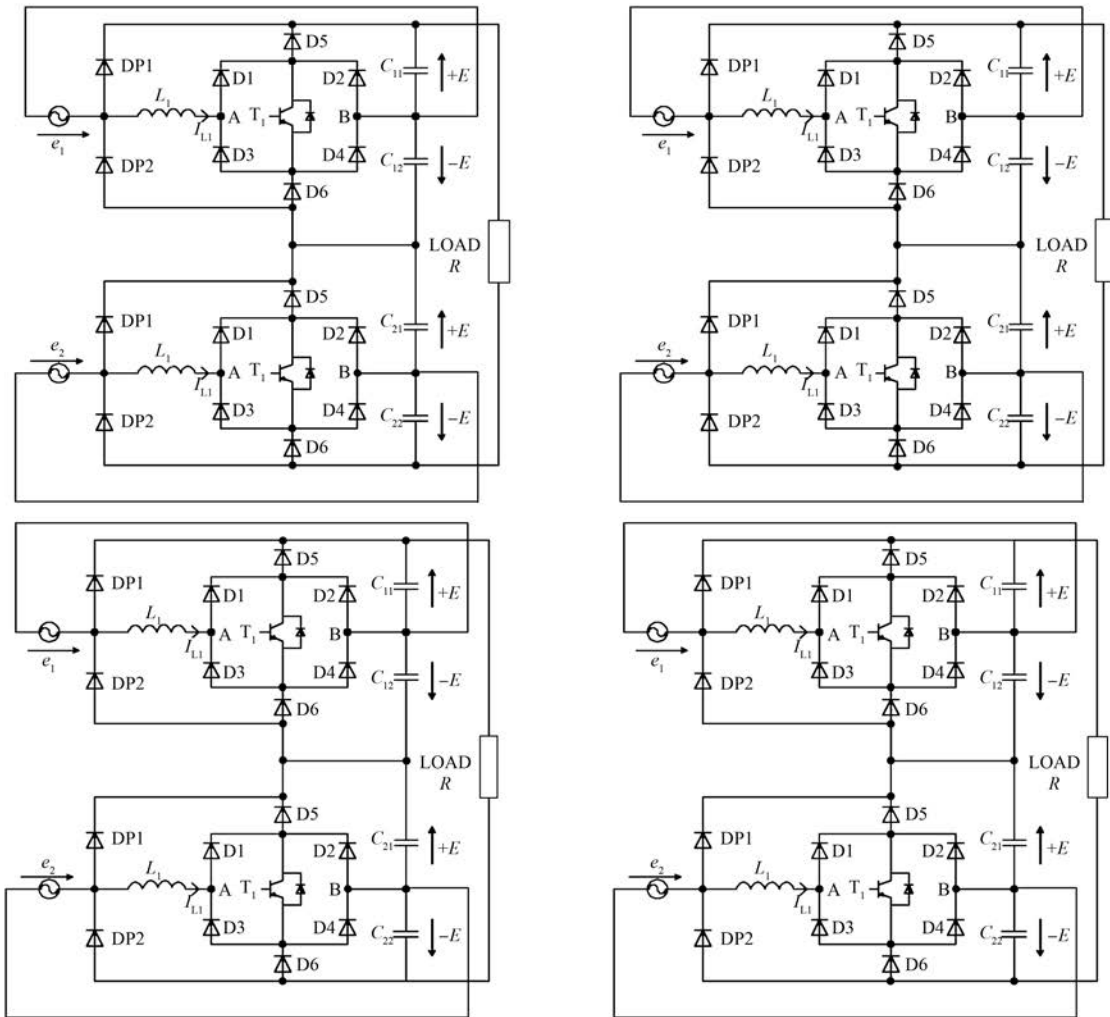


图 4 单相级联 VIENNA 整流电路换流模式

当 $e \geq 0$ 时, $I_{dc-} = 0, I_{dc+} = 0$, 开关 T 闭合; $I_{dc+} > 0$, 开关 T 断开。当 $e < 0$ 时, $I_{dc+} = 0, I_{dc-} = 0$, 开关 T 闭合; $I_{dc-} < 0$, 开关 T 断开。根据 MATLAB/Simulink 仿真可以观察其中一相 VIENNA 电路工作过程。单相级联 VIENNA 整流电路的波形如图 5 所示。其中, I_{dc+}, I_{dc-} 分别为直流母线正负两端的电流; U_s 为输入电压波形; I_r 为输出电流。

