

# MMC 型 UPQC 的启动控制策略对比研究

王 浩<sup>1</sup>, 刘正富<sup>1</sup>, 陆晶晶<sup>2</sup>, 卫才猛<sup>3</sup>, 杨用春<sup>2</sup>, 袁 敞<sup>2</sup>, 肖湘宁<sup>2</sup>

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 广东广州 510080; 2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;  
3. 广东电网公司惠州供电局, 广东惠州 516000)

## Comparative Study on the Start-up Control Strategy of MMC Based UPQC

WANG Hao<sup>1</sup>, LIU Zhengfu<sup>1</sup>, LU Jingjing<sup>2</sup>, WEI Caimeng<sup>3</sup>, YANG Yongchun<sup>2</sup>,  
YUAN Chang<sup>2</sup>, XIAO Xiangning<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China;  
2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(North China Electric Power University), Beijing 102206, China;  
3. Huizhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Huizhou 516000, China)

**摘 要:** 本文研究了基于模块化多电平型换流器的统一电能质量控制器(MMC-UPQC)的启动过程及控制方法。首先介绍了 MMC-UPQC 的基本运行原理, 给出了数学模型, 然后分析了 MMC-UPQC 的启动过程, 针对串联侧换流器子模块电容升压过程的特点提出了两种不同的控制方法, 并分别分析了各自的优缺点, 最后进行了 PSCAD/EMTDC 仿真验证, 结果表明串联侧换流器上下桥臂子模块轮换导通的控制方式由于采用逐步提高模块电容电压的方法, 在启动过程的电压电流冲击较小, 启动更为平稳, 并且易于实现, 是一种较好的启动方式。

**关键词:** 模块化多电平换流器; 统一电能质量控制器; 启动; 控制策略; 轮换导通

**Abstract:** In this paper, the start-up process and control method of unified power quality controller (MMC-UPQC) based on modular multilevel converter are studied. Firstly, the basic operating principle and mathematical model of MMC-UPQC are described, and its start-up process is analyzed. Then, two different control methods are presented according to the characteristics of voltage boost process for convertor sub-module on series capacitor side, and their advantages and disadvantages are analyzed. In the end, through PSCAD/EMTDC software, the validity of start-up control method is verified, and simulation results show that there is low voltage current shock and smooth curve, and it is easy to realize during start-up process by using the control mode of sub-module rotation conduction for the up and down bridge arm on series converter side because of its progressively increasing voltage of module capacity, which is a bet-

ter way to start-up.

**Keywords:** modular multilevel converter (MMC); unified power quality controller (UPQC); start-up; control strategy; rotation conduction

## 0 引 言

近年来, 随着智能电网概念的提出, 各种分布式新能源发电、电动汽车等新型设备以及非线性负荷的大量接入, 给电网带来了一系列电压、电流质量问题的隐患。统一电能质量控制器(unified power quality controller, UPQC)作为一种综合协调补偿装置, 能够解决大部分的电能质量问题, 逐渐得到了国内外科研人员的广泛关注<sup>[1-4]</sup>。

由于构成 UPQC 的换流器受限于电力电子器件 IGBT 的制造水平, 目前在中高压领域还没有出现工业样机。随着电力电子技术的进一步发展, 模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)技术在以柔性直流输电为代表的中高压、大容量领域具有明显的应用优势: 它与开关管串联技术相比, 更易实现在更高电压等级和功率要求场合的应用; 模块化设计可以方便地提高装置冗余度, 增加了装置的运行可靠性; 模块化的设计也利于标准化的规模化生产, 以便降低生产成本; 此外, 多电平技术还可以减小输出电压的谐波含量以及开关器件的开关频率, 进而减少了开关损耗<sup>[5-8]</sup>。因此, MMC 技术的出现与不断发展为 UPQC 技术应用于高电压、大容量的场合提供了可能。

