

## 一种新型级联多电平动态电压恢复器的研究

刘伟<sup>1</sup>, 孟庆刚<sup>2</sup>, 商姣<sup>2</sup>, 钱长远<sup>2</sup>, 王宝安<sup>2</sup>

(1.南京南瑞继保电气有限公司,江苏南京 211102;2.东南大学电气工程学院,江苏南京 210096)

**摘要:**动态电压恢复器(DVR)是一种电压型电能质量补偿装置,串联在电网和负载之间,用于保障负载侧的电能质量。提出了一种新型级联多电平DVR,两个H桥功率单元级联构成一个逆变单元,并依靠整流电路给逆变单元直流侧电容器提供能量。装置采用电容器耦合方式串入电网,选用数字信号处理器(DSP)、现场可编程门阵列(FPGA)和复杂可编程逻辑器件(CPLD)构成控制系统。进行了详细的硬件和软件设计,实际运行测试结果表明,该级联多电平DVR响应速度快,能够迅速、有效地产生补偿电压,保证了负载侧的用电质量。

**关键词:**动态电压恢复器;级联多电平;DSP;电压补偿

**中图分类号:**TM761

**文献标志码:**A

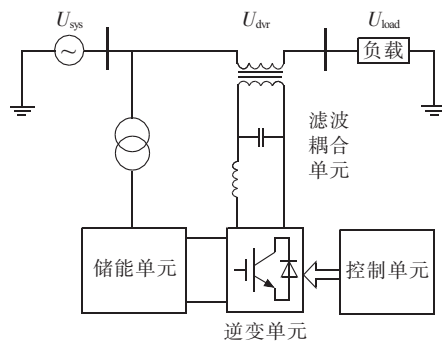
**文章编号:**1009-0665(2012)05-0027-05

近年来,随着电力电子技术的不断发展与进步,涌现了大量的电力电子设备,这些设备会在一定程度上给电网带来谐波污染,一些特殊部门如半导体制造、精密仪器加工、电信、医疗、银行、军事等部门对电网中的谐波、短时断电、过电压、电压跌落、电压骤升等电能质量问题十分敏感,处理不当可能会造成重大经济损失和不良社会影响。另外,由于输电线路自身压降等问题,会造成距离变电站较远的地区电压偏低,影响正常的生产生活<sup>[1,2]</sup>。针对这些问题,动态电压恢复器应运而生。动态电压恢复器(DVR)是一种电压型电能质量补偿装置,串联在电网与负载之间,能够有效解决电网电压谐波、电压跌落、三相不平衡等电能质量问题对负载造成的影响。

目前能够应用于中压配电网的DVR拓扑主要有基于功率开关器件串联的两电平结构以及基于多电平变换器的多电平结构,多电平结构相较于两电平结构具有输出谐波小、开关频率低等优点,其中,H桥级联型多电平变换器因易于封装和模块化而受到广泛关注。文献[3]设计了一种五模块级联无串联变压器的DVR,三相电网电压经多绕组移相变压器后进行整流,给H桥供电,不需要其他的储能设备;然而随着电平数增多,移相变压器的设计与制造将会变得困难。文中设计的新颖级联多电平DVR,三相分别独立,电网相电压经隔离变压器后进行整流,给H桥供电,该拓扑从储能单元到逆变单元结构均相同,当电平数增多时,隔离变压器的设计与制造仍十分简单。通过对系统进行合理的硬件、软件设计与调试,该新型级联多电平DVR成功实现挂网运行。

## 1 DVR简介

DVR是一种电压型电能质量补偿装置,串联在电网与负载之间。工作时相当于受控电压源,可在电网和敏感负载之间插入1个任意幅值和相位的电压,当电网电压畸变时,通过改变DVR的输出电压,达到稳定敏感负载电压的目的。其典型的单相电路结构如图1所示,主要包括储能单元、逆变单元、滤波耦合单元和控制单元四部分<sup>[1,2]</sup>。