3 级联型双闭环 VIENNA 整流电路协调控制

为满足对高压直流输电的要求,需要级联多个整流电路来提高直流电压。但多个整流器的均压成为新的问题。为此,提出了一种协调控制策

略,对每个独立的整流模块采用电压和电流双闭环控制方法,再引入协调控制进行均压控制和分级起动控制。

为简单起见,现以 2 个 VIENNA 级联型整流器为例,给出的协调控制如图 6 所示。系统中协调控制器根据给定电压值 U_{ref} , 分配级联模块的电压值 U_{ref1} 和 U_{ref2} , 每模块根据分配的电压值采用双闭环的结构来控制,其中电压外环采用 PI 调节器,内环采用滞环比较器。外环电压环的作用是根据直流母线电压与给定基准电压值比较的大小来判断直流母线上能量的平衡状况,并决定调节器的调节方向,进而得到电流内环给定值的极性与大小,最终实现直流母线电压的稳定;电流内

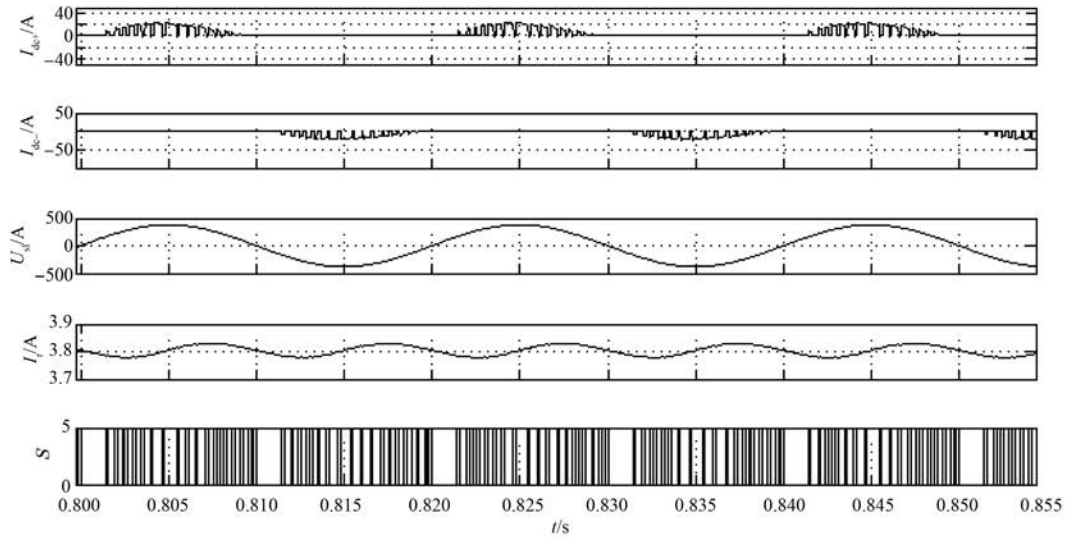


图5 单相级联 VIENNA 整流电路的波形

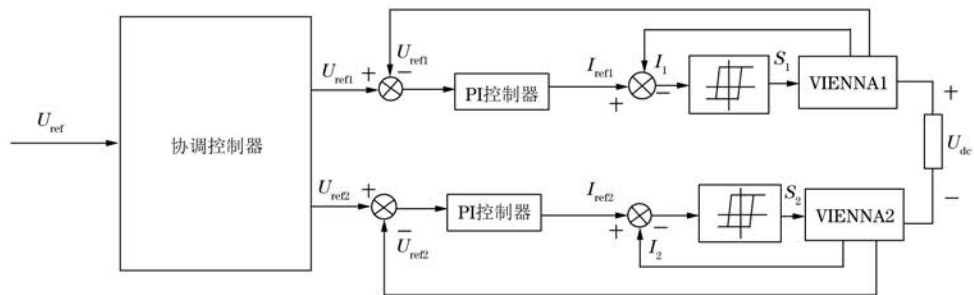


图6 级联型 VIENNA 整流器的协调控制框图

环的主要作用是根据电压外环输出的电流指令实现电流控制,来使交流电相位跟随电压的相位,二者达到同步。双闭环控制实现直流侧电压的恒定和系统的单位功率因数运行。