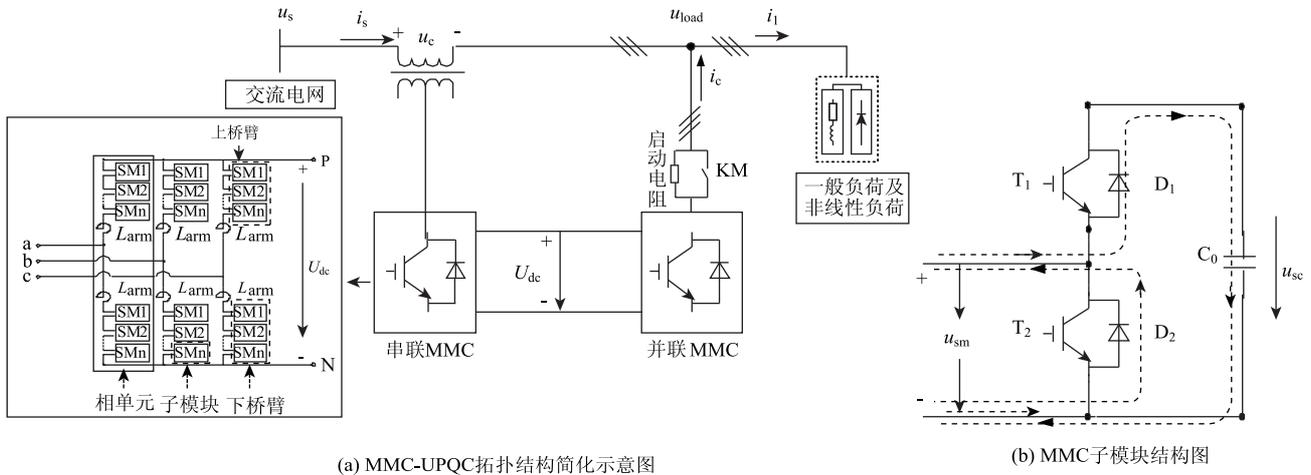
目前针对 UPQC 的研究主要包括: 拓扑结

基金项目: 南方电网重点科技项目 (K-GD2011-420)

构<sup>[9]</sup>、检测控制算法<sup>[10]</sup>等。作为一种电能质量治理装置,研究其启动控制策略对于装置的正常运行具有重要的影响。在此本文将模块化多电平换流器应用于UPQC中,通过分析MMC的工作原理并针对目前传统电压源换流器的充电方式应用于MMC-UPQC启动过程中,造成串联侧换流器子模块电压充电不能一步到位的问题,提出两种启动控制策略,并分析各自的优缺点,最后通过PSCAD/EMTDC下的仿真验证了两种方法的可行性,并进行了对比分析。

### 1 MMC-UPQC 数学模型及运行原理

图1(a)给出三相三线的MMC型UPQC电路拓扑结构的简化示意图,图中串、并联部分的主体拓扑采用模块化多电平换流器结构(见图1),储能由MMC子模块中的电容承担(见图1(b))。UPQC并联部分直接接入电网,串联部分则通过耦合变压器与系统相连。串联侧换流器在正常的时候输出零电压,在系统电压发生跌落的时候输出补偿电压将负载侧电压补偿至额定值。



(a) MMC-UPQC拓扑结构简化示意图

(b) MMC子模块结构图

图1 MMC-UPQC 拓扑结构示意图

图2给出了MMC的等效电路图,忽略桥臂上的压降,根据KVL可得

$$\begin{cases} u_{a1} = u_{Po} - u_{ao} = \frac{1}{2}U_{dc} - u_{ao} \\ U_{dc} = u_{a1} + u_{a2} \\ u_{a2} = u_{ao} - u_{No} = \frac{1}{2}U_{dc} + u_{ao} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_{a1}$ 、 $u_{a2}$  分别为 A 相上、下桥臂的瞬时电压;  $u_{ao}$  为 MMC 的瞬时输出电压;  $U_{dc}$  为公共直流母线电压。

