

模块化通用变流器在中低压场合的应用

三相桥式变流器在地铁能量回馈、低压岸电、静止无功补偿和工业变频等中低压场合有着广泛的应用。传统的三相桥式变流器往往只能适应单一应用场合，局限性大，提出的通用变流器将单个变流器模块化集成为一个功率单元，通过多个功率单元之间的串并联组合有效地适应了多种应用场合。首先分析了三相桥式变流器的数学模型和控制方法；详细介绍了功率单元在几种常见应用场合下的组合方式和控制方法；通过仿真分析初步验证了理论的可行性；最后搭建了实验样机，分别在地铁能量回馈和静止无功补偿应用环境下进行实验，通过实验验证了理论和仿真分析的正确性。

张建彪 祁 琦/南京南瑞继保电气有限公司
连苏宁 桑静波/石家庄轨道交通有限责任公司

0 引言

随着能源危机的到来和环境污染的加剧，节能减排和开发绿色新能源成为新时代的风向标^[1]。地铁能量回馈、岸电等新兴行业应运而生并得到了快速的发展^[2-3]。同时，在电力系统行业中为了提高电能质量，降低输电成本，无功补偿装置逐渐登上历史舞台，一些低压无功补偿设备开始崭露头角^[4]。

三相桥式变流器控制简单，谐波含量小^[5-6]，在中低压场合应用广泛。然而，传统的三相变流器兼容性差，往往只能应用于单一场合；同时，在中低压的应用中，随着需求的不断提升，对产品容量的要求越来越高，这就需要更高等级的功率器件，成本大大提高。本文提出的通用变流器将单个变流器集成为一个功率单元，通过若干个功率单元之间模块化的串并联组合，实现在多种环境下的应用，同时有效地提高系统的容量。

在地铁能量回馈应用中，通用变流器的功率单元通过闭环实现对直流电压的有效控制^[7-8]，由于地铁环境直流电压比较高，需要将两个功率单元的直流侧串联实现电压等级的匹配；同时，需要功率单元的并联实现系统容量的提升。在低压岸电应用中，通用变流器通过两个功率单元间“背靠背”的对推实现AC-AC变换，并通过功率单元间的并联实现容量的提升。在无功补偿应用中，通用变流器通过多个功率单元的并联实现对系统无功的补偿和对电网的支撑。

在各种中低压的应用中，由于通用变流器均需要利用功率单元间的串并联实现各种功能。因此，如何解决并联模块间的不均流现象成为了研究的难点。有文献提出了下垂法控制实现均流，但该方法外特性较软，在三相三线制系统中效果不明显。本文使用了主从法的控制方式，即从机的电流内环给定由主机生成，保证主机和从机之间内环给定的一致性，同时在控制上增加零序电流环，有效地解决了并联不均流的问题。

本文首先分析了三相桥式变流器的数学模型和控制策略；逐一讨论了通用变流器功率单元在几种中低压应用场合中的应用方式和控制方法，介绍了主从控制法和载波移相技术；通过PSCAD仿真验证理论分析的可行性；搭建实验平台，验证了理论和仿真的正确性。

1 功率单元数学模型及控制策略

通用变流器单个功率单元的拓扑如图1所示。该功率单元采用三相桥式拓



张建彪/工程师

关键词/Keywords

变流器·
模块化·
地铁·
STATCOM·

扑, 其中 u_a 、 u_b 和 u_c 为三相桥臂输出点的相电压; i_a 、 i_b 和 i_c 为三相桥臂输出点的相电流; U_{dc} 为直流侧电压; C 为直流侧电容; L_f 为输出电抗器。输出电抗器与下一级电路中的滤波电容以及变压器漏感构成一个等效的 LCL 滤波器。

