

基于 MMC 的三相四线制电能质量补偿装置

王 靓¹, 任洪强², 陈国宇², 王宝安²

(1.扬州供电公司,江苏扬州 225009;2.东南大学电气工程学院,江苏南京 210096)

摘要:针对传统三相四线制三相半桥电压型脉冲宽度调制(PWM)整流器在补偿无功、谐波、基波负序和零序电流方面,其输出电压电平数受到限制,导致最终的补偿效果不够理想;星型链式级联H桥多电平虽然能够提高换流器的输出电压的电平数,但是该拓扑结构的换流器对基波负序电流的补偿能力有限;三角形链式级联H桥多电平虽然能够提高对基波负序的补偿能力,但是该拓扑结构的换流器不能应用于三相四线制系统。为此,提出了一种基于模块化多电平换流器(MMC)的三相四线制电能质量补偿方案。MMC以其模块化的特点,理论上其输出电压电平数可以扩展到任意值,达到优化补偿效果的目的,并且其可用于三相四线制系统的电能质量补偿。通过PSCAD/EMTDC平台搭建仿真模型,仿真结果表明:利用MMC可以对三相四线制系统中的无功、谐波、基波负序和零序电流分量进行补偿,且补偿效果良好。

关键词:模块化多电平换流器;电能质量补偿;三相四线制系统;直流侧电容稳压与均压

中图分类号:TM761

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2016)01-0057-04

随着现代工业技术的不断发展,电力系统中大量非线性负载和电力电子装置的普遍使用,使得大量的谐波电流和无功电流注入电网,可能引起电力系统局部并联谐振或串联谐振,使得谐波含量放大,造成电容器等设备毁坏^[1,2]。目前我国的供电系统绝大部分都采用三相四线制系统即存在中线,因而三相电流之和不为零,各种单相负载的接入势必会导致三相四线制系统的不对称运行^[3]。

针对三相四线制系统存在无功、谐波、基波负序和零序电流分量的情况,大量文献对其进行分析并提出了相应的解决方案。文献[4]介绍了一种基于级联H桥换流器的谐波抑制和无功补偿一体化装置的控制与调制,其将有源滤波器(APF)和静止同步补偿器(STATCOM)功能结合起来,同时实现无功补偿和谐波抑制,但是该拓扑结构并不能应用于三相四线制系统,且其对补偿负载的不平衡电流能力有限。文献[5]针对不对称三相四线制系统中零序电流的补偿,提出采用三相四线制并联有源电力滤波器来滤除其中的零序电流,提出了一种不经过坐标变换的滞环控制法,但是该文献所述换流器的输出电压的电平数受到限制,导致其最终的补偿效果并不理想。文献[6]对应用于三相三线制系统的模块化多电平换流器(MMC)的拓扑结构及数学模型进行了详细分析,并给出了MMC应用于三相三线制系统综合补偿时的指令电流的提取方法,但该控制方法局限于三相三线制系统。所以研究基于MMC的三相四线制电能质量补偿对三相四线制系统中存在的无功、谐波、基波负序、和零序电流进行补偿有着重要意义^[7]。文中将MMC应用于三相四线制系统的电能质量补偿中,对其电路结构进

行分析,仿真验证得到了较好的补偿效果,证明了MMC用于三相四线制系统补偿的有效性及其优越性。

1 主电路拓扑与工作原理

1.1 主电路拓扑

基于MMC的三相四线制电能质量补偿装置的拓扑结构如图1所示。MMC换流器共有6个桥臂,每个桥臂由 N 个子模块(SM)和一个桥臂电抗器 L_{arm} 串联组成,三相四线制系统的中性线连接到MMC换流器直流侧电容 C_1 和 C_2 的中点, Z_A, Z_B, Z_C 分别表示A、B、C相的系统阻抗。

