

# 级联型逆变器单元故障控制方法

## Control Method of Cascaded Inverter with Fault Cell

淮海工学院 电子工程系(江苏连云港 222005) 张先进

(Department of Electronic Engineering, Huai Hai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China) Zhang Xianjing

南京航空航天大学自动化学院(江苏南京 210016) 龚春英

(Automation Institute, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China) Gong Chunying

**摘要:** 为了提高级联型逆变器在单元故障时的容错能力,在详细分析了功率器件各种故障对电路运行状态的影响后,提出了一种基于差补技术的冗余控制方法。该方法能保证级联型逆变器在某一单元故障后仍能输出相同的输出电压和较低的谐波,以三台逆变单元构成的级联型逆变器为例进行了分析,给出了故障前后,每台单元功率管的开关状态的转换,最后仿真结果验证了所提出的控制方法是正确有效的。

**关键词:** 级联型逆变器 故障 冗余差补技术

**Abstract:** To increase the fault tolerance for cascaded inverter, a control method based on redundancy differential PWM is proposed after analyzing the influence of switching devices' fault. The proposed method can make the cascaded inverter to output the same voltage magnitude and low total harmonic distortion. This paper takes example for a cascaded inverter which have three cells and presents the conversion of switching device's switching states. The correctness of analysis is verified by simulation.

**Keywords:** cascaded inverter fault redundancy differential PWM

[中图分类号]TM464 [文献标识码]A [文章编号]1000-3886(2008)03-0021-03

级联型逆变器由于具有输出波形好、开关器件应力小、功率容量大、易于扩展,而且不存在多电平拓扑的输入电容电压均压问题等优点,在电力变换和有源滤波方面得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。通过选择不同的输入电源电压可增加输出电平的种类,减小输出电压的谐波。

但是,由于级联型逆变器结构和控制的复杂性,增加了器件发生故障的可能性,降低了电路运行的可靠性。因为级联型逆变器多应用于风力发电机,电力变换等一些重要场合,如果电路中的某个部分发生故障后得不到及时的处理,将会产生严重的后果。本文以三台逆变单元级联为例,在分析了功率器件故障对电路运行状态的影响后,提出了一种处理故障和基于差补技术的冗余控制方法,使此级联型逆变器在一个逆变单元出现故障后,仍能正常输出所要求的输出电压。

## 1 开关器件故障对电路的影响

### 1.1 功率器件短路故障

图1以三台逆变单元串联而成的级联型七电平逆变器为例,当单元1中的功率管  $S_{11}$  关断,  $S_{12}$  导通,由于某种原因使  $S_{11}$  发生短路,  $S_{11}$ 、 $S_{12}$  为输入电压  $V_{d1}$  提供了阻抗很低的放电回路,将使回路中产生较大的电流而使功率管击穿。此时,可通过关断  $S_{12}$  来起到保护作用<sup>[2]</sup>。

### 1.2 功率器件断路故障

当  $S_{11}$  导通,  $S_{12}$  关断时,由于某种原因使  $S_{11}$  发生断路,如果此时对应于图1中电感电流  $i_L$  为负方向,  $S_{11}$  的突然断路会使  $i_L$  没有回路而迅速降低到零,从而在电感两端产生很大的电压尖峰,使  $S_{12}$  正向击穿。这种情况下,可通过开通  $S_{12}$  来起到保护作用。

由以上分析可见,任何一个功率器件发生短路时,采取断开与其同一个桥臂上的另一个功率管的方法来保护,而发生断路时,则开通与其同一个桥臂上的另一个功率管,短路故障情况与断路故障情况采用相似的方法加以保护。

## 2 对故障单元的处理

由于级联型逆变器是将多个逆变单元串联而成,所以其中某个逆变单元发生故障,必定对整个逆变器的输出产生影响,如果仅仅采用上述的开通(关断)与故障功率管同一桥臂的另一个功率管的方法,此故障单元将只能输出正负电平不对称的输出电压,叠加到其它两台正常工作逆变单元上,这将会使总输出具有很大的直流分量而损坏负载。为了消除这种直流分量,可以采取让故障单元输出为零的方法,即当某个功率管故障断路(短路)时,不仅开通(关断)同一个桥臂上的另一个功率管,而且还开通另一个桥臂上相应的功率管,使得此故障单元输出为零。表1给出了单元1故障类型及其处理方法逻辑关系,其他单元故障类型和处理逻辑关系和单元1相同。