$U_{sys}$  为系统电网电压;  $U_{dvr}$  为 DVR 补偿电压;  $U_{load}$  为敏感负载电压

图1 DVR 典型电路结构

DVR 实时监测电网电压  $U_{sys}$  的变化,当检测到电网电压发生波动时,迅速计算出需要的补偿电压,产生脉宽调制(PWM)脉冲,控制逆变单元动作产生补偿电压  $U_{dvr}$ ,经过滤波耦合单元串入电网,保证敏感负荷电压  $U_{load}$  的稳定。

## 2 级联多电平 DVR 系统设计

## 2.1 主电路结构

文中设计了一种新型级联多电平DVR,其主电路结构如图2所示,3个单相DVR分别对三相电网电压进行补偿。储能单元采用电容器储能,电网电压经整流后给电容器供电;将2个H桥功率单元级联

后作为 DVR 的逆变单元,级联多电平技术可有效减少开关频率,降低装置损耗<sup>[4-7]</sup>;采用电容器耦合方式将 DVR 串入电网中。

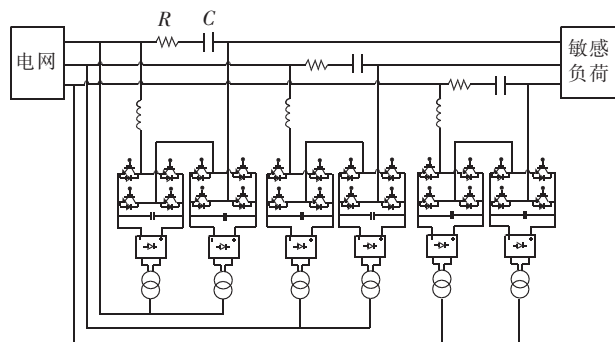


图2 级联多电平 DVR 主电路结构

DVR 在补偿电网电压的过程中,需要吸收能量,因此需配置储能单元。储能单元通常采用 2 种形式:直接采用蓄电池等蓄能器件;采用整流装置给电容器供电。由于蓄电池等储能元件的存储能量有限,采用这种储能形式的 DVR 只能补偿短时电压问题,无法长时间连续运行。文中将电网电压通过隔离变压器后,经二极管整流电路给 DVR 直流侧电容器提供能量,各单元直流侧相互隔离,这种储能形式能够保证装置的长时间连续运行。

DVR 逆变单元采用级联多电平拓扑结构,每相由 2 个 H 桥功率单元级联而成。该电路结构配合载波移相 PWM 技术具有诸多优点:各逆变单元完全相同,易于模块化设计;易于引入软开关控制;易于实现多电平输出,降低开关器件的频率。

DVR 的耦合主要有变压器耦合和电容器耦合 2 种形式,变压器耦合较为常用,在电压等级较高的场合,可以采用升压变压器,降低 DVR 的电压等级。但变压器的非线性特性给这种耦合方式带来许多不足,主要表现为:高次谐波的磁饱和会增大变压器容量;串联变压器的短路阻抗会降低电压精度、带来相移,影响装置的性能;变压器体积大、设备投资大。为了克服这些缺陷,文中采用电容器耦合形式。

## 2.2 检测与补偿策略

该级联多电平 DVR 为实现连续运行,需要实时检测电网电压,并快速计算出 DVR 所需补偿的电压。基于瞬时无功功率变换的  $dq$  检测法<sup>[8]</sup>能够满足该装置对实时性的要求。

DVR 常用的补偿策略主要有同相补偿法、完全补偿法以及最小能量补偿法<sup>[9]</sup>。考虑到负载有一定的抗相位扰动能力,选取同相补偿法对电网电压幅值进行补偿。将电网电压检测、补偿电压计算融为一体,实现 DVR 连续补偿电网电压的功能。

三相电网电压进行  $dq$  变换后,通过低通滤波器

分离出电网基波电压的  $d$  轴、 $q$  轴分量,乘以特定系数后,得到补偿后负载电压的  $d$  轴、 $q$  轴分量,将其反变换至三相坐标系,与三相电网电压相减即可得到 DVR 所需的补偿电压。该方法能够有效检测出三相电网电压跌落、谐波、不对称等情况,并快速计算出补偿电压。