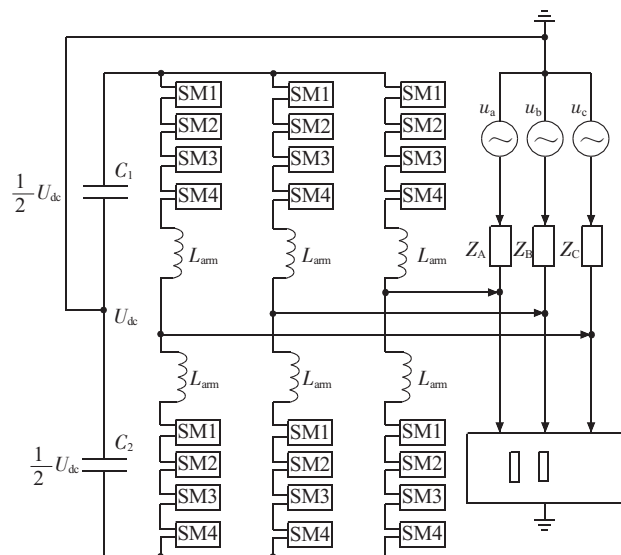


图1 基于 MMC 的三相四线制电能质量补偿装置的拓扑结构

MMC换流器子模块的结构如图2所示,子模块由1个电容和2个带有反并联二极管的绝缘栅双极晶体管(IGBT)组成。设子模块的电容电压为 V_c ,输出电压为 V_x 。无论桥臂电流的方向如何,子模块输出电压

V_x 都在 V_c 和 0 之间切换。当 T2 导通, T1 关断时, $V_x = 0$; 当 T1 导通, T2 关断时, $V_x = V_c$ 。每相都有 N 个模块被旁路, 通过改变上下桥臂子模块的工作状态, 就可以使 MMC 换流器交流侧输出预期的交流电压。

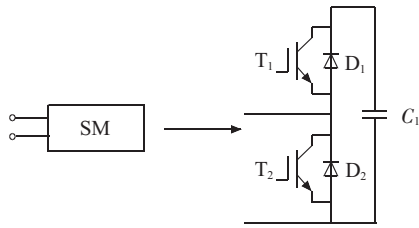


图2 MMC换流器子模块拓扑结构

1.2 工作原理

基于 MMC 换流器的三相四线制电能质量补偿工作原理是首先检测补偿对象的电流, 分离出其中的无功、谐波、基波负序和零序电流, 控制 MMC 换流器产生与上述参考电流大小相等、极性相反的补偿电流, 于是达到消除电网中的无功、谐波、基波负序和零序电流的目的。若参考电流 i_{refz} ($z = a, b, c$) 中含有零序电流, 则基于 MMC 换流器的三相四线制系统的输出电流 i_{comz} ($z = a, b, c$) 将流过中性线, 因而 MMC 换流器每相输出电流都会流过电容 C_1 或 C_2 , 然后再返回中性线, 且该电流的流向是双向的。

2 基于 MMC 的三相四线制电能质量补偿装置的控制策略

基于 MMC 的三相四线制电能质量补偿装置的控制策略主要包括指令电流计算、电流跟踪控制、直流电压控制和调制策略, 整体控制如图 3 所示。首先根据负载电流、直流侧电容电压和直流侧参考电压计算出三相指令电流; 然后将三相指令电流与三相逆变器出口电流经过比例积分 (PI) 控制器, 得到指令电压, 最后将得到的指令电压再加上子模块稳压及均压指令送给脉宽调制 (PWM) 产生电路产生 IGBT 驱动信号。

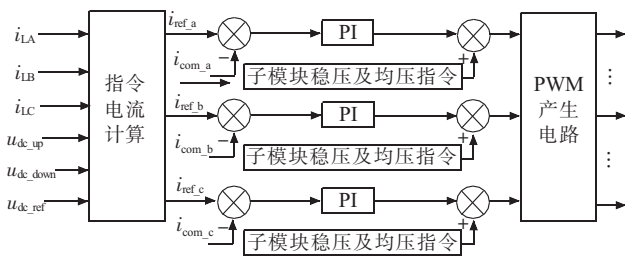


图3 基于 MMC 的三相四线制电能质量补偿装置的整体控制

2.1 指令电流计算

MMC 指令电流检测内容主要包括无功、谐波、基波负序和零序电流。文中设计的三相四线制 MMC 换流器的检测系统原理如图 4 所示。检测系统以 i_d-i_q 检测方法为基础, 取三相负载电流信号为 i_{LA}, i_{LB}, i_{LC} , 由

于零序电流分量 $i_0 = i_{LA} + i_{LB} + i_{LC}$, 因此该三相负载电流分别减去 $1/3 i_0$ 即得不含零序的电流值, 再经过 dq 变换, 转换为瞬时有功电流和无功电流:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta-120^\circ) & -\sin(\theta+120^\circ) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