表1中,  $x$  表示可以为1,也可以为0。

从表1中,可以得到故障前后的驱动信号的逻辑关系如下:

$$\begin{aligned} S_{11B} &= AS_{11A} + \overline{AY} \\ S_{13B} &= AS_{13A} + AY \\ S_{12B} &= AS_{12A} + \overline{AY} \\ S_{14B} &= AS_{14A} + \overline{AY} \end{aligned}$$

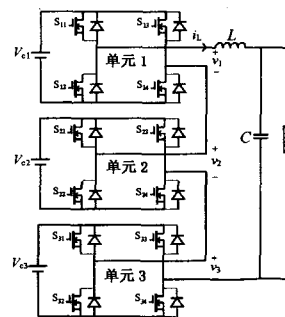


图1 级联型逆变器的结构图

表1 各种故障前后的故障处理

故障类型	故障后各功率管的控制信号				
	ABCD	S <sub>11B</sub>	S <sub>12B</sub>	S <sub>13B</sub>	S <sub>14B</sub>
S <sub>11</sub> 断路	0000	0	1	0	1
S <sub>12</sub> 断路	0001	1	0	1	0
S <sub>13</sub> 断路	0010	0	1	0	1
S <sub>14</sub> 断路	0011	1	0	1	0
S <sub>11</sub> 短路	0100	1	0	1	0
S <sub>12</sub> 短路	0101	0	1	0	1
S <sub>13</sub> 短路	0110	1	0	1	0
S <sub>14</sub> 短路	0111	0	1	0	1
正常工作	1xxx	S <sub>11A</sub>	S <sub>12A</sub>	S <sub>13A</sub>	S <sub>14A</sub>

其中,  $Y = \overline{BD} + BD$

S<sub>11A</sub>, S<sub>12A</sub>, S<sub>13A</sub>, S<sub>14A</sub> 分别为故障前功率管 S<sub>11</sub>, S<sub>12</sub>, S<sub>13</sub>, S<sub>14</sub> 的驱动信号; S<sub>11B</sub>, S<sub>12B</sub>, S<sub>13B</sub>, S<sub>14B</sub> 分别为故障后功率管的驱动信号; 1 表示功率管开通, 0 表示功率管关断。

### 3 基于差补技术的冗余控制方法

#### 3.1 控制方法的提出

从上面的分析可知, 当故障单元输出为零后, 整个级联逆变器的输出仅由其余正常工作的两台逆变单元来承担, 所以要得到相同的输出电压基波大小, 必须提高这两单元的输入电压, 同时还必须保证输出电压的谐波尽可能的小, 而对多电平逆变器来说, 谐波大小是和电平数成反比的, 即逆变器输出的电平种类越多, 输出电压的谐波就越小, 这样就很自然地想到了差补技术, 即通过选择不同的级联单元输入电压, 增加输出电平的种类, 来减小输出电压的谐波。设级联逆变器由两个输入电压分别为 a, b 的单元逆变器构成, 则可输出的正电平种类有 a + b, a - b, a 和 b, 当 a = b 时, 则正电平的种类为 2, 如果 a = 2b, 则正电平的种类就为 3, 如果 a = 3b, 则正电平的种类就为 4。可以看出, 通过选择不同比例的输入电压, 可以增加输出电平的种类<sup>[3][4]</sup>。而对于同种多载波 PWM 控制来说, 输出电平的种类越多就意味着输出谐波越小。

#### 3.2 控制方法的实现

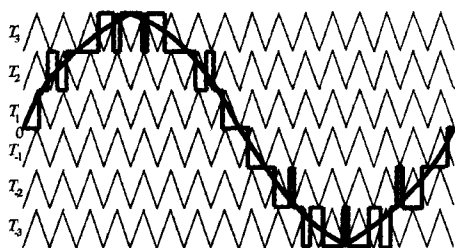


图2 SHPWM控制PWM信号的形成

对于级联型多电平的实现, 本文采取了 Carrara 提出的消谐波 PWM 控制 (Subharmonic PWM), 简称 SHPWM 控制, 如图 2, 对于一个 N 电平逆变器, 有 N - 1 个相同频率, 相同峰峰值的三角载波与一个共同的正弦调制波交截, 为了使 N - 1 个三角载波所占的区域是连续的, 它们在空间上是紧密相连且整个载波带对称分布于零参考的正负两侧<sup>[5]</sup>。