## 2.3 硬件设计

级联多电平 DVR 的硬件系统由 DVR 逆变单元、控制电路和人机界面三部分组成,如图 3 所示。其中控制电路主要由检测电路、信号调理电路、中央微处理器、驱动电路等外围电路组成。

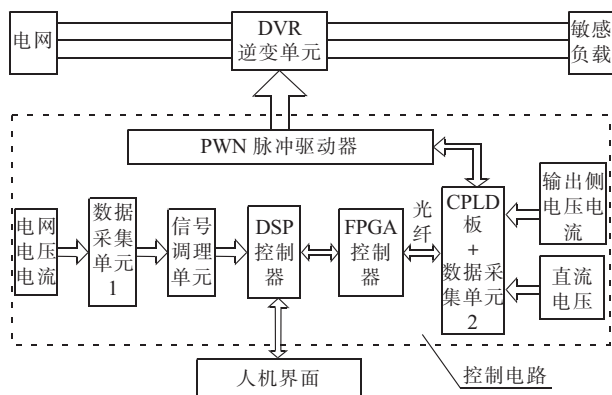


图3 级联多电平 DVR 的硬件系统

DVR 逆变单元串联在电网与敏感负荷间,根据控制电路生成的 PWM 脉冲产生所需的补偿电压,从而减缓电网电压对敏感负载造成的影响。

控制电路是装置的核心部分,主要实现数据采集、数据计算、指令生成、PWM 驱动、故障检测、串行通信等功能。该装置采用 TI 公司的 TMS320 F28335 数字信号处理器(DSP)芯片作为控制电路的中央微处理器,同时结合现场可编程门阵列(FPGA)和复杂可编程逻辑器件(CPLD)完成系统控制。装置中每个 H 桥功率单元均配有一套 CPLD 控制板,用于 PWM 脉冲的输出以及逆变单元的数据采集。电网电压经过传感器后进入信号调理单元,调理到 DSP 的模数转换(ADC)可以接受的电压范围,再送入 DSP 的 ADC 进行模数转换;DSP 根据采集到的电网侧数据、逆变器侧数据,结合相应的控制算法计算出调制信号,通过并行通信将其传送到 FPGA 中,FPGA 将接收到的调制波与三角波进行比较,生成 PWM 波,并与接收到的控制命令一起以一定的帧格式打包编码,通过光纤传递至各功率单元的 CPLD,CPLD 解码后根据控制命令发送 PWM 信号到驱动电路,控制逆变器的输出,实现电网电压的补偿。

人机界面实现人机对话,完成控制命令的输入以及数据信息的显示。该装置采用北京昆仑通态公

司的TPC7062K 触摸屏作为人机交换界面,通过 RS485 串行通信与 DSP 完成数据交换。

### 2.4 软件设计

文中所设计的级联多电平 DVR 采用高性能数字信号处理器 DSP、逻辑可编程芯片 FPGA 和 CPLD 构成控制系统,实现对电网电压的实时检测和快速补偿。

DSP 是整个控制系统的核心,主要实现电网侧数据的采集、调制信号的生成、装置的运行保护、数据通信等功能,其程序流程如图 4 所示。DSP 在初始化后,进入主程序循环,实时监测来自上位机的控制命令,在装置启动前检测系统是否存在故障,并用指示灯显示装置的运行状态。ADC 以 12.8 kHz 的频率进行中断,即每个基波采集 256 个数据,读入采样值进行处理后,计算出调制波送至 FPGA。