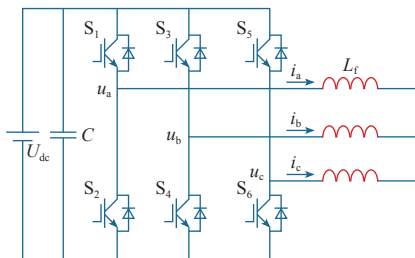


图1 功率单元拓扑

将 LCL 滤波器简化为大小为 L 的单电感滤波器, 并进行等效分析。 u_{ga} 、 u_{gb} 和 u_{gc} 为交流侧输出点的相电压, 假设 u_{ga} 、 u_{gb} 和 u_{gc} 为三相纯正弦基波, 根据基尔霍夫电压定律, 理想情况下功率单元的数学模型如式(1)所示, 式(1)经Clark和Park变换处理后, 可简化为式(2), 即

$$\frac{Ld}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\frac{Ld}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{gd} \\ u_{gq} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, u_d 和 u_q 分别为三相桥臂输出点电压在 d 轴和 q 轴上的分量; i_d 和 i_q 分别为三相桥臂输出电流在 d 轴和 q 轴上的分量; u_{gd} 和 u_{gq} 分别为交流侧输出点电压在 d 轴和 q 轴上的分量。

此时功率单元的等效控制框图如图2所示。

由图2可知, 功率单元采用直流电压外环、交流电流内环的双环控制方式, 调制方式选用在PWM调制波中注入3次谐波(u_3)的等效SVPWM调制方式。当变流器正常工作时, 系统可有效地实现直流电压和系统无功的控制。

2 功率单元模块化组合方式及应用场合

本文研究的通用变流器功率单元单个额定功率为250 kW, 直流侧电压为800~1 000 V, 交流

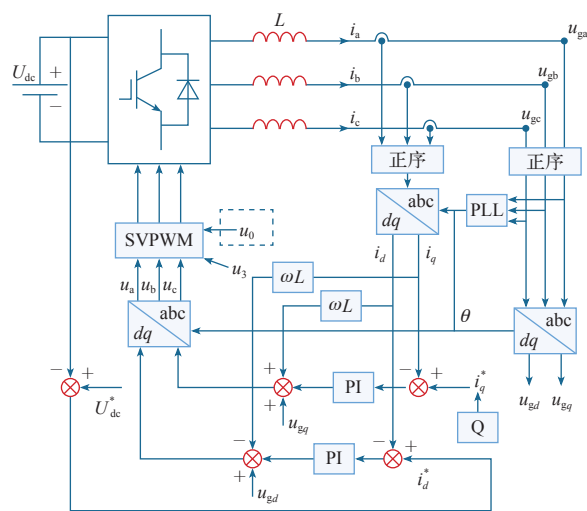


图2 功率单元控制框图

侧线电压为380~480 V, 一套系统一般由2~8个功率单元组成。

通用变流器功率单元通过不同的串并联组合方式可以形成多种工作模式, 从而有效地应用于不同的中低压场合。本文统一以4个功率单元为例, 对不同应用场合下通用变流器的组合方式和工作原理进行分析。

2.1 地铁能量回馈场合

通用变流器应用于地铁能量回馈场合时实际系统框图如图3所示。

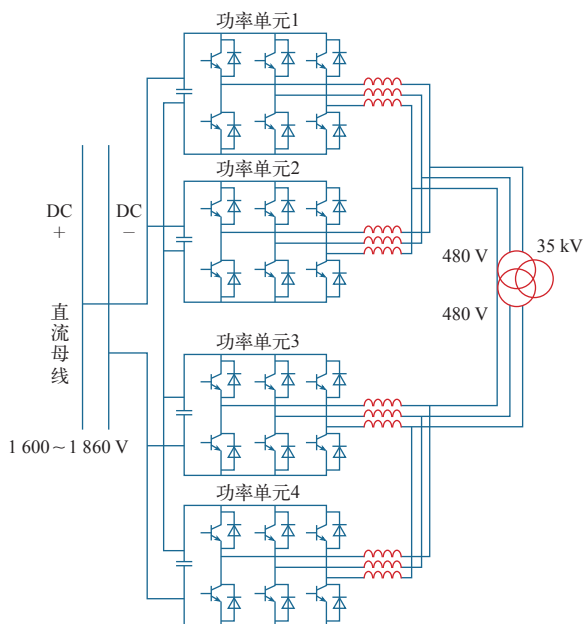


图3 地铁应用系统

图3中, 功率单元1、2交流侧并联接到变压器二次侧480 V第一个绕组上, 功率单元3、4交流侧并联接到变压器二次侧480 V第二个绕组上, 功率单元1、2直流侧并联, 功率单元3、4直流侧并联, 两组功率单元直流侧串联, 额定工作时直流侧电压在1 600~1 860 V之间。