无故障单元时, 三台相同输入电压的逆变单元构成的级联型逆变器, 可输出 7 种电平, 对应于 6 个载波带, 当有一台逆变单元发生故障时, 其输出为零, 输出将由其余正常工作的两台单元提供, 根据前面的分析, 利用差补技术, 这两台单元最多可以输出 9 种电平的输出电压, 保证了 THD 最小, 但需要 8 个载波带与之对应, 而三台逆变单元故障时, 只有 6 个载波带, 为了不增加额外的

对于级联型多电平的实现, 本文采取了 Carrara 提出的消谐波 PWM 控制 (Subharmonic PWM), 简称 SHPWM 控制, 如图 2, 对于一个 N 电平

逆变器, 有 N - 1 个相同频率, 相同峰峰值的三角载波与一个共同的正弦调制波交截, 为了使 N - 1 个三角载波所占的区域是连续的, 它们在空间上是紧密相连且整个载波带对称分布于零参考的正负两侧<sup>[5]</sup>。对于级联型多电平的实现, 本文采取了 Carrara 提出的消谐波 PWM 控制 (Subharmonic PWM), 简称 SHPWM 控制, 如图 2, 对于一个 N 电平

器件, 选择了输出 7 种电平的情况, 即将其中一台的输入电压提高一倍, 另外一台的输入电压保持不变, 亦对应相同的 6 个载波带, 这样, 故障前后级联型逆变器的 PWM 信号的产生方法是一样的, 有利于控制方法的实现。

下面以逆变单元 1 中 S<sub>11</sub> 断路故障为例进行说明, 发生故障前后, 不同载波带对应的开关组合见表 2。v<sub>i</sub> 表示正弦调制波, T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>-1</sub>、T<sub>-2</sub>、T<sub>-3</sub> 分别表示 6 个紧密相连的三角载波。表 2 中只给出了正电平的开关组合, 负电平的分析也是一样。表中 1 表示功率管开通, 0 表示功率管关断, S<sub>12</sub> 与 S<sub>11</sub> 互补, S<sub>14</sub> 与 S<sub>13</sub> 互补。同样, 单元 2 中其它功率管发生短路或断路故障, 以及单元 2、3 中的功率管发生故障时分别对应的开关组合也可采用类似的方法分析。由于故障单元的多样性, 相应的故障处理和控制在方法也不一样, 将会导致电路的复杂性, 为此, 可以用可编程逻辑器件 (PLD) 来实现各种故障的处理和控制逻辑的转换。

### 4 仿真验证

利用功能比较强大的电力电子仿真软件 Saber 对上述故障处理和控制在方法进行了仿真研究。建立了如图 1 所示的三台逆变单元构成的级联型逆变器, 正常工作时, 每个单元的输入电压为 60V, 级联逆变器输出 115V/400Hz 的交流电压, 当有一台单元故障后 (以单元 1 为例), 将单元 2 输入电压提高到 120V, 单元 3 输入电压 60V 保持不变, 采用差补技术, 逆变器也输出 115V/400Hz 的交流电压。滤波电感 L = 300μH, 电容 C = 10μF, 具体波形见图 3、图 4。其中, v<sub>1</sub>、v<sub>2</sub>、v<sub>3</sub> 分别表示逆变单元 1, 2, 3 的输出电压, v<sub>01</sub> 表示级联总的滤波前的输出电压。

从图 4 可以看出, 单元 1 发生故障后, 采用提出的故障处理和控制在方法, 使单元 1 输出近似为零, 而单元 2 倍压后, 采用差补技术, 两台逆变单元也产生了 7 个电平的输出电压波形, 保证了输出电压基波的大小和 THD 的要求。空载时, 故障前后输出电压 (滤波后) 的 THD 分别为 0.82% 和 0.86%。

从图 4 中还可以看出, 单元 1 故障后, 级联型逆变器输出电平在 60V 到 120V 之间相互转换时, 会产生一个过渡电平 (0 或 180V), 经过分析, 是因为死区的原因产生的, 如图 1 所示, 当单元 1 故障时, V<sub>2</sub> = 120V, V<sub>3</sub> = 60V, 所以当级联总输出 v<sub>01</sub> = 60V 时, 即 v<sub>2</sub> = 0V, v<sub>3</sub> = 60V, 对应功率管 S<sub>21</sub>、S<sub>23</sub>、S<sub>31</sub>、S<sub>34</sub> 导通, 当输出电