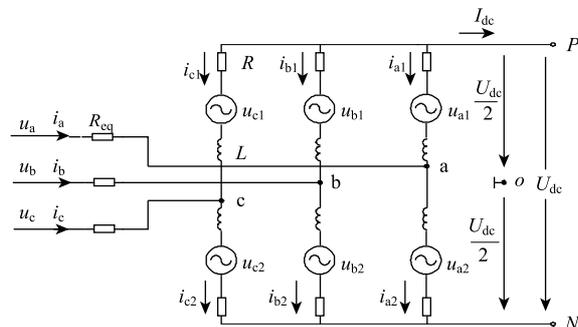


图2 MMC 的等效电路图

从公式(1)中可以看出,直流母线电压由每相各单元上、下桥臂瞬时桥臂电压构成。因此,应对MMC子模块的电容电压进行控制以得到期望的直流电压值。

### 2 MMC-UPQC 的启动过程分析

MMC-UPQC 启动过程的目标是公共直流母线电压达到期望值,同时串联侧、并联侧 MMC 各相桥臂子模块电容电压充满至额定值。并联侧换流器的启动一般采用“两阶段自励式”方法<sup>[11]</sup>: 第一个阶段闭锁换流器子模块并采用串接限流电阻进行不控整流充电,限流电阻的选择主要需要考虑 MMC 交流侧合闸瞬间对子模块开关器件的冲击,以及模块电压的建立时间等因素。在这个阶段,公共直流母线电压最高能够达到  $1.35U_{out}$ , 其中  $U_{out}$  为 MMC 交流出口侧线电压的有效值; 第二个阶段采用定直流电压控制对直流母线继续充电,直到达到期望值。

将这种启动控制方法应用于 MMC-UPQC 进行装置启动的过程中，交流电流直接流经并联侧 MMC 为其子模块电容电压进行充电，并联侧由于控制器的作用将使直流母线电压达到额定值，并联侧子模块的电压也达到额定值。同时由于串并联侧通过公共直流母线相连，串联侧 MMC 子模块电容电压由直流电流进行充电，并联侧在任意时刻投入的子模块个数都为  $N$  个(每相单桥臂子模块的个数)，而串联侧此时上下桥臂所有的子模块都串联在直流充电回路之中，即为  $2N$  个，因此在直流电压达到期望值之后，串联侧 MMC 子模块的电容电压仅为额定值的一半。

串联侧换流器还需要将子模块额定电压的一半继续升压到其额定电压，之后才能将串联侧投入到系统中运行，完成整个启动过程。

### 3 MMC-UPQC 启动控制方法

本文针对上述的两阶段充电之后，串联侧的

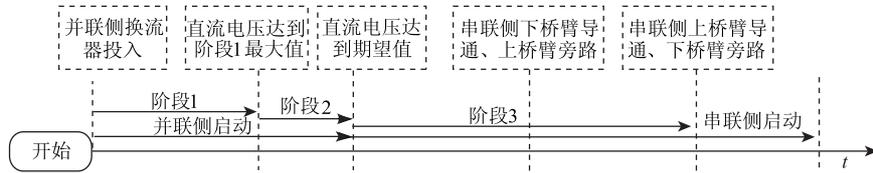


图 3 采用方法 1 的启动控制时序图

#### 3.2 方法 2：串联侧上、下桥臂子模块轮换导通

在这种方法中，UPQC 串联侧 MMC 子模块电容电压的建立分为两个步骤：首先通过状态切换将导通子模块逐次设置为旁路状态，子模块个数递减至  $N$ ；然后将上、下桥臂中导通的子模块与旁路的子模块状态置换，仍保持导通子模块的个数为  $N$ 。

以 5 电平 MMC 为例，表 1 说明了方法 2 中子模块动作状态的切换过程。首先在并联侧换流器各子模块电容电压达到额定值且公共直流电压建立之后，以 A 相为例，按顺序将上桥臂子模块 1、2、3、4 由导通状态切换到旁路状态。随着子模块个数的递减，下桥臂子模块 5、6、7、8 的电压逐渐达到额定值。然后轮换子模块 1 与子模块 5 所处状态，将子模块 1 的电压充满至额定电压，依次轮换子模块 2 与子模块 6、子模块 3 与子模块 7、子模块 4 与子模块 8 所处状态，最终将 A 相上桥臂 4

子模块电压仅为额定值的一半的问题，提出了 MMC-UPQC 启动过程的第 3 个阶段，在这一阶段并联侧仍采用定直流电压控制，串联侧对导通的子模块个数进行控制升压，在本阶段结束后任意时刻导通的子模块个数严格控制在  $N$  个，以使串联侧子模块升至额定电压，为此本文提出两种控制方法。

