

# 配网统一电能质量控制器直流电容的容量计算与分析

王浩<sup>1,2</sup>, 刘进军<sup>2</sup>, 梅桂华<sup>1</sup>

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 子模块的直流电容是影响 MMC-UPQC 装置的成本和体积的重要因素之一, 直流电容容量选择过大会影响 MMC-UPQC 在配网应用中的实用性。为减小直流电容容量, 提出在 MMC-UPQC 装置补偿配网馈线电压暂降时 MMC-UPQC 的并联变换器吸收适量有功功率的控制策略。分析了采用不同电压暂降补偿策略的 MMC-UPQC 子模块直流电容容量选择方法, 指出所提电压暂降补偿策略为较优策略, 并通过仿真研究验证了该电压暂降补偿策略的正确性。MMC-UPQC 装置采用该电压暂降补偿策略可减小直流电容容量, 从而减少 MMC-UPQC 装置成本和体积, 提高 MMC-UPQC 配网应用的实用性。

**关键词:** 配网; 统一电能质量控制器; 模块化多电平变换器; 直流电容; 容量

## Calculation and analysis of DC capacitor capacitance in distribution UPQC

WANG Hao<sup>1,2</sup>, LIU Jin-jun<sup>2</sup>, MEI Gui-hua<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** DC capacitors in sub-modules are one of the main influence factors of MMC-UPQC's cost and volume. Too large capacitance of DC capacitors will affect the practicability of MMC-UPQC in distribution network application. A control strategy is proposed to reduce the capacitance of DC capacitors in MMC-UPQC, in which shunt converter of MMC-UPQC absorbs appropriate quantity active power during voltage sag. Capacitance calculation methods of DC capacitors in MMC-UPQC with different voltage sag compensation strategies are analyzed, which points out that the proposed voltage sag compensation strategy has advantage on reducing the capacitance of the DC capacitors in MMC-UPQC. Through the simulation in PSCAD, the correction of the proposed voltage sag compensation strategy is verified. Using the proposed voltage sag compensation strategy in MMC-UPQC can reduce DC capacitors' capacitance, save the equipment cost and reduce the equipment volume, which improve the practicability of MMC-UPQC in distribution network application.

This work is supported by National Key Basic R & D Program of China (973 Program) (No. 2009CB219705).

**Key words:** distribution network; unified power quality conditioner; modular multilevel converter; DC capacitor; capacitance

中图分类号: TM71      文献标识码: A      文章编号: 1674-3415(2014)09-0014-06

## 0 引言

随着社会和科学技术的发展, 现代工业、商业和居民用电设备日益增多, 配网用户的用电设备对电源特性变化的敏感性呈逐年上升趋势, 所面临的电能质量问题越来越复杂, 由电能质量问题引起的损失也日趋增加<sup>[1]</sup>。统一电能质量控制器<sup>[2-3]</sup>

(Unified Power Quality Conditioner, UPQC) 是一类

能综合解决电压电流电能质量问题的电能质量治理装置, 可补偿电源的电压暂升/暂降、电压谐波和负荷的无功电流、谐波电流等, 以提高供电质量、降低因电能质量问题造成的损失。目前国内外在 UPQC 的控制方法、拓扑结构等方面进行了研究<sup>[4-8]</sup>, 并有研制小容量 UPQC 实验样机的报道<sup>[9]</sup>。

UPQC 装置可采用两电平变换器技术或模块化多电平变换器<sup>[10]</sup> (Modular Multilevel Converter, MMC) 技术, 其中 MMC 技术在柔性直流输电领域<sup>[11-12]</sup>、中高压 STATCOM<sup>[13-15]</sup>的应用展示了优势: 与采用多个开关串联的两电平变换器技术相比 MMC 技术易实现在更高电压等级和功率要求场合

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 基金资助项目 (2009CB219705); 南方电网公司重点科技项目 (K-GD2011-420)

的应用, 模块化设计提高装置冗余度、增加装置运行可靠性、利于标准化的规模化生产, 多电平可减小输出电压的谐波含量以及开关器件的开关频率和开关损耗。在中压配网的应用中 UPQC 装置更适合采用 MMC 技术, 模块化多电平变换器统一电能质量控制器<sup>[16]</sup> (MMC-UPQC) 的提出为 UPQC 在中压配网中的应用提供了可行性。