对于级联型整流器来说,每模块电压的分配方式主要有两种:一种是分别产生所需直流电压的一半,即均压方式;一种是根据所需电压值的大小来决定起动的模块个数,即分级起动方式。以单相两模块级联为例,通过仿真来验证以上两种电压分配方式。为了更好地观测级联电路交流侧电流,使两个模块电压相位相差 60° 。电感参数定为漏电阻为 0.1Ω 、电感值为 10 mH ,母线侧的两个电容参数为 $2\ 200 \mu\text{F}$,每模块负载电阻为 250Ω ,在 0.01 s 时输入控制信号。当所需直流输出值 U_{ref} 分别为 900 V 和 $1\ 200 \text{ V}$ 时,通过仿真来验证均压和分级起动两种方式,其结果如图 7 和图 8 所示。

图 7 和图 8 分别从均压式和分级式对单相级联型 VIENNA 进行了仿真试验,验证了两种控制

方法的正确性。由图 7 可知,当 U_{ref} 为 900 V 时,从图 7(a) 中可见,两系统的电感电流大小相同,相位差 60° ;从图 7(b) 可见,两系统输出直流电压大小相同且为 U_{ref} 的一半,即均压方式。同样当 U_{ref} 为 $1\ 200 \text{ V}$ 时,从图 7(c) 和图 7(d) 中也可得到相同的结果。由图 8 可知,当 U_{ref} 为 900 V 时,从图 8(b) 可见两级联系统只起动了系统 1,其输出电压值等于所需电压;当 U_{ref} 较大为 $1\ 200 \text{ V}$ 时,从图 8(d) 可知,两系统皆起动,且两系统输出电压值之和为所需电压 U_{ref} ,即分级起动方式。相对于均压方式,分级起动方式由于可以做到所需电压低时只起动一个系统,因而拥有更高的效率和更小的损耗。