#### 3.1 方法 1：串联侧上、下桥臂交替导通

如图 3 所示为方法 1 的动作时序图，这种方法的主要操作是在两阶段启动方式结束后，串联侧的上桥臂和下桥臂  $N$  个子模块进行交替导通，也就是直接闭锁  $N$  个子模块，使得串联侧投入的子模块数等于并联侧投入的子模块个数，由公共直流侧对导通子模块进行充电。由于桥臂电感的限制作用，还考虑上下桥臂交替导通轮换的速度，串联侧子模块电压经过一个阶段由额定值的一半跃升至额定值。

个子模块电压达到额定值。至此，整个 UPQC 启动充电过程结束。

表 1 串联侧 5 电平 MMC 子模块动作状态切换表

|             |     | 子模块动作状态(旁路√, 导通×) |   |   |   |   |   |   |   |
|-------------|-----|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| 上<br>桥<br>臂 | SM1 | ×                 | √ | √ | √ | √ | √ | √ | × |
|             | SM2 | ×                 | × | √ | √ | √ | √ | × | × |
|             | SM3 | ×                 | × | × | √ | √ | × | × | × |
|             | SM4 | ×                 | × | × | × | √ | × | × | × |
| 下<br>桥<br>臂 | SM5 | ×                 | × | × | × | × | √ | √ | √ |
|             | SM6 | ×                 | × | × | × | × | × | √ | √ |
|             | SM7 | ×                 | × | × | × | × | × | × | √ |
|             | SM8 | ×                 | × | × | × | × | × | × | √ |

### 4 仿真结果与分析

以 PSCAD/EMTDC 为仿真平台，建立 5 电平的 MMC-UPQC 仿真模型，本文仿真主要为动模

试验装置的研制提供有效的指导，采用与实际动模装置一致的参数，为了验证模块的多电平特性，将装置的交流系统额定电压设计为1 000V，耦合变压器变比为1 000V/1 000V(线电压)，容量为400kVA，桥臂电抗为63mH，子模块电容为4 700 $\mu$ F，启动电阻为150 $\Omega$ ，系统频率50Hz，直流额定电压为1.7kV。采用本文提出的启动方法1和方法2，仿真波形如图4、图5所示。