由于 MMC-UPQC 的子模块数目众多, 子模块直流侧的直流电容是影响 MMC-UPQC 装置的成本和体积的重要因素之一, 直流电容容量选择过大影响 MMC-UPQC 装置的实用性。本文提出 MMC-UPQC 的并联变换器吸收适量的有功功率、充分利用串联变换器容量的控制策略以减小子模块直流电容容量。根据 UPQC 的电压暂降补偿指标, 选择合适的电压暂降补偿策略, 合理选择子模块直流电容的容量, 达到节省 UPQC 装置成本和体积的目的。给出直流电容容量选择的方法, 并对比了该方法与传统方法选择结果的差异, 体现该方法的优势。建立 MMC-UPQC 的仿真验证电路, 通过仿真研究验证了本文所提电压暂降补偿策略下直流电容容量选择方法的正确性。

## 1 MMC-UPQC 电压暂降补偿

传统 MMC-UPQC 结构如图 1 所示, 由串联部分和并联部分组成, 其中串联部分包括一个串联变换器和三个单相隔离变压器, 并联部分包括一个并联变换器, 串、并联变换器均采用 MMC 技术的变换器, 其结构如图 2 所示。

串联变换器控制为电压源, 可处理电源侧出现的电压型电能质量问题 (如电压暂升、电压暂降、电压谐波等); 并联变换器控制为电流源, 处理负荷侧出现的电流型电能质量问题 (如谐波电流、不平衡电流、无功电流等); 串、并联变换器通过公共直流侧相连。

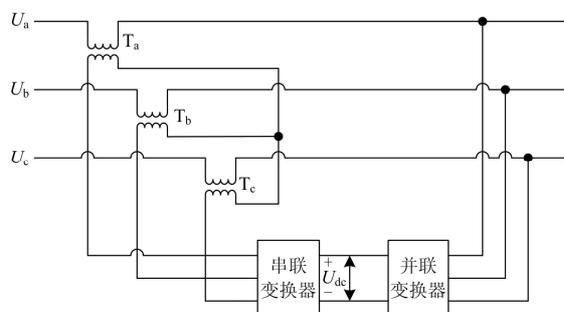


图 1 MMC-UPQC 结构图

Fig. 1 Structure of MMC-UPQC

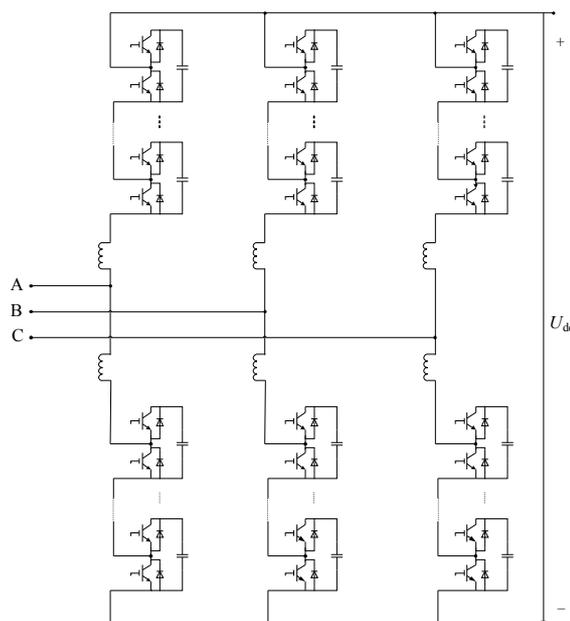


图 2 MMC 变换器结构图

Fig. 2 Structure diagram of MMC

MMC-UPQC 对电压暂降的补偿能力是一个重要指标, 该指标包括所补偿电压暂降补偿的深度和电压暂降补偿的持续时间, 这两个指标是子模块的直流电容容量选择的重要依据。

## 2 电压暂降补偿与直流电容容量选择

MMC-UPQC 装置并联部分有效地补偿无功和谐波电流, 故 MMC-UPQC 所在馈线的功率因数很高, 当串联部分采用与馈线输入电压同相补偿时, 可近似串联部分只输出有功功率。MMC-UPQC 装置电压暂降补偿深度  $d_{\text{sagc}}$  由 MMC-UPQC 的串联变换器的额定容量和馈线负荷的额定容量决定, 为

$$d_{\text{sagc}} = \frac{S_{\text{svscm}}}{p_{\text{loadm}}} \quad (1)$$

式中:  $S_{\text{svscm}}$  为串联变换器的额定容量;  $p_{\text{loadm}}$  为馈线负荷的额定有功功率。电压暂降补偿的持续时间  $t_{\text{sagc}}$  由 MMC-UPQC 的可输出的能量和馈线负荷的有功功率决定, 为

$$t_{\text{sagc}} = \frac{w_{\text{upqc}}}{d_{\text{sagc}} \cdot p_{\text{loadm}}} \quad (2)$$