功率单元采用直流电压外环、交流电流内环的双环控制方式。并联功率单元之间由于控制同步性、器件差异等原因, 易出现不均流现象。当不均流现象较为严重时, 对电流较大功率单元中的各个功率器件的安全和寿命有很大的影响。图3中, 功率单元1、2和功率单元3、4是并联工作的, 为了保证并联功率单元间的均流效果, 必须采用主从控制模式实现每个功率单元的闭环控制。以功率单元1、2为例分析, 功率单元1控制环路中直流电压外环输出得到的 i_d^* , 不仅作为功率单元1电流内环的给定, 同时输出给功率单元2作为其电流内环的给定, 从而实现控制的同步性。在此基础上加入一个零序电流环进一步提高系统的均流效果, 零序电流环具体实现方法如图4所示。

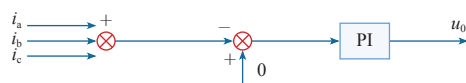


图4 零序电流环控制

零序电流环输出得到的电压 u_0 分别加入到三相电压调制波 u_a 、 u_b 和 u_c 中。

此外, 为了有效地降低系统的谐波含量, 可以采用载波移相的方式提高系统的等效开关频率, 即功率单元1、2使用的载波与功率单元3、4使用的载波为相位相差 180° 的移相载波, 这样系统的等效开关频率为实际开关频率的2倍, 系统高频谐波含量大大减小。

2.2 岸电场合

通用变流器应用于岸电场合时采用两组“背靠背”结构并联的模式, 系统框图如图5所示。

图5中, 功率单元1、2构成一组“背靠背”结构。功率单元1的交流侧接到网侧变压器二次侧480 V绕组上, 直流侧与功率单元2直流侧相连, 功

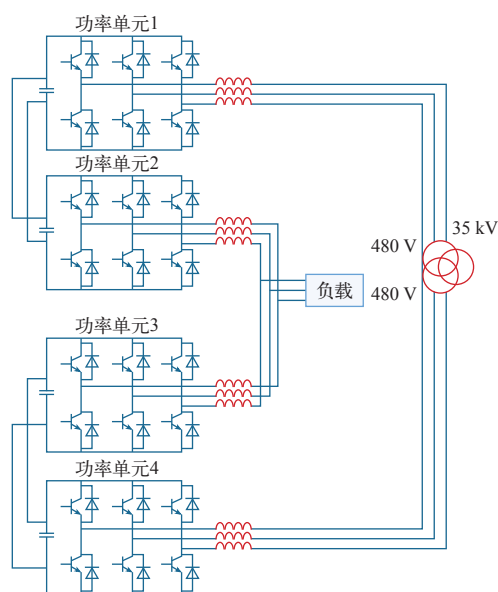


图5 岸电应用系统

率单元2交流侧接船上负载, 实现对负载的供电。功率单元1采用图2中直流电压外环、交流电流内环的控制方式实现对直流电压的控制。功率单元2则完全不同, 其采用交流电压外环、交流电流内环的方式实现对负载电压的控制, 保证负载电压的幅值和频率。