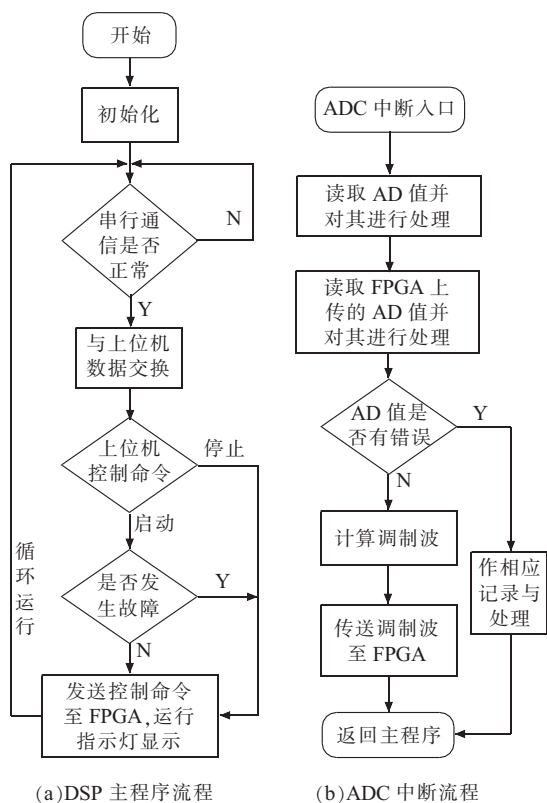


图 4 DSP 程序流程图

FPGA 程序流程如图 5(a)所示。FPGA 是联系 DSP 和 CPLD 的桥梁,FPGA 与 DSP 进行并行通信,负责将 CPLD 采集到的功率单元数据传送给 DSP,并接受 DSP 的调制信号和控制命令。FPGA 通过光纤与 CPLD 进行连接,一方面将 FPGA 产生的 PWM 信号与控制命令打包传送给 CPLD,另一方面接受 CPLD 采集到的功率单元数据和故障信息。

CPLD 程序流程如图 5(b)所示。CPLD 是连接 H 桥功率单元最直接的控制电路,其主要功能是采集功率单元的各项数据及故障信息,负责 PWM 脉

冲信号的输出与封锁;CPLD 通过光纤与 FPGA 进行数据交换。

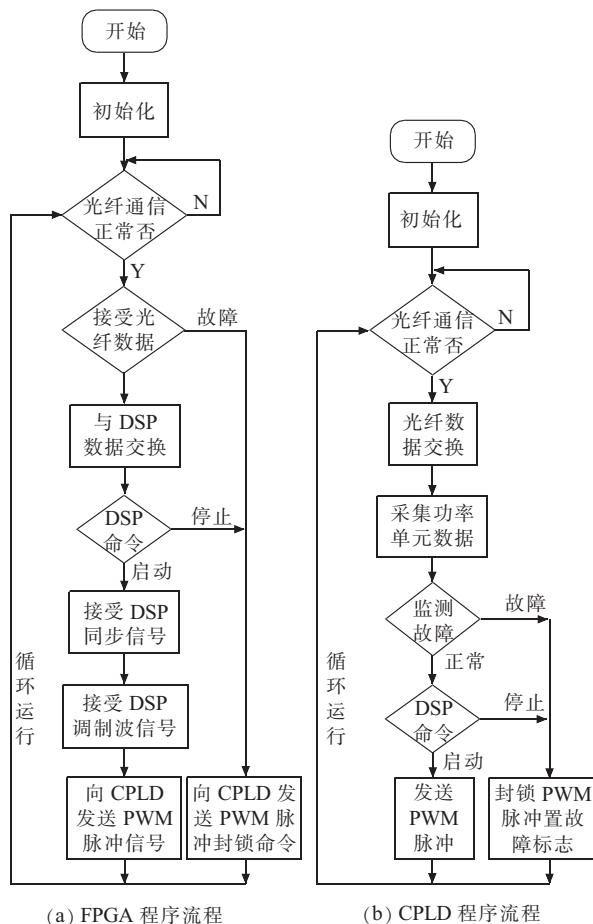


图 5 FPGA 和 CPLD 程序流程

### 3 实际运行测试

文中搭建了 1 台 380 V 三相级联多电平 DVR,通过模拟电网电压长期偏低、电压跌落、电压谐波等问题,验证装置的稳定性及补偿效果;在实验成功的基础上,正式将装置挂网运行。