式中,  $w_{\text{upqc}}$  为 MMC-UPQC 装置在电压暂降补偿期间输出的总能量。

馈线负荷的有功功率由电源和串联变换器共同提供, 与此同时并联变换器可选择是否从馈线吸收

有功功率。当并联变换器不吸收有功功率，串联变换器的输出能量全部由 MMC-UPQC 所有子模块的直流电容释放储能来提供，对直流电容的容量要求很高；当并联变换器吸收有功功率，串联变换器的输出能量由并联变换器吸收的能量和 MMC-UPQC 所有子模块的直流电容释放的能量共同提供，可减小直流电容的容量要求。

电压暂降时禁用公共直流侧电压平衡控制，并联变换器不吸收有功功率，串联变换器的输出能量全部由 MMC-UPQC 所有子模块的直流电容释放储能来提供。不考虑功率损耗时，根据能量守恒定律可得串联变换器输出能量为

$$w_{\text{upqc}} = w_{\text{cap}} = 0.5 \cdot C \cdot (V_1^2 - V_2^2) \cdot N \quad (3)$$

式中： $w_{\text{cap}}$  为装置所有子模块中直流电容用于补偿电压暂降的总能量； $C$  为单个子模块内直流电容容量； $V_1$  为电压暂降开始时直流电容电压； $V_2$  为电压暂降结束时直流电容电压； $N$  为串、并联变换器所 含子模块总数。由式 (2) 和式 (3) 可得直流电容容量为

$$C = \frac{2 \cdot d_{\text{sagc}} \cdot p_{\text{loadm}} \cdot t_{\text{sagc}}}{(V_1^2 - V_2^2) \cdot N} \quad (4)$$

电压暂降时并联变换器吸收有功功率，串联变换器的输出能量由并联变换器吸收的能量和 MMC-UPQC 所有子模块的直流电容释放的能量共同提供。该情况下在不考虑功率损耗时，根据能量守恒定律可得串联变换器输出能量为

$$w_{\text{upqc}} = 0.5 \cdot C \cdot (V_1^2 - V_2^2) \cdot N + p_{\text{pvsc}} \cdot t_{\text{sagc}} \quad (5)$$

式中， $p_{\text{pvsc}}$  为装置并联变换器在电压暂降期间吸收的平均有功功率。由式 (2) 和式 (5) 可得直流电容容量为

$$C = \frac{2 \cdot (d_{\text{sagc}} \cdot p_{\text{loadm}} - p_{\text{pvsc}}) \cdot t_{\text{sagc}}}{(V_1^2 - V_2^2) \cdot N} \quad (6)$$

对比式 (4) 和式 (6) 可知，在电压暂降发生期间，并联变换器吸收有功功率可减少子模块直流电容容量，所减少的数量与  $p_{\text{pvsc}}$  直接相关。电压暂降时允许并联变换器吸收有功功率，MMC-UPQC 有功功率流向如图 3 所示。

由图 3 可见 MMC-UPQC 中形成有功功率环流，该环流大小与  $p_{\text{pvsc}}$  相等，流经并联变换器、串联变换器和串联变压器，该环流增大串联变换器和串联变压器的有功功率输出，需合理地控制  $p_{\text{pvsc}}$  大小以避免串联变换器的输出功率超过其额定容量。由图 3 有

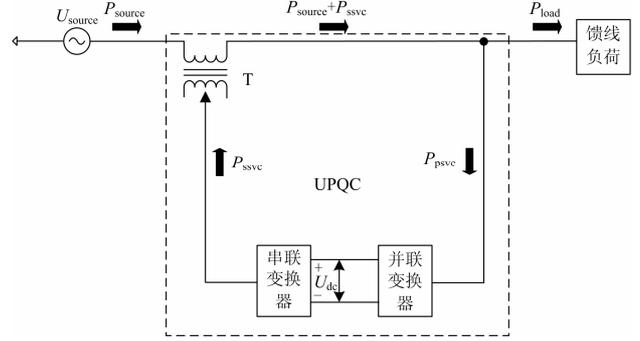


图 3 MMC-UPQC 有功功率流向图

Fig. 3 Active power flow diagram of MMC-UPQC

$$p_{\text{source}} + p_{\text{svsc}} = p_{\text{load}} + p_{\text{pvsc}} \quad (7)$$