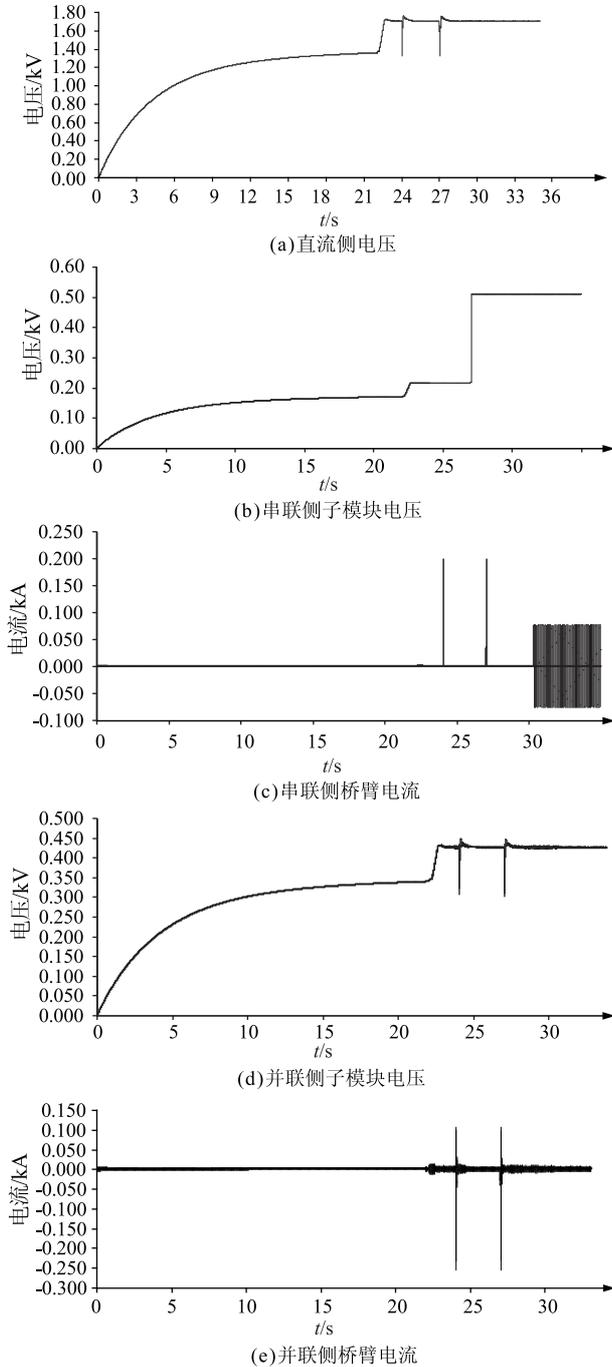


图4 方法1仿真波形

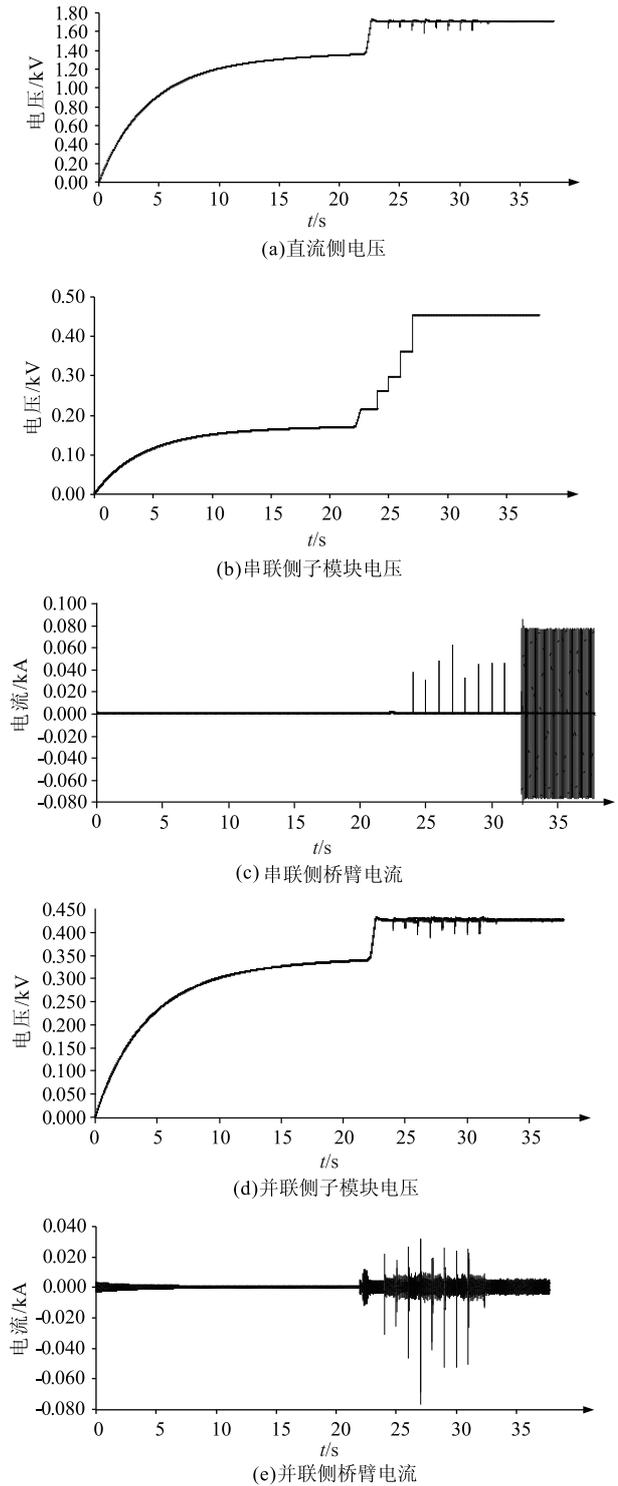


图5 方法2仿真波形

图4、图5中直流电压以及串联侧子模块电容电压的仿真波形验证了本文第3节中提出的启动控制方法1和方法2的可行性，能够使得串联侧子模块电压由额定值的一半上升到额定值。在图中还可以看出，启动过程中子模块状态的频繁切换导