4 硬件设计与试验

基于 VIENNA 整流器的双闭环系统,本文构建了 VIENNA 整流器的硬件平台,如图 9 所示。其中,包括了 dSPACE1104 实时仿真系统、单相的

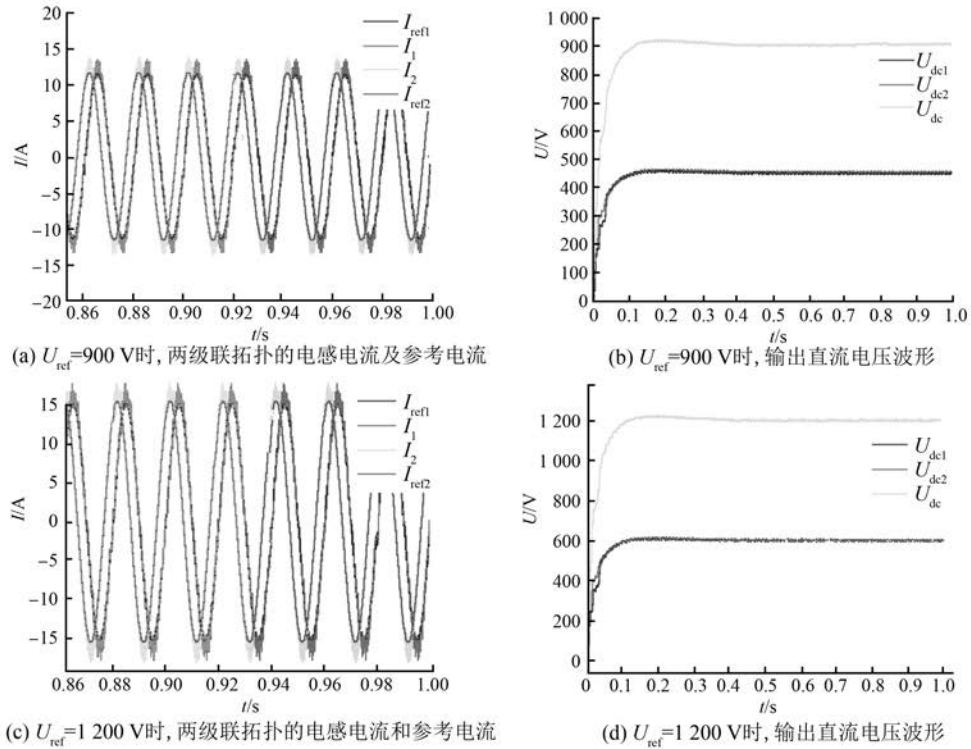


图7 均压式单相级联型 VIENNA 仿真

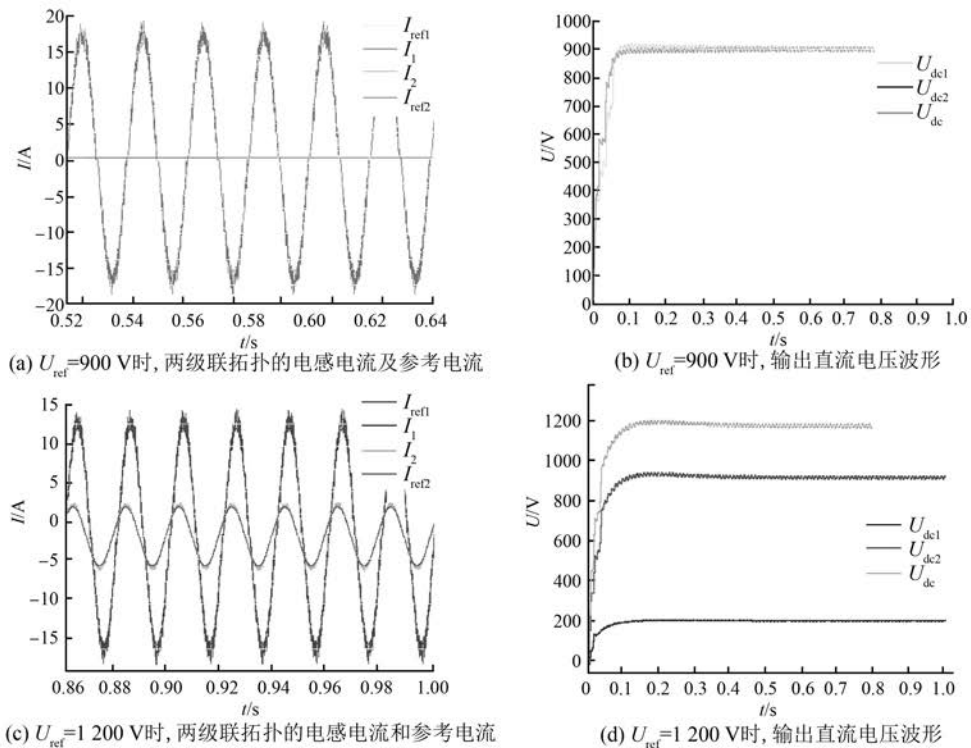


图8 分级式单相级联型 VIENNA 仿真

可调变压器、10 mH 电感、2 200 μ F、采样调理电路及 24 V 直流驱动电源。除了控制部分由

dSPACE 控制外, 试验的其他部分均由硬件组成。当给硬件系统正常供电后, dSPACE1104 接受到

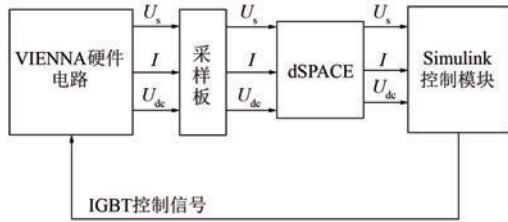
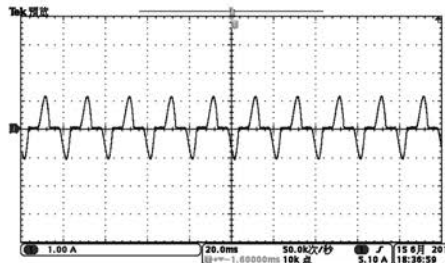
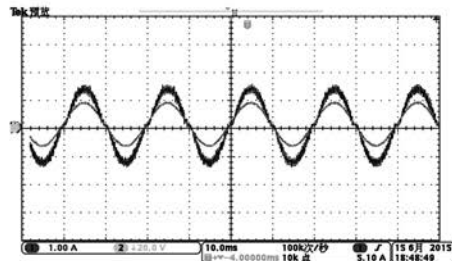


图9 硬件试验系统结构

了实际电感电流和输出直流电压的信号,经由采样板输入给Simulink控制,通过Simulink中的控制