其中： $p_{\text{source}}$  为电源提供的有功功率； $p_{\text{svsc}}$  为装置串联变换器在电压暂降期间提供的平均有功功率； $p_{\text{load}}$  为馈线负荷吸收的有功功率。

电源与 MMC-UPQC 串联部分为串联关系，且电源电压与串联部分电压比值为  $(1-d_{\text{sagc}}):d_{\text{sagc}}$ ，故有

$$\frac{p_{\text{source}}}{p_{\text{svsc}}} = \frac{1-d_{\text{sagc}}}{d_{\text{sagc}}} \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (7)，整理得

$$p_{\text{pvsc}} = \frac{p_{\text{svsc}}}{d_{\text{sagc}}} - p_{\text{load}} \quad (9)$$

为保证串联变换器输出功率不超过其额定容量，由式 (9) 可得不等式

$$0 \leq p_{\text{pvsc}} \leq \frac{S_{\text{svscm}}}{d_{\text{sagc}}} - p_{\text{load}} \quad (10)$$

式 (1) 代入不等式 (10)，有

$$0 \leq p_{\text{pvsc}} \leq p_{\text{loadm}} - p_{\text{load}} \quad (11)$$

由不等式 (11) 可知，MMC-UPQC 在馈线负荷有功功率未达到额定值时可通过并联变换器吸收有功功率来减少子模块直流电容释放能量，从而降低直流电容容量要求，为保证串联变换器输出功率不超过其额定值，并联变换器吸收有功功率不超过馈线负荷有功功率的额定值与实际值之差。

### 3 电压暂降补偿控制策略

MMC-UPQC 装置设计串联变换器容量是根据电压暂降补偿深度指标和馈线负荷额定容量来选择，但馈线实际负荷率一般达不到 100%，现提出如图 4 所示电压暂降控制策略。

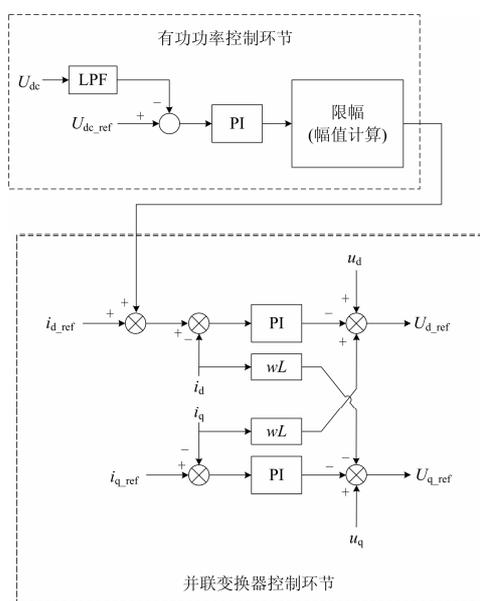


图4 MMC-UPQC 电压暂降补偿策略

Fig. 4 Voltage sag compensation strategy of MMC-UPQC

该电压暂降控制策略中,有功功率控制环节比较 MMC-UPQC 公共直流侧电压的参考值和检测值,所得差值通过 PI 调节器和限幅控制后加到了并联变换器控制环节内有功电流参考值,从而通过并联变换器的控制来控制并联变换器吸收的有功功率。在有功功率控制环节中,限幅控制在电压暂降补偿中计算以限制并联变换器有功电流的注入,保证在不超过串联变换器额定功率的前提下并联变换器吸收的最大的有功功率,以减小 MMC-UPQC 子模块直流电容的释放能量,从而减小直流电容的容量。

MMC-UPQC 装置采用不同电压暂降补偿策略的子模块直流电容在不同实际负载率下的容量可分别通过式 (4) 和式 (6) 计算。一台 MMC-UPQC 装置设计指标如表 1 所示。