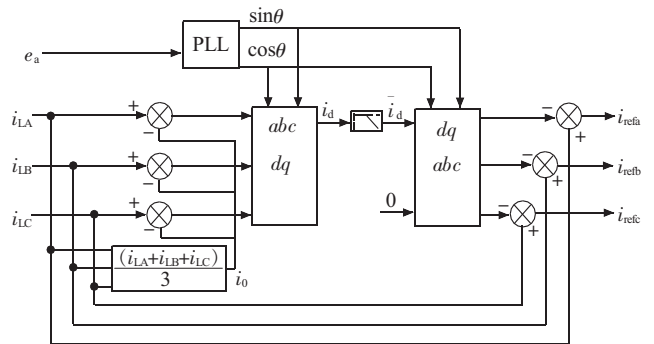


图4 MMC换流器指令电流检测原理

将得到的有功电流分量经过低通滤波器得到有功直流分量, 最后将其进行反变换得出基波正序分量, 再与负载电流相减得出除基波正序分量以外的无功、谐波、基波负序和零序电流的总和。

基于 MMC 换流器的三相四线制系统的综合补偿相比于目前应用在三相三线制的系统来说, 必须考虑 MMC 直流侧上下电容总的稳压和均压, 而 MMC 换流器直流侧总电压的稳压控制策略采用有功分量注入的方法实现稳压, 其控制如图 5 所示。

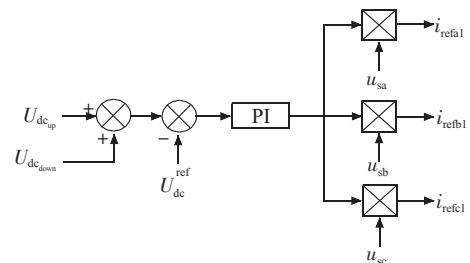


图5 MMC换流器直流侧总电压稳压的控制

另外, 考虑到实际电容的容值和功率损耗的不同, 需采取均压策略对该 MMC 换流器的直流侧 2 个电容的电压进行调节, 保证两者的电压相同。文中采取的策略是取 2 个电容电压之和的瞬时值 U_{dc_sum} 的一半与其中的某一个电容电压瞬时值 U_{dc_up} 或 U_{dc_down} 作差, 然后将差值信号经 PI 控制器得到控制信号, 再将该控制信号以零序分量的形式注入到三相调制波中, 即可使得直流侧 2 个电容电压保持相同, 且为指令电压的一半。其控制如图 6 所示。最后将上述的指令电流进行合成, 得到 MMC 换流器的指令电流, 如图 7 所示。

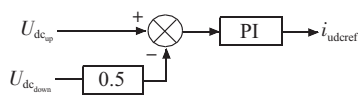


图 6 MMC 换流器直流侧电容均压的控制

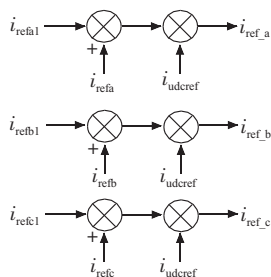


图 7 MMC 换流器的指令电流合成

2.2 MMC 子模块直流电压稳压与均压策略

当系统运行时,子模块中的电容在不断地充电与放电。若不加以控制,子模块电容电压偏离较大,影响系统正常稳定工作。文中选择基于分级控制的均压策略,该策略将子模块电容均压分为相间电压均衡控制和各个子模块电容电压均衡控制。

(1) 相间电容电压均衡控制。该控制的作用是保证每个相单元中所有子模块电容电压的平均值跟踪其额定电压值,从而保证能量在三相单元中均匀分配。控制结构如图 8 所示。

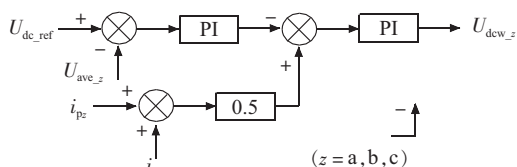


图 8 相间电容均压控制

(2) 子模块电容电压均衡控制。该控制的目的是使每个桥臂上所有子模块的电容电压跟随其参考值。其控制如图 9 所示。

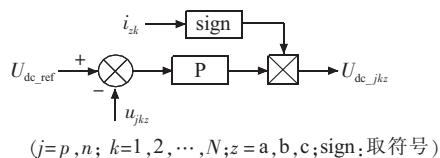


图 9 子模块电容电压均衡控制

2.3 MMC 的调制策略

采用前节所述的指令电流检测方法,检测出需要补偿的电流,然后将补偿电流与 MMC 换流器出口电流作差,并将差值信号通过 PI 控制器,加上子模块稳压和均压指令得到每个子模块的最终指令电压,再与载波三角波进行对比得到开关控制信号。文中采用的调制策略是载波移相正弦脉宽调制技术(CPS-SPWM)^[8]。在 MMC 中,为保证每相每时刻都有 N 个子模块导通,上、下桥臂的调制波相位差为 π ,每个桥臂内相邻模块的载波依次移相 $360^\circ/N$,对子模块进