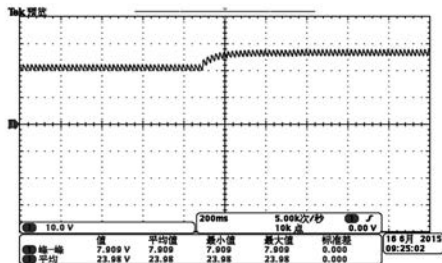


(a) IGBT未工作时网侧电流波形

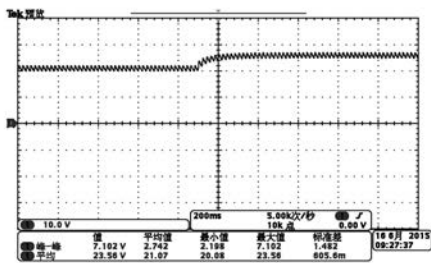


(b) IGBT工作时网侧电流与电压

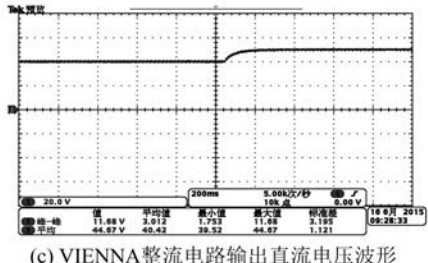
图10 VIENNA 整流器



(a) 上电容电压波形



(b) 下电压电容波形



(c) VIENNA整流电路输出直流电压波形

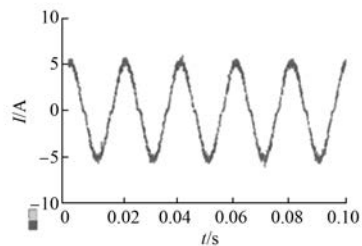
图11 输出电压波形

模块,生成的代码给出 IGBT 触发信号,使系统正常工作。然后通过 ControlDESK 可实时观察控制中的各信号的动态。

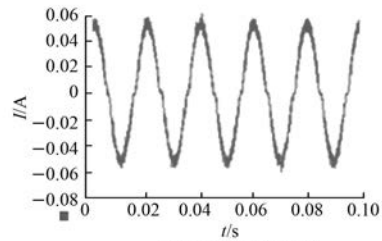
当开关管没有开始工作时,电路为二极管整流,网侧电流如图 10(a)所示。当开关管开始工作时,VIENNA 整流电路开始工作,如图 10(b)所示,可见网侧电流与电压基本同相。