#### 3.1 电压偏低实验

图 6 为电压长期偏低的实验波形。通过在电网进线端串入电阻,模拟电网电压长期偏低的情况。所模拟的电网电压有效值为 122 V,经 DVR 补偿后的负载电压有效值稳定在 220 V 附近,且补偿后没有带来相位差。

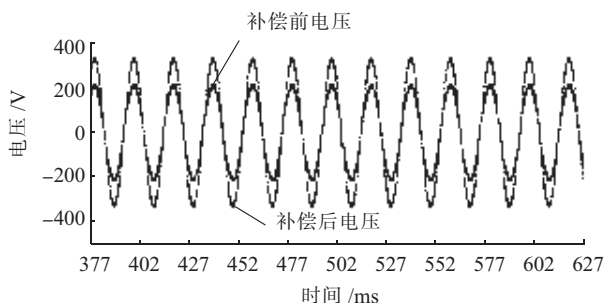


图 6 电压偏低实验波形

### 3.2 电压瞬时跌落实验

在电网电压瞬时跌落实验中,电网正常运行在额定值 220 V 附近,投入串联电阻,使模拟的电网电压有效值瞬时跌落到 122 V,DVR 快速跟踪电压波动,在毫秒级时间内完成了电压跌落补偿,使负载侧电压稳定在 220 V,有效避免了电压波动对敏感负荷造成影响。从图 7 可以看出,文中所设计的 DVR 具有较好的动态性能,能够在电网电压跌落瞬间,产生相应的补偿电压,将负载电压补偿至额定值。

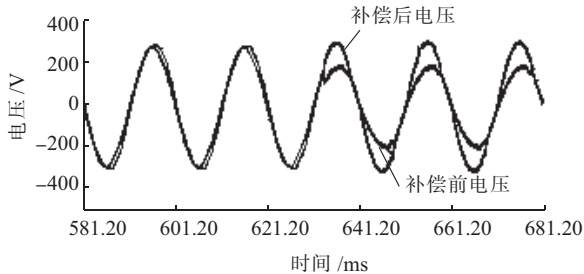


图 7 电压瞬时跌落实验波形

### 3.3 电压谐波实验

DVR 对谐波电压的补偿能力实验波形如图 8 所示。电网电压中存在少量的谐波,经 DVR 补偿后,负载电压的谐波含量降低。图 9 为补偿前电网电压的频谱分析图,从图中可以看出电网电压中含有 3.1% 的 3 次谐波,图 10 为补偿后负载电压频谱分析图,补偿后负载电压中的 3 次谐波降到了 0.42%。由此可见,文中所设计的 DVR 能够有效补偿电压谐波。

