

单相光伏接入的低压配电网平衡补偿技术研究

胡 实^{1,2},袁旭峰¹,曹明杰^{1,2},张天卫¹,谭竹奎²,王 冕²

(1. 贵州大学 电气工程学院,贵州 贵阳 550025;

2. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院,贵州 贵阳 550002))

摘 要:受非线性负载和单相负载等因素的影响,低压配电网自身存在较为严重的三相不平衡问题。随着低压配电网中单相光伏的大量接入,加剧了其三相不平衡度,造成变压器使用寿命降低、线路无功损耗增加等一系列问题。为解决单相光伏接入带来的三相不平衡问题,考虑配电网的三相不平衡因素及低压配电网的结构特点,本文研究一种基于瞬时无功理论的静止同步补偿器的平衡补偿技术。文中首先指出了单相光伏接入带来的三相不平衡问题;然后从理论上分析了静止同步补偿器的平衡补偿原理,并结合低压配电网的特点提出适用于接入低压配电网的静止同步补偿器控制策略,最后在 PSCAD 中搭建了仿真模型,仿真结果表明,所提补偿技术能够有效解决单相光伏接入带来的三相不平衡问题。

关键词:单相光伏;低压配电网;三相不平衡;瞬时无功理论;静止无功补偿器

文章编号:2096-4633(2019)04-0060-07 **中图分类号:**TM714 **文献标志码:**B

环境污染和能源危机已逐步成为世界各国关心的问题,为解决日益严重的能源危机、经济发展和环境污染三者之间的矛盾,新能源的发展成为各国关注的焦点。近年来,光伏发电作为利用可再生能源的发电方式得到了国家的大力支持,其遵循“清洁高效、因地制宜、分散布局、就近消纳、就近并网”原则,不仅能够实现能量的就地平衡,减少线路损耗、改善系统的稳定性,又能有效缓解能源匮乏和环境污染等问题,具有广阔的发展前景。但同时也给配电网尤其是低压配电网带来了一定程度的影响。单相负荷的不均衡分布以及大量存在的非线性负载给低压配电网带来较为严重的三相不平衡的问题^[1],当引入大量的单相光伏时,势必会加剧其固有的三相不平衡度,造成系统三相不平衡运行,既影响系统的经济运行,同时也会影响系统的可靠性。因此,三相不平衡是单相光伏入网必须解决的问题,解决单相光伏接入的三相不平衡有很重要的研究价值。

针对三相不平衡问题,文献[2]提出通过换相器以均衡负荷供给的方式来改善三相负荷不平衡的问题。文献[4]建立了以降低三相不平衡为目标的三相不平衡无功优化模型来降低系统的负序分量来改善三相负荷不平衡问题。但对单相光伏接入带来的三相不平衡问题的研究很少。

因此,在计及系统三相不平衡和低压配电网

结构特点的基础上,本文研究了一种基于瞬时无功理论的静止同步补偿器对单相光伏接入带来的三相不平衡进行平衡补偿,利用 PSCAD 仿真软件搭建了仿真模型进行仿真试验,研究所提补偿技术的可行性。

1 太阳能光伏基本理论

1.1 光伏发电基本原理

光伏效应是吸光材料吸收光子,释放电荷,将光能直接转化为电能的过程。对于光伏半导体组件,其通过光生伏特效应将太阳能转化为电能,由于光伏产生的电压较低,需要通过 boost 升压电路将电压提升到一定的电压等级,以满足逆变器并网所要求的电压。为分析光伏特性,文中将单个光伏电池进行等效,其等效电路图如图 1 所示。

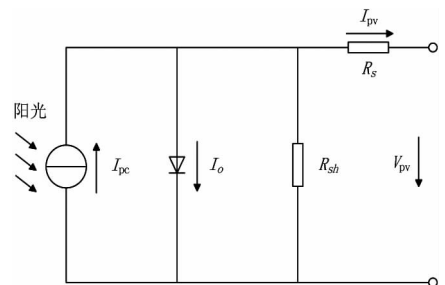


图 1 光伏电池等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of photovoltaic cell