行调制,通过对每相子模块输出的电压叠加得到多电平输出波形。为了使得 MMC 每相输出 $2N+1$ 电平,当每个桥臂子模块的个数为奇数时,上、下桥臂的每个子模块之间相位依次相差 $2\pi/N$,并且上、下桥臂对应的子模块的载波相位相差 π/N ;当每个桥臂子模块的个数为偶数时,上、下桥臂的每个子模块之间相位依次相差 $2\pi/N$,上、下桥臂对应的子模块的载波无相位差。通过该方法可以保证 MMC 换流器的输出电压电平的增多,从而改善 MMC 逆变器的补偿效果。

3 仿真实验

系统参数:MMC 每个桥臂由 4 个子模块组成,直流侧电容额定电压为 720 V,直流侧上、下电容容值分别为 10^{-2} F 和 2×10^{-2} F,子模块直流侧额定电压为 180 V,子模块直流侧电容容值为 6×10^{-3} F,桥臂连接电感 L 为 2×10^{-3} H,系统电阻为 10^{-2} Ω ,系统电感为 10^{-5} H,主电路开关为理想开关与二极管反向并联,其开关频率为 2×10^3 Hz。

负载参数:A、B 相之间并有 25 Ω 的电阻,C 相和 N 之间并联了 25 Ω 的电阻,同时在 A、B、C 三相接有三相整流桥,其直流侧由 25 Ω 的电阻和 1.2 mF 的电容并联然后再与 6×10^{-4} H 的电抗器相串联而成。

图 10 为采用 $2n+1$ 调制方式 A 相输出相电压波形,从中可以看出 A 相输出相电压为 9 电平,电平数相对于三相半桥 PWM 整流器提高了很多。

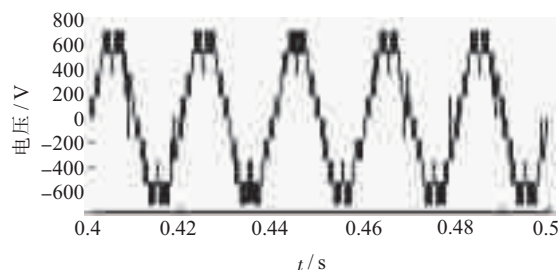


图 10 A 相输出相电压波形

图 11 为基于 MMC 换流器的三相四线制系统补偿前网侧 A 相电压、A 相负载电流波形。可见,基于 MMC 换流器的三相四线制系统投入前,由于负载中有整流桥、电容、电感和电阻等因素的影响,导致其 A 相网侧电压与 A 相负载电流波形的相位有一定的偏移,且其功率因数为 0.895 7。另外,由于整流桥引入,导致 A 相负载电流含有谐波分量,其总谐波畸变率 (THD) 为 47.217%。

图 12 为 A、B、C 三相负载电流,从图中可以看出,三相负载电流不对称,其不平衡度为 15.425 6%。可以得出,由于 A、B 相之间和 C 相、N 之间均并有电阻导致三相负载中含有一定的不平衡电流。