表 1 MMC-UPQC 电路主要参数

Table 1 Main parameters of MMC-UPQC

参数	数值
电源电压(线电压)/kV	10
并联变换器额定容量/Mvar	3
串联变换器额定容量/MW	3
馈线负荷额定容量/MVA	5
实际负载率/%	80
电压暂降补偿深度/%	60
电压补偿持续时间/ms	200
公共直流侧电压允许范围/kV	18~22
子模块总数/个	48

使用式 (4) 和式 (6) 计算采用两种不同电压暂降补偿策略的 MMC-UPQC 的子模块直流电容容量,计算结果如表 2 所示。可见在补偿电压暂降时, MMC-UPQC 的并联变换器吸收适量有功功率可减少子模块直流电容的容量,在实际负载率越低的馈线上该补偿策略体现的优势越大。

表 2 直流电容容量计算结果对比

Table 2 Comparison between the calculation results of DC capacitor's capacitance

实际负载率/%	直流电容容量/mF (不吸收有功)	直流电容容量/mF (吸收有功)
1	6.3	6.3
0.9	6.3	5.2
0.8	6.3	4.2
0.7	6.3	3.1
0.6	6.3	2.1
0.5	6.3	1.0

## 4 仿真研究

为了验证本文所提 MMC-UPQC 较佳的电压暂降补偿策略的正确性,基于 PSCAD 搭建 10 kV、3 MVA 的 9 电平 MMC-UPQC 进行了仿真研究。仿真电路主要参数与表 1 相同,实际负载率为 80%,子模块采用 4.2 mF 的直流电容,采用补偿电压暂降时并联变换器吸收适量有功功率的控制策略。0.4~0.6 s 输入电源电压发生 60% 的三相暂降,仿真结果如图 5、图 6 所示。

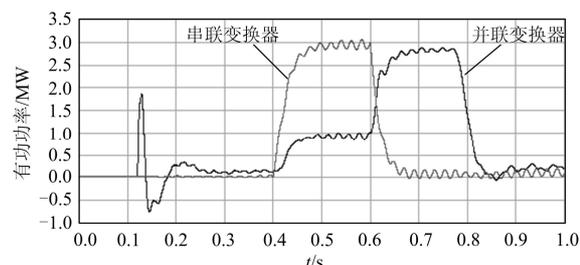


图 5 MMC-UPQC 中两变换器有功功率

Fig. 5 Active power of two converters in MMC-UPQC

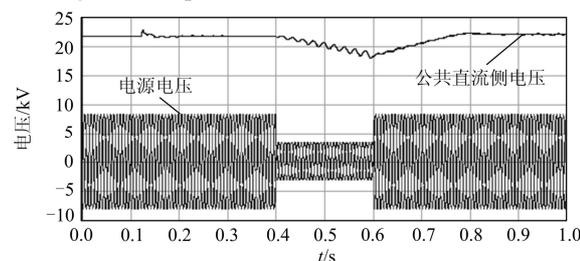


图 6 公共直流侧电压

Fig. 6 Common DC link voltage

由图 5 可见, 补偿电压暂降过程, 并联变换器吸收有功功率限制在 1 MW, 串联变换器提供的有功功率限制在了 3 MW(其额定容量)。由图 6 可见, 公共直流侧电压在 MMC-UPQC 补偿电压暂降过程由 21.6 kV 降到 18.2 kV, 在其允许范围内, 可见采用本文所提的电压暂降补偿策略, 即使 MMC-UPQC 选择容量小的直流电容, 也达到了电压暂降补偿指标。而采用并联变换器不吸收有功功率的补偿策略, MMC-UPQC 选择该容量的直流电容无法满足该电压暂降补偿指标。

## 5 结语

本文提出新的 MMC-UPQC 电压暂降补偿策略减少子模块直流电容容量。该策略在 MMC-UPQC 补偿电压暂降时并联变换器吸收合适大小的有功功率, 充分利用串联变换器额定容量, 减少了子模块直流电容提供的能量, 从而减少了直流电容容量的要求, MMC-UPQC 装置节省了成本和减小了体积。本文讨论了 MMC-UPQC 的电压暂降, 提出了较佳的电压暂降补偿策略, 比较了子模块直流电容容量在采用不同电压暂降补偿策略的计算结果, 并通过 PSCAD 下的仿真研究验证了本文所提较佳 MMC-UPQC 电压暂降补偿策略的正确性。