当光照强度恒定时,由于光产生的电流不会随光伏电池的工作状态而变化,因此在等效电路中可以看做是一个恒流源。图1中, R_s 表征的是光伏电池输

出电流在电池板内的损耗,并联电阻 R_{sh} 表征的是由于生产工艺缺陷造成的漏电流。

由图1,光伏电池的输出特性可描述为如下:

$$I_{pv} = I_{pc} - I_o \left\{ \exp \left[\frac{q}{n_c k_c T} (V_{pv} + R_s I_{pv}) \right] - 1 \right\} - \frac{v_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中, I_0 为光伏电池内部等效二极管的 PN 结反向饱和电流, I_0 的数学表达式由式2表示。

$$I_o = I_{pc} - \left[\frac{T}{T_r} \right]^3 \exp \left[\frac{q E_g}{n_c k_c} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2)$$

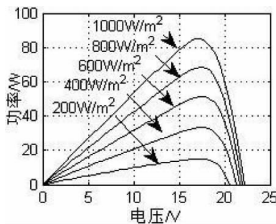
式中, T_r 为光伏电池测试标准温度; K_c 为玻尔兹曼常数; T 为光伏电池热力学温度; n_c 为二极管特性因子; q 为电子电荷; E_g 为光伏电池中半导体禁带宽度; I_{pc} 为光生电流,与光伏电池温度及光伏电池接收到的有效光照强度成正比,采用式3进行描述。

$$I_{pc} = [I_{sc} + k_{ic} (T - T_r)] \frac{s}{100} \quad (3)$$

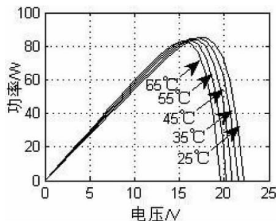
由于光伏电池等效并联电阻值较大,等效串联电阻值很小,工程上一般忽略 R_{sh} 和 R_s 对光伏特性的影响,因此可以简化得到工程近似的数学模型。

$$I_{pv} = I_{pv} - I_o \left\{ \exp \left[\frac{q}{n_c k_c T} (V_{pv} + R_s I_{pv}) \right] - 1 \right\} \quad (4)$$

根据上式,表明:光伏电池的输出电流和电压呈非线性关系,其大小与光照强度和温度相关;为表征光伏电池输出电压、电流和功率的关系,图2给出了不同光强和温度下的 $P-U$ 特性曲线,图3给出了相同温度和光强下的 $I-U$ 特性曲线和 $P-U$ 特性曲线。



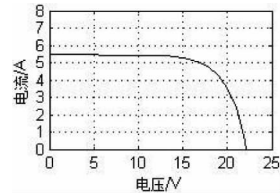
(a) 不同光强的 $P-U$ 特性曲线



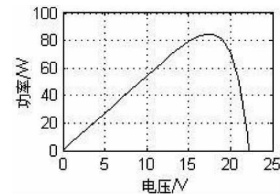
(b) 不同温度的 $P-U$ 特性曲线

图2 不同光强和温度下的 $P-U$ 特性曲线

Fig. 2 $P-U$ characteristic curves at different light intensities and temperatures



(a) $I-U$ 特性曲线



(b) $P-U$ 特性曲线

图3 光伏电池输出特性曲线

Fig. 3 Characteristic curve of photovoltaic cell output

由图3,光伏输出电流、电压和功率呈非线性关系。从图3(a)可以看出,当电压升高时,光伏输出电流先不变再减小。从图3(b)可以看出,当电压升高时,光伏输出功率先增加后降低,图中最高点即为此温度和光照下,光伏的最大功率点。

1.2 光伏逆变器结构设计

光伏发电系统并网运行的前提是将光伏电池产生的直流电转换成交流电,这种转换需要通过并网逆变器实现^[4]。根据直流电源的特性,光伏逆变装置有电压型逆变装置、电流型逆变装置;根据逆变电路结构的差异,可以把逆变装置分为单相全桥逆变装置、三相桥式逆变装置、单相半桥逆变装置等;根据逆变装置的功能可以分为高频逆变装置、工频逆变装置、低频逆变装置。