图 13 为补偿后的网侧 A 相电压和 A 相电流,从

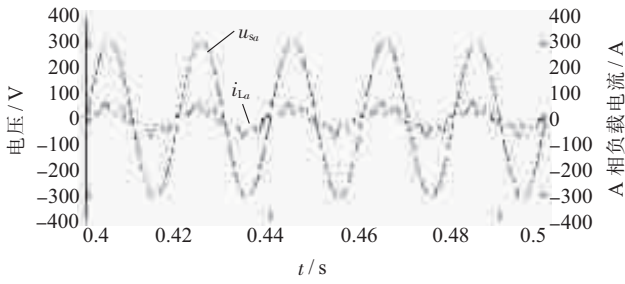


图 11 三相四线制系统补偿前网侧 A 相电压和 A 相负载电流波形

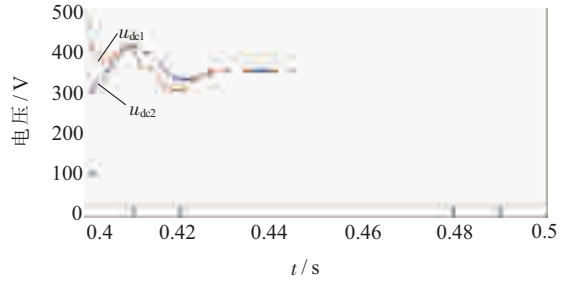


图 15 MMC 换流器直流侧上下 2 个电容的电压波形

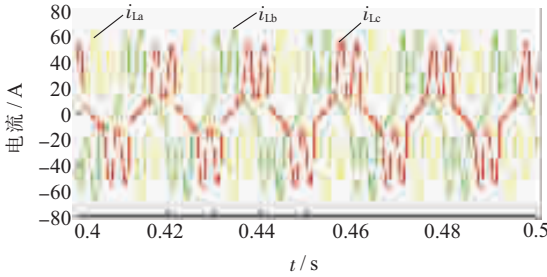


图 12 A、B、C 三相负载电流

图中可以看出,A 相电压和 A 相电流基本同相位,其功率因数为 0.986 2,并且 A 相网侧电流逼近正弦波形,其 THD 为 4.620 9%。

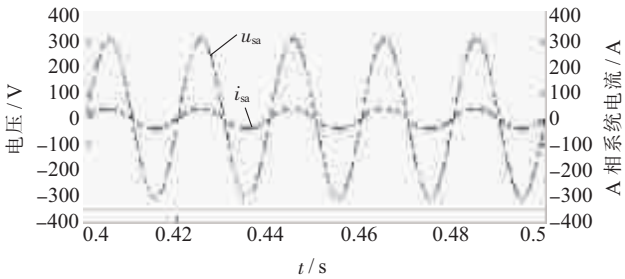


图 13 补偿后的网侧 A 相电压和 A 相电流

图 14 为补偿后的网侧三相电流波形,从图中可以看出,三相网侧电流波形接近正弦波,并且网侧三相电流波形是对称的三相电流波形,其不平衡度为 3.054 8%。

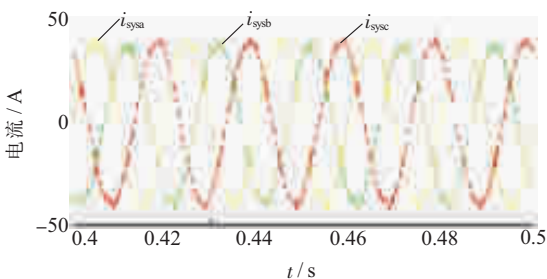


图 14 补偿后的网侧三相电流波形

图 15 为 MMC 换流器直流侧上下 2 个电容的电压波形,从中可以看出,二者的电压波形几乎相同,二者的电压稳定在 360 V 左右。所以基于零序分量注入的方法,可以实现了 MMC 换流器直流侧电容均压的目的。

4 结束语

针对基于 MMC 的三相四线制电能质量补偿进行研究,将 MMC 换流器从三相三线运用到三相四线制系统中,解决了传统三相四线制三相半桥 PWM 整流器输出电平数较少,导致网侧电流波形差(特别是当电流较小时)的问题。针对 MMC 直流侧上、下电容因参数的不同,可能导致其中某一电容两端电压过高的问题,采用了零序分量注入的方法,保证 MMC 直流侧上、下电容电压均衡,避免了其中某一个电容因为电压过大,造成故障。还给出负载电流中的无功、谐波、基波负序和零序电流的提取方法并进行了分析,同时给出了具体的控制框图。

参考文献:

- [1] 杨帆,李晓明,郑秀玉,等. 电力系统分数次谐波的产生机理、危害与特征[J]. 高电压技术,2007,33(12):153-156.
- [2] 王兆安,杨君,刘进军,等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1992:220-320.
- [3] 潘浩,谢运祥. 三相四线制 SAPF 在不平衡负载下的补偿特性[J]. 电力电子技术,2015,49(5):99-101.
- [4] 林志勇,江道灼,周月宾,等. 基于级联 H 桥换流器的 APF-STATCOM 的控制与调制[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(7):91-96.
- [5] 周林,秦梅,易强,等. 三相四线制并联有源电力滤波器[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2000,23(6):95-99.
- [6] 连霄壤. 模块化多电平 STATCOM 控制策略研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [7] 熊桥坡,罗安,马伏军. 模块化多电平 SVG 负序补偿容量比较[J]. 中国电机学报,2014,34(24):4049-4056.
- [8] 黄华,周波达,费建平,等. 基于根轨迹法的链式 STATCOM 比例谐振电流控制器设计[J]. 江苏电机工程,2015,34(2):1-9.