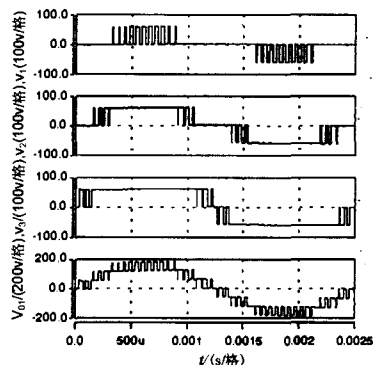


图3 正常工作时单元输出和总的输出

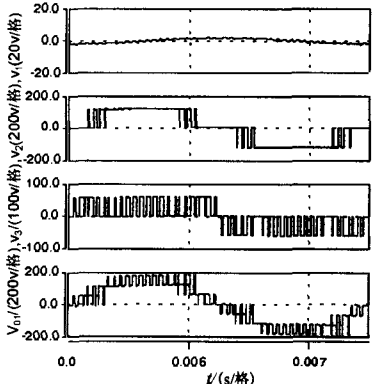


图4 单元1故障时单元输出和总的输出

(下转第 54 页)

信号传送。

## 4 系统的软件设计

### (1) PLC 控制软件

PLC 程序主要完成对设备的自动控制,数据采集的处理等。例如灰水加药控制,灰水加药自动控制采用 PID 算法,在 S7-300 中集成了 PID 功能,可以实现过程量的闭环控制。本系统的软件是利用 STEP7 在 WINDOWS2000 平台下开发的,编程灵活,方便。使得控制系统可实现对电源开关的闭合及分段操作,并实现对现场设备进行操作和自动控制。

### (2) 上位机监控软件

上位机监控软件采用组态王 6.5,为用户提供了功能完善、使用操作简单方便、动态的、交互性很强的彩色图形人机界面。系统提供的功能有:流程图显示、参数设定、报表生成、报警、事件记录、曲线记录、系统维护等。如图 3 所示。

监控画面中,电气、水泵和加药三个监控画面是灰水泵站主要的监控流程图,电气画面可监视泵站电气设备和系统的运行工况和参数,并可远控操作电源开关的跳、合闸,以及回收水泵和排水泵的远方手动变频启、停;回水泵、排水泵、潜水泵以及加药系统的手、自动运行方式切换等操作;水泵监控画面中可显示灰水站内所有水泵的运行工况和参数。水池的水位和回收水流量,并可远控操作各回水泵和排水泵的出口电动门等;加药泵画面可监视加药系统运行工况和 PH 值等参数,并可远方手动控制操作#1、2 加药泵的启停。

## 5 辅助系统

辅助系统包括视频监控系统及防火、防盗报警系统。视频监控

系统安装了 16 个工业摄像头,对 16 处设备和环境进行视频监控。视频服务器安装在泵站内,采用 MPEG4 标准进行视频压缩。视频信号传输采用数字信号传输方式,使用 100Mb/s 工业以太网网络通信协议,通过光缆将视频信号传输到远程控制中心,经监控中心视频解压处理后进行显示。

防火防盗报警系统由 5 个烟感探测器、10 个玻璃破碎探测器、4 个门磁探测器、1 个红外双鉴探测器、7 对红外对射探测器和一台报警主机及报警警笛组成。当泵站内出现异常情况时,报警系统通过报警警笛发出警示,同时播放设定的警示音乐,使值班人员前往现场处理。

## 6 结语

随着工业的发展,水资源越来越匮乏,为了节约和保护水资源,火电厂灰水处理也越来越受到重视,本文对灰水处理系统及装置采用无人值守综合监控系统,能够提高生产效率,统一指挥调度生产,并减少了工作人员的操作量,使冲灰水回收再利用,既节约用水,又保护环境。该监控系统 2007 年 1 月开始在陕西地区某电厂投入使用,系统运行稳定,效果良好,值得推广使用。

### 参考文献

- [1] 廖常初. S7-300/400 PLC 应用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2007
- [2] 许蓼. 电器控制与 PLC 控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2005
- [3] 齐强. 无人职守泵站远程综合监控系统[J]. 热力发电,2006,第 35 卷

[作者简介] 朱晓娟(1970-),女,硕士,陕西渭南人,现任西安建筑科技大学讲师,主要从事智能控制理论、计算机控制系统设计方面的教学与研究。

(上接第 22 页)