## 参考文献

- [1] 甄晓晨, 陶顺, 肖湘宁, 等. 电压暂降的工厂级经济损失评估模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 104-111.  
ZHEN Xiao-chen, TAO Shun, XIAO Xiang-ning, et al. An evaluation model of plant-level economic loss due to voltage dips[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 104-111.
- [2] AKAGI H. New trends in active filters for power conditioning[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1996, 32(6): 1312-1322.
- [3] FUJITA H, AKAGI H. The unified power quality conditioner: The integration of series- and shunt-active filters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1998, 13(2): 315-322.
- [4] 王群, 姚为正, 刘进军, 等. 谐波源与有源电力滤波器的补偿特性[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 16-20.  
WANG Qun, YAO Wei-zheng, LIU Jin-jun, et al. Compensation characteristics of harmonic source and active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(2): 16-20.
- [5] 李勋. 统一电能质量调节器(UPQC)的分析与控制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.  
LI Xun. Analysis and control of unified power quality conditioner[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [6] 吴峰, 郑建勇, 梅军, 等. 用于故障限流与电能补偿的多换流器式统一电能质量调节器[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 32-37.  
WU Feng, ZHENG Jian-yong, MEI Jun, et al. Multiconverter-unified power quality conditioner for fault current limitation and power compensation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 32-37.
- [7] 孟金岭, 肖勇, 王文, 等. 适用于高速电气化铁路的低成本电能质量综合补偿装置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 73-80.  
MENG Jin-ling, XIAO Yong, WANG Wen, et al. A low cost power quality compensation scheme for high-speed electric railway[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 73-80.
- [8] 梁祖权, 束洪春. 新型 UPQC 直流电压的  $PI-\lambda D-\mu$  控制[J]. 电工技术学报, 2011, 25(2): 147-151.  
LIANG Zu-quan, SHU Hong-chun. Novel UPQC DC voltage research of  $PI-\lambda D-\mu$  controller[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 25(2): 147-151.
- [9] SUDEEP KUMAR R, GANESAN P. 250 kVA unified power quality controller[C] // Hong Kong: TENCON 2006. 2006 IEEE Region 10 Conference, 2006: 1-4.
- [10] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C] // Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, June 23-26, 2003.
- [11] SAEEDIFARD M, IRAVANI R. Dynamic performance of a modular multilevel back-to-back HVDC system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(4): 2903-2912.
- [12] 薛英林, 徐政. 基于箝位双子模块的 MMC-HVDC 启动控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 1-4.  
XUE Ying-lin, XU Zheng. Start control for the MMC-HVDC system based on clamp double

- submodule[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 1-4.
- [13] 杨晓峰, 范文宝, 王晓鹏, 等. 基于模块组合多电平变换器的 STATCOM 及其控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 7-13.  
YANG Xiao-feng, FAN Wen-bao, WANG Xiao-peng, et al. Static synchronous compensator based on modular multilevel converter based STATCOM and its control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8): 7-13.
- [14] MOHAMMADI H P, BINA M T. A transformerless medium-voltage STATCOM topology based on extended modular multilevel converters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2011, 26(5): 1534-1545.
- [15] 屠卿瑞, 徐政, 郑翔, 等. 一种优化的模块化多电平换流器电压均衡控制方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 15-20.  
TU Qing-ru, XU Zheng, ZHENG Xiang, et al. An optimized voltage balancing method for modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 15-20.
- [16] 龙云波, 袁敞, 肖湘宁, 等. 一种基于 MMC 的三相 UPQC 拓扑电路: 中国, 102593859A[P]. 2012-07-18.  
LONG Yun-bo, YUAN Chang, XIAO Xiang-ning, et al. A three-phase UPQC topology based on MMC: China, 102593859A[P]. 2012-07-18.

---

收稿日期: 2013-08-01

作者简介:

王浩(1976-), 男, 通信作者, 工学博士, 主要研究方向为电力电子技术在电能质量控制及输配电系统中的应用; E-mail: whhao1@163.com

刘进军(1970-), 男, 教授, 主要研究方向为电力电子技术在电能质量控制及输配电系统中的应用, 可持续能源及分布式发电中的电力电子技术, 电力电子电路和系统的建模、仿真、分析和控制;

梅桂华(1963-), 男, 教授级高工, 主要从事电力系统分析工作。