2.3 静止无功补偿场合

通用变流器应用于静止无功补偿场合时采用4个模组交流侧并联的方式, 系统框图如图6所示。

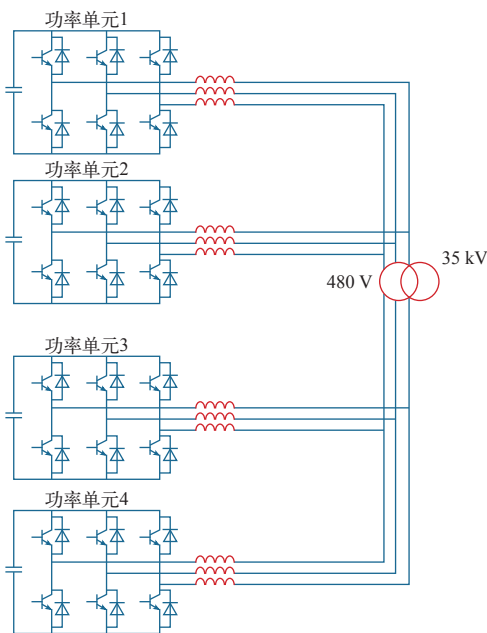


图6 静止无功补偿应用系统

功率单元1~4交流侧并联接到网侧变压器二次侧480 V绕组上,功率单元采用直流电压外环、交流电流内环的方式控制直流电压,通过设置无功目标值折算出单个功率单元 i_q^* 的大小,通过 q 轴电流内环实现无功的有效调节。

3 仿真和实验验证

为了验证理论分析的可行性,在PSCAD中搭建通用变流器功率单元的仿真模型,具体建模参数如下表所示。

表 功率单元仿真参数

直流电压/V	900
交流线电压/V	480
额定功率/kW	250
开关频率/kHz	3

当通用变流器应用于无功补偿场合时,此时PSCAD中的建模参数如下:交流线电压为480 V;直流电压为900 V;系统额定功率为1 Mvar。满载仿真波形如图7所示。

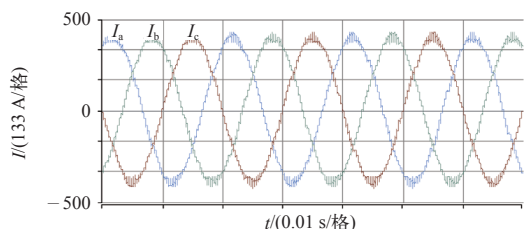


图7 静止无功补偿仿真波形

图7中, I_a 、 I_b 和 I_c 分别为单个功率单元的三相交流电流。由仿真结果可知,功率单元三相进网电流波形良好且幅值基本一致。

当通用变流器应用于地铁能量回馈场合时,此时PSCAD中的建模参数如下:直流侧电压为1 800 V;交流线电压为480 V;系统额定功率为1 MW。满载运行时仿真波形如图8所示。

图8中, I_{a1} 和 I_{a2} 分别为并联两个功率单元的A相交流电流。由仿真结果可知,两个并联的功率单元交流侧电流波形良好,均流效果较佳。

为了验证理论分析和仿真模拟的正确性,研制了一套由4个功率单元组成的通用变流器实验样机。单个功率单元主要参数如下:额定输出功率P

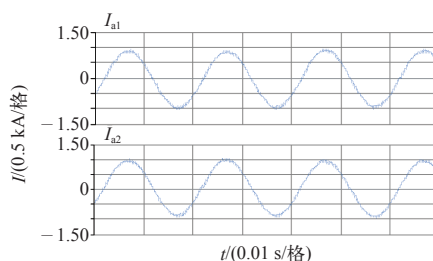
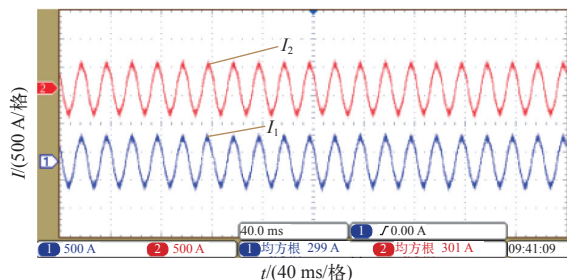