表 2 故障前后,不同载波带对应的开关组合

载波带	级联输出电压	故障前每台逆变单元的开关状态 ( $V_{C1} = E(V)$ , $V_{C2} = E(V)$ , $V_{C3} = E(V)$ )			$S_{11}$ 断路故障后每台逆变单元的开关状态 ( $V_{C1} = E(V)$ , $V_{C2} = 2E(V)$ , $V_{C3} = E(V)$ )		
		单元 1	单元 2	单元 3	单元 1	单元 2	单元 3
$v_r > T_3$	$3E$	$v_1 = E(V)$ $S_{11} = S_{14} = 1$	$v_2 = E(V)$ $S_{21} = S_{24} = 1$	$v_3 = E(V)$ $S_{31} = S_{34} = 1$	$v_1 = 0(V)$ $S_{12} = S_{14} = 1$	$v_2 = 2E(V)$ $S_{21} = S_{24} = 1$	$v_3 = E(V)$ $S_{31} = S_{34} = 1$
$T_3 > v_r > T_2$	$2E$	$v_1 = 0(V)$ $S_{11} = S_{13} = 1$	$v_2 = E(V)$ $S_{21} = S_{24} = 1$	$v_3 = E(V)$ $S_{31} = S_{34} = 1$	同上	$v_2 = 2E(V)$ $S_{21} = S_{24} = 1$	$v_3 = 0(V)$ $S_{31} = S_{33} = 1$
$T_2 > v_r > T_1$	$E$	$v_1 = 0(V)$ $S_{11} = S_{13} = 1$	$v_2 = 0$ $S_{21} = S_{23} = 1$	$v_3 = E(V)$ $S_{31} = S_{34} = 1$	同上	$v_2 = 0(V)$ $S_{21} = S_{23} = 1$	$v_3 = E(V)$ $S_{31} = S_{34} = 1$
$T_1 > v_r > 0$	$0$	$v_1 = 0(V)$ $S_{11} = S_{13} = 1$	$v_2 = 0(V)$ $S_{21} = S_{23} = 1$	$v_3 = 0(V)$ $S_{31} = S_{33} = 1$	同上	$v_2 = 0(V)$ $S_{21} = S_{23} = 1$	$v_3 = 0(V)$ $S_{31} = S_{33} = 1$

平从此时的 60V 转变到 120V,即  $v_2 = 120V$ ,  $v_3 = 0V$  时,  $S_{23}$ 、 $S_{34}$  关断,由于死区时间,  $S_{24}$ 、 $S_{33}$  不能立即导通,如果此时电感电流  $i_L > 0$ ,  $i_L$  将通过  $S_{23}$ 、 $S_{33}$  的体二极管续流,使得  $v_2 = v_3 = 0V$ ,所以出现了  $v_{01} = 0V$  的过渡电平,当死区时间过后,  $S_{24}$ 、 $S_{33}$  导通,  $v_{01} = 120V$ 。同样,当  $i_L < 0$  时,会出现  $v_{01} = 180V$  的过渡电平。这种过渡电平使得电感两端的电压变化幅度增大,从而导致电感电流与基准电流的误差变大,所以输出电压的 THD 略微增大。

## 5 结语

对于应用在重要场合的级联型逆变器来说,具备冗余功能是很重要的,本文提出的故障处理方法和基于差补技术的冗余控制方法能使级联型逆变器单元故障时,仍能输出所要求的电压,能提

高设备的可靠性,可维护性,从而也提高了设备的市场竞争力。

### 参考文献

- [1] Bum-Seok Suh, Gautam Sinha, Madhav D. Manjrekar and Thomas A. Lipo. Optimization of Electrical and Electronic Equipments-Brasov, 1998

[2] 陈阿莲. 一种具有冗余

功能的多电平变换器拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2002(9): 11 ~ 15

[3] Keith Corzine, Yakov Familiant. A New Cascaded Multilevel H-Bridge Drive[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2002, 17(1): 125 ~ 131

[4] 单庆晓. 多重逆变器的新型差补 PWM 技术[J]. 电力电子技术, 2002(6): 67 ~ 69

[5] 吴洪洋. 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(8): 42 ~ 46

[作者简介] 张先进(1975-),男,讲师,博士研究生,研究方向为电力电子交流技术。 龚春英(1965-),女,博士,教授,博士生导师,主要研究电力电子变换技术和风力发电。