致的过电流及过电压现象: 方法 1 中串、并联侧 MMC 桥臂过电流最大值分别可以达到 200A、250A, 而采用方法 2 该数值约为 60A、78A。从仿真波形中可以看出, 串联侧 MMC 桥臂电流在正常工作情况下的最大值为 80A, 因此采用方法 2 时在充电过程中串联侧换流器产生的桥臂过电流最大值并没有超过稳态情况下的电流最大值。对比两种方法的仿真波形还可以看到, 由于方法 2 中子模块的动作装置处于频繁变化中, 其对装置产生的过电压冲击次数比方法 1 多, 尤其是在电平数较高的 MMC-UPQC 系统中, 但是每次冲击的幅度较小, 同时在控制方面, 方法 1 由于采用上下桥臂交替导通, 控制相对来说简单, 非常易于实现, 启动过程的时间也较短, 方法 2 采用子模块轮换导通, 一个一个模块的投入和退出, 最终达到在串联侧投入  $N$  个子模块的状态, 冲击要较方法 1 小, 控制稍微复杂一些, 但在数字控制的条件下也易于实现, 启动过程相比较于方法 1 时间更长。

## 5 结束语

本文针对传统的换流器“两阶段自励式”启动方法应用于 MMC-UPQC 装置启动过程中, 出现的串联侧 MMC 子模块电容电压充电不足的现象, 分析并提出了 MMC-UPQC 启动的第 3 阶段, 针对这一现象出现的本质原因即串联侧换流器由直流电流充电导致上、下桥臂子模块全部导通, 提出了该阶段的两种控制方法: ①串联侧上、下桥臂交替导通; ②串联侧上、下桥臂子模块轮换导通。对比分析仿真结果得出, 两种方法均能有效实现 MMC-UPQC 的启动, 上下桥臂交替导通的方式升压很快, 由此带来较大的冲击电压和电流, 轮换导通的方式在启动过程中由于逐步进行升压产生较小的过电流, 因此优于第 1 种控制方法, 但是其启动过程所花的时间稍长。

**致谢:** 本文工作得到了新能源电力系统国家重点实验室自主研究课题“基于 MMC 的 UPQC 控制与保护策略研究”的支持, 特此致谢!

## 参 考 文 献

- [1] Fujita H, Akagi H. The unified power quality conditioner: The integration of series- and shunt-active filters [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(1): 315-322.
- [2] 肖湘宁. 电能质量分析与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] Han B, Bae B, Kim H, et al. Combined operation of unified power-quality conditioner with distributed generation [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2006, 21(1): 330-338.
- [4] Kolhatkar Y Y, Das S P. Experimental investigation of a single-phase UPQC with minimum VA loading [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2007, 22(1): 373-380.
- [5] Lesnicar A, Marquardt R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range [C]//2003 IEEE Bologna Power Tech Conference. Bologna, Italy: IEEE, 2003: 1-6.
- [6] Hagiwara M, Akagi H. Control and experiment of pulsewidth-modulated modular multilevel converters [J]. IEEE Tran. on Power Electronics, 2009, 24(7): 1737-1746.
- [7] 王珊珊, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平电压源换流器的数学模型 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 1-8.
- [8] 丁冠军, 汤广福, 丁明, 等. 新型多电平电压源换流器模块的拓扑机制与调制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36): 1-6.
- [9] 张秀娟, 姜齐荣, 韩英铎. 一种新型的单相统一电能质量调节器 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 76-81.
- [10] 吴秋艳, 王宏华. 统一电能质量调节器并联侧 APF 谐波检测技术 [J]. 电力电子技术, 2012, 46(1): 66-69.
- [11] 张静, 徐政, 陈海荣. VSC-HVDC 系统启动控制 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 159-165.

**收稿日期:** 2013-10-12

**作者简介:**

王 浩(1976-), 男, 博士, 主要从事电能质量分析与治理方面的研究工作, E-mail: whhao1@163.com.

(责任编辑: 杨秋霞)