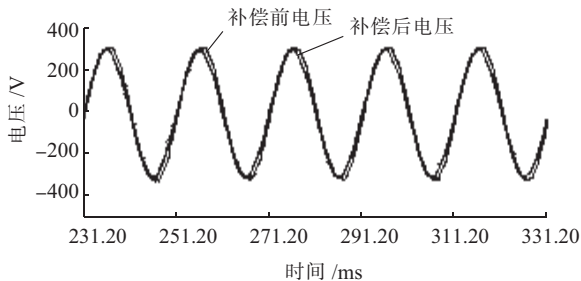


图 8 电压谐波实验波形

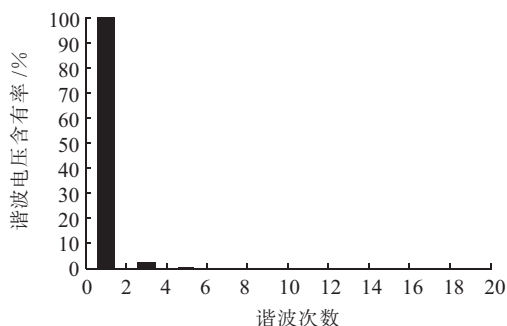


图 9 补偿前电压频谱分析

### 3.4 挂网运行测试

以上实验结果表明,该 DVR 能够稳定运行,并

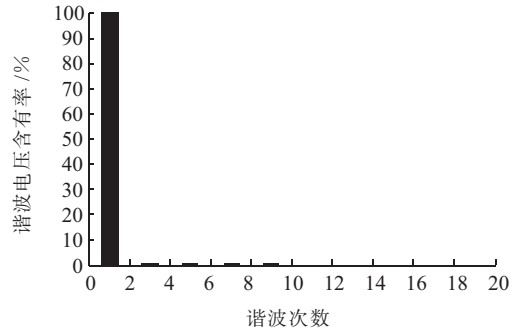


图 10 补偿后电压频谱分析图

能快速、有效补偿电网电压,因此,将其正式挂网运行。挂网时运行负载主要为锻压车床设备,锻压机械为大型电机设备,在设备启动瞬间会造成电网电压的瞬时跌落。图 11 为锻压设备启动时电网电压的波形,图 12 为经过 DVR 补偿后的负载电压波形。为便于分析,对电压波形进行局部放大,如图 13 所示。

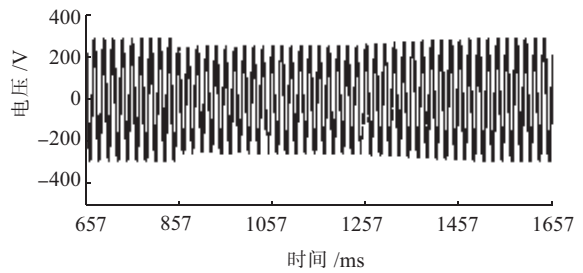


图 11 启动时电网电压波形

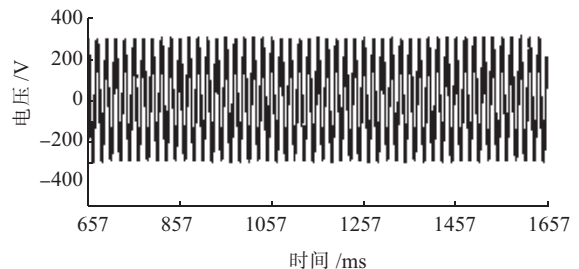


图 12 补偿后负载电压波形

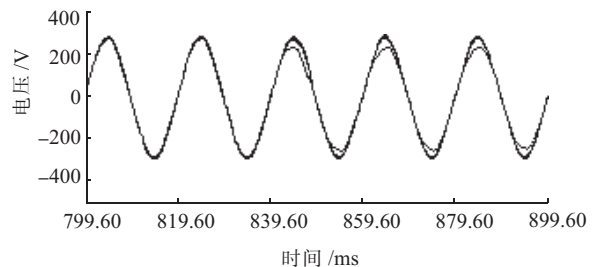


图 13 局部电压波形

从图 11 可以看出,锻压车床设备启动时,电网电压瞬时跌落,随着设备启动结束,电网电压逐渐恢复正常。从图 12 可以看出,经 DVR 补偿后的负载电压波形得到了较大改善,电压几乎没有波动。由此说明,将 DVR 串入系统,可以补偿设备启动时造成的电压跌落,减小电网电压波动对负载的影响。从图 13 的局部电压波形来看,该 DVR 能够快速响应电



压波动,瞬时完成电压补偿,且补偿后没有造成电压相位偏移。

从装置的实验结果和挂网测试结果可以看出,该 DVR 能够快速、有效解决电压偏低、电压跌落、电压谐波等问题。

#### 4 结束语

文中设计了一种新型级联多电平 DVR,主电路采用级联多电平技术,减少了输出侧谐波含量,降低了开关频率和损耗;依靠整流电路给直流侧电容器提供能量,实现了装置的不间断连续运行。采用触摸屏作为人机界面,界面简洁、操作方便、易于人性化管理。选用高性能 DSP、FPGA 和 CPLD 构成控制系统,完成了装置的软硬件设计。对级联多电平 DVR 的实验及挂网运行测试结果表明,该装置能够快速跟踪电网电压波动,补偿电压缺陷,有效解决电网电压问题对负载的影响,保证了负载侧的用电质量。