作者简介:

王 靓(1986),男,江苏扬州人,工程师,从事无功电压电能质量管理等方面工作;

任洪强(1990),男,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向为电力电子技术电力系统中的应用;

陈国宇(1990),男,安徽滁州人,硕士研究生,研究方向为电力电子技术电力系统中的应用;

王宝安(1978),男,江苏扬州人,副教授,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

刘洋(1982),男,江西景德镇人,高级工程师,从事高电压与绝缘技术方面的研究工作;

陈俊武(1964),男,湖北荆门人,副教授,从事高电压与绝缘技术方面的研究工作。

The Development and Application of Smart Calibration System for State Monitoring Devices

HU Chengbo¹, ZHANG Neng², MA Yong¹, ZHOU Zhicheng¹, TAO Fengbo¹, LIU Yang¹, CHEN Junwu²

(1. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Through combining current information technologies with smart technologies, the smart vehicle-mounted calibration system for solving the problems that the calibration work of the smart substation state monitoring devices is heavy and inefficient is developed. The smart vehicle-mounted calibration system is based on a testing car. It transmits calibration data through GPRS/3G network and MIWAVE broadband wireless network. From the perspectives of function optimization, information interaction, intelligent detection and so on, the system has realized integrated, informationized and intelligentized transformation of the existing various standard signal sources and standard monitoring devices. The development of this smart calibration system improves the efficiency and quality of field calibration of the substation state monitoring devices. The system has finished field the calibration of several 500 kV or 220 kV substations successfully, ensured the reliable operation of power grid equipment effectively.

Key words: calibration; vehicle-mounted; standard signal source; standard monitoring device

(上接第 60 页)

A Compensation Device of Power Quality in Three-phase Four-wire System Based on Modular Multi-level Inverter

WANG Liang¹, REN Hongqiang², CHEN Guoyu², WANG Baoan²

(1. Yangzhou Power Supply Company, Yangzhou 225009, China;

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

Abstract: The traditional three-phase four-wire three-phase half-bridge PWM voltage rectifier is widely used in compensating reactive power, harmonic, fundamental negative and zero sequence current. However, it has many problems: the number of its output level is limited, which may affect the eventual effect of compensation; cascaded H-bridge with star structure can increase the number of its output voltage level, but its ability to compensate the fundamental negative sequence current is limited; Cascade H with triangle structure can increase the ability to compensate fundamental negative sequence current, but it cannot be applied in the three-phase four-wire system. This paper develops a compensation device of power quality in the three-phase four-wire system based on modular multi-level inverter. In theory, the number of output voltage level of modular multi-level inverter can be extended to any value due to the modular nature. This character can optimize the compensation effect and let modular multi-level inverter suitable for the three-phase four-wire system. The simulation models of modular multi-level inverter are built in PSCAD / EMTDC platform. The simulation results show that modular multi-level inverter can compensate reactive power, harmonic, fundamental negative and zero sequence current for the three-phase four-wire system.

Key words: modular multi-level converter; power quality comprehensive compensation; three-phase four-wire system; DC capacitor voltage's uniformity

(上接第 69 页)

Research on the Integrated Simulation Test System for Smart Substation

ZHAO Guoqing¹, JI Chenyu², ZHANG Haidong¹, LI Yunpeng², HUANG Shubang¹

(1. China Electric Power Research Institute, Nanjing Branch, Nanjing 210003, China;

2. Nantong Power Supply Company, Nantong 226001, China)

Abstract: Many new technologies and equipment are used in smart substation. The deficiencies of the existing experimental and testing means are analyzed, especially in system testing and advanced applications. An integrated simulation testing system for smart substation is built. The testing system is managed by a test host, including virtual devices, test equipment and tool components. The key technologies, including virtual secondly devices, advanced application testing cases and auto-test, used in the testing system are studied. In system testing the virtual device is used to replace actual devices. Automatic testing can be achieved by editing the scripts. Testing process for single-device level and system level is provided. The system is successfully applied in smart substation testing and greatly improves testing efficiency.

Key words: integrated simulation test; virtual secondary equipment; automatic closed-loop test; script design; testing case