当 VIENNA 整流电路开始工作,那么输出直流电压将稳定在 45 V,并且等于两电容电压之和,如图 11 所示。

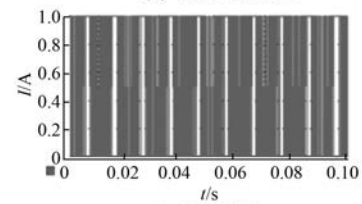
在试验过程中,可以通过 Control 进行电路的实时监控。图 12 为当给定开关信号时,各部分的波形图。



(a) 外环输入及电感电流



(b) 电感电流采样



(c) 开关信号

图12 ControlDESK 显示的控制波形图

5 结 语

研究了级联型 VIENNA 整流电路的基本结构,建立了数学模型,进而提出一种协调控制策略。详细分析了级联型 VIENNA 整流电路的换流模式与控制方法,并搭建了级联型单相双闭环 VIENNA 整流电路的仿真和试验系统;仿真和试验结果验证了双闭环系统的稳态性和均压、分级启动两种协调控制方式的正确性。

【参考文献】

- [1] REED G, PAPE R, TAKEDA M. Advantages of voltage sourced converter (VSC) based design concepts for FACTS and HVDC-link applications[C] //IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2003: 3.
- [2] KOLAR J W, ERTL H, ZACH F C. Design and experimental investigation of a three-phase high power density high efficiency unity power factor PWM (VIENNA) rectifier employing a novel integrated power semiconductor module [J]. Applied Power Electronics Conference & Exposition, 1996, 2(2): 514-523.
- [3] BURGOS R, LAI R, PEI Y, et al. Space vector modulator for vienna-type rectifier based on the equivalence between two and tress-level converters; a carrier-based implementation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(4): 1888-1898.
- [4] LI B, HANG L J, TOLBERF L M, et al.

Equivalence of SVM and Carrier-based PWM in three times new Roman phase/wire/level vienna rectifie for unbalanced load [J]. IEEE Journals & Magazines, 2014, 61(1): 20-28.

- [5] RAJAEI A, VARJANI A Y, MOHAMADIAN M. Vienna-rectifier-based direct torque control of PMSG for wind energy application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(7): 2919- 2929.
- [6] FLORICAU D, PANGRATIE V. New unidirectional five-level VIENNA rectifier for high-current applications [C] // Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE, 2013: 10-13.
- [7] HYN B, HADDAD K A, KANAAN H Y. Implementation of a new linear control technique based on experimentally validated small-signal model of three-phase three-level boost-type vienna rectifier [J]. IEEE Transactions onIndustrial Electronic, 2008, 55(4): 1666-1676.
- [8] YANG J H, Han J G, Tang T H. A cascaded multi-level PWM AC/DC converter with VIENNA cell for HVDC [C] // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2014: 308-312.
- [9] JIANG X B, YANG J H, HAN J G, et al. A survey of cascaded multi-level PWM rectifier with VIENNA modules for HVDC system[C] // 2014 International Electronics & Application Conferenceand & Exposition, 2014: 72-77.

收稿日期: 2016 -09 -25

(上接第 21 页)

- [9] 王从刚,何凤有,曹晓冬.三相电压型 PWM 整流器有限开关序列模型预测电流控制[J].电工技术学报,2013,28(12): 182-190.
- [10] 杨兴武,姜建国.电压型 PWM 整流器预测直接功率控制[J].中国电机工程学报,2011,31(3): 34-39.
- [11] 马宏伟,李永东,郑泽东,等.电流环模型预测控制在 PWM 整流器中的应用[J].电工技术学报, 2014,29(8): 136-141.
- [12] 王萌,施艳艳,沈明辉.三相电压型 PWM 整流器定

频模型预测控制[J].电机与控制学报,2014,18(3): 46-53.

- [13] MA Z X, KENNEL R. FPGA implementation of model predictive control with constant switching frequency for PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 2055-2063.
- [14] 曹晓冬,谭国俊,王从刚,等.三相 PWM 整流器模型预测虚拟电压矢量控制[J].中国电机工程学报,2014,34(18): 2926-2935.

收稿日期: 2016 -10 -08