#### 参考文献:

- [1] 王同勋,薛禹胜,CHOI S S. 动态电压恢复器研究综[J]. 电力系统自动化,2007,31(9): 101-107.
- [2] NIELSEN J G, BLAABJERG F. Control and Testing of a Dynamic Voltage Restorer (DVR) at Medium Voltage Level [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(3): 806-813.
- [3] 周雪松,何杰,马幼捷,等.级联多电平技术在动态电压恢

- 复器中的研究[J].高电压技术,2008, 34(6):1189-1194.
- [4] 牟伟,关振宏,胡鹏,等.级联多电平逆变器的工作原理分析[J].电气传动自动化,2006,28(3):22-26.
- [5] 张卫华.级联多电平动态电压调节器(DVR)系统设计与仿真研究[D].北京:华北电力大学电气与电子工程学院,2005.
- [6] 尹忠东,丁辉,张哲然,等.级联多电平动态电压恢复器的仿真与试验研究[J].电力电子技术,2005,39(5):63-65.
- [7] FITZER C, BARNES M, REEN P. Voltage Sag Detection Technique for a Dynamic Voltage Restorer [J]. IEEE Transaction Industry Applications, 2004, 40(1):203-212.
- [8] 杨新华,郭志成.动态电压恢复器电压跌落检测[J].低压电器,2011(5):51-54.
- [9] 周雪松,张智勇,马幼捷,等.动态电压恢复器检测方法 with 补偿策略的研究[J].电力电子技术,2006,4(3):123-125.

#### 作者简介:

- 刘伟(1977),男,安徽合肥人,工程师,从事电力电子技术与电网运行控制技术的研究工作;
- 孟庆刚(1986),男,山东潍坊人,硕士研究生,从事电能质量方向的研究;
- 商姣(1989),女,江苏泰州人,硕士研究生,从事电能质量方向的研究;
- 钱长远(1987),男,江苏扬州人,硕士研究生,从事电能质量方向的研究;
- 王宝安(1978),男,江苏扬州人,博士,讲师,从事电能质量方向的研究。

### Research on a New Cascaded Multilevel Dynamic Voltage Restorer

LIU Wei<sup>1</sup>, MENG Qing-gang<sup>2</sup>, SHANG Jiao<sup>2</sup>, QIAN Chang-yuan<sup>2</sup>, WANG Bao-an<sup>2</sup>

(1. Nanjing NARI-Relays Electric Power Co.Ltd., Nanjing 211102, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Dynamic Voltage Restorer (DVR) is a voltage power quality compensator device which is connected in series between grid and load in order to protect the power quality of load side. A new type of cascade multi-level DVR is proposed in this paper. Two H-bridge power unit cascade constitute an inverter unit, which depends on rectifier circuit providing energy to inverter unit DC side capacitor. Capacitor coupling is used to string into the power grid in device. Digital signal processor (DSP), field programmable gate array (FPGA) and complex programmable logic device (CPLD) are chosen to constitute control system. A detailed hardware and software design is carried out. The actual running test results show that the cascade multilevel DVR has fast response, can generate compensation voltage quickly and efficiently, and ensure electric quality of side load.

**Key words:** dynamic voltage restorer; cascaded multilevel; DSP; voltage compensation

(上接第 26 页)

### Analysis of an Electromagnetic Unit Fault of Capacitor Voltage Transformer

CHEN Ming-guang<sup>1</sup>, BAO Yu-shu<sup>2</sup>, ZHANG Xing-pei<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Electric Power Company's Maintenance Branch, Xuzhou 221000, China;

2. Frontier Electric Technology Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** A secondary voltage loss fault of 220 kV capacitor voltage transformer (CVT) is introduced. The fault was caused by primary lead disconnection in the electromagnetic unit of 220 kV CVT. Possible reasons for the fault phenomena are analyzed. Combined with the structural characteristics of CVT, a method of judging fault causes indirectly by exclusive method and correlation tests is proposed in the case that this kind of equipment can not be checked through disintegration. Discussions are given for improving this kind of equipment.

**Key words:** capacitor voltage transformer; electromagnetic unit; fault; voltage loss