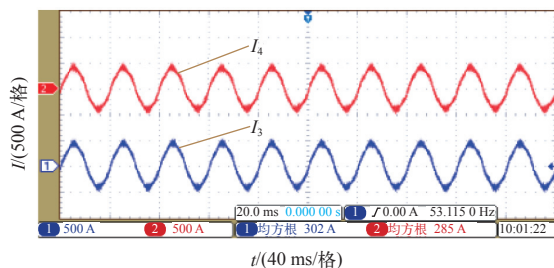
图8 地铁能量回馈电流仿真波形

为250 kW,直流侧额定电压900 V,交流侧额定线电压480 V,开关频率3 kHz。利用该实验样机分别进行地铁能量回馈和静止无功补偿实验。

在无功补偿验证实验中,4个功率单元交流侧并联后通过变压器接入电网,其中,交流侧变压器二次侧额定电压为480 V,功率单元直流侧额定电压为900 V,系统额定功率为1 Mvar。满载运行时实验波形如图9所示。



(a) 实验波形1



(b) 实验波形2

图9 静止无功补偿实验波形

图9中, I_1 、 I_2 是图6中功率单元1和3的交流侧A相电流波形; I_3 、 I_4 是功率单元2和4的交流侧A相电流波形。由实验波形可知,进网电流波形良好,4组电流有效值分别为299 A、301 A、302 A和285 A。

在地铁能量回馈验证实验中,系统直流侧额定电压为1 750 V,交流侧额定线电压为480 V,额定功率为1 MW。具体实验采用两套相同系统功

率对推的方式进行实验：一套系统控制直流侧电压；另一套系统控制系统功率。满载运行时实验波形如图10所示。

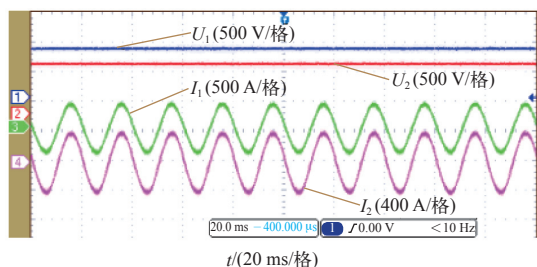


图10 地铁能量回馈场合实验波形

图中， U_1 、 U_2 是图3中直流侧串联两组功率单元的直流电压； I_1 、 I_2 是并联的两个功率单元1和2的交流侧A相电流。由实验波形可见，两组直流电压稳态波形良好，示波器读数显示平均电压分别为870 V和880 V，均压效果良好；而两个并联模组的交流电流波形正弦度好，示波器计算显示电流有效值分别为284 A和285 A，均流效果良好。

4 结束语

本文提出了一种适应于多种中低压应用场合的通用变流器。该变流器由若干个功率单元组成，每个功率单元为一个简单的三相桥式变流器，通过功率单元的组合串并联实现不同的功能，适应不同的工作环境。本文首先分析了变流器的数学模型和工作原理，详细介绍了通用变流器在地铁、岸电以及无功补偿等工作场合的使用

方法和控制原理，分析了闭环控制为解决均流和谐波问题所使用的独特方法，最后通过仿真和实验验证了理论分析的可行性。

参考文献

- [1] 周凌云. 世界能源危机与我国的能源安全 [J]. 中国能源, 2001 (1): 12-13.
- [2] 王彦峥, 苏鹏程. 城市轨道交通再生能量回收技术方案的研究 [J]. 电气化铁道, 2004 (2): 37.
- [3] 黄细霞, 包起帆, 葛中雄, 等. 典型港口岸电比较及对中国港口岸电的启示 [J]. 交通节能环保, 2009 (4): 2-5.
- [4] Soto D, Green T C. A comparison of high-power converter topologies for the implementation of FACTS controllers [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49 (5): 1072-1080.
- [5] 赵振波. 三相电压型PWM整流器及其控制策略研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2002: 7-15.
- [6] 张兴. PWM 整流器及其控制策略的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.
- [7] 王晓东. 双向PWM整流器设计与研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [8] 姚玮, 陈敏, 牟善科, 等. 基于改进下垂法的微电网逆变器并联控制技术 [J]. 电力系统自动化, 2009 (33): 6.

(收稿日期: 2017-02-27) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告