另外有些逆变装置还会采取隔离变压器,即隔离型光伏逆变装置,这相对于非隔离型光伏逆变装置来说会导致系统能量损耗的增加,也需要更高的产品成本,因此在不需要强制电气隔离的情况下可以采用非隔离型逆变装置,因为其省去了隔离变压器,结构更加简单,效率也得到提高,工程实际应用中可根据规范要求和现实条件来选择逆变装置。

目前光伏逆变器的设计主要采用两级式结构, 其主要包括: 半导体光伏阵列、前级 boost 升压电路 (DC - DC) 和后级逆变电路 (DC - AC) 三部分。相比于单级式结构, 两级式光伏控制较为方便、灵活, 更为重要的是两级式光伏可以通过控制直流电压的方式实现前后级之间的功率解耦。对于单相光伏而言, 每时每刻其流入电网的功率是变化的, 为保证其恒功率输出, 实现 MPPT 控制即最大功率跟踪控制, 必须保证光伏组件的输入和输出功率相同, 这就需要在两级之间加入能量储存器件, 常采用电容冲当功率解耦的器件^[5]。

2 静止无功补偿器的基本理论

静止同步补偿器 (StatCom) 主要包括: 直流侧储能电容、逆变器以及与桥臂串联的电感三部分。其中, 储能侧电容用来为系统提供电压支撑; 电感用于限制故障造成的过电流以及谐波抑制。其原理是通过控制换流器交流侧电压幅值和相位的方式实现与交流系统的无功交换。其原理图如图 4 所示。

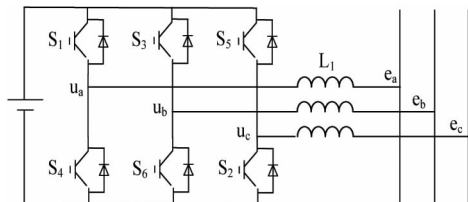


图 4 StatCom 的原理图

Fig. 4 Schematic diagram of StatCom

由图 4, StatCom 装置在进行无功调节时可以等效为一个电压大小可以控制的电压源^[6]。为方便分析, 将 StatCom 装置简化为如图 5 所示的等效电路。

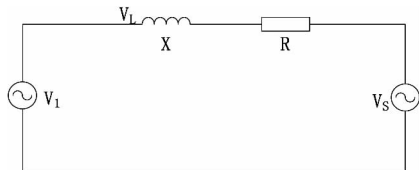


图 5 StatCom 简化等效电路

Fig. 5 Simplified equivalent circuit of StatCom

其中, V_1 、 V_s 分别为 StatCom 的输出电压和交流系统的电压, X 为等效电抗, R 为等效电阻, 则有:

$$V_1 = \frac{V_s \cos(\delta + \varphi)}{\cos\varphi} \quad (5)$$

式中为 StatCom 电压与交流系统电压的相位差, 为交流系统电压的初相位。

通常情况下, 忽略 StatCom 吸收的有功功率, 则

其输出电压和交流系统电压基本同相位, 则其输出的单相无功为:

$$Q = \frac{V_1 - V_s}{X} V_s \quad (6)$$

由式(6), 按照其输出电压与系统电压的大小关系, StatCom 可分为三种工作模式, 如下表所示。

表 StatCom 的三种工作模式

Tab. Three operating modes of StatCom

$V_1 > V_s$	输出超前无功	相当于电容
$V_1 = V_s$	没有无功交换	/
$V_1 < V_s$	吸收超前无功	相当于电感

3 系统控制策略

3.1 单相光伏的控制策略^[7-9]

文中选用的是两级非隔离单相光伏逆变器, 由前级 Boost 和后级逆变电路两部分组成, 其中前级 Boost 变换电路采用 MPPT 控制, 控制系统的最大功率输出; 后级逆变电路采用并网控制, 实现同期并网。

3.1.1 前级 Boost 变换器 MPPT 控制

为避免前后级控制之间出现耦合关系, 本文采用的是基于前级 boost 电路的 MPPT 控制。首先根据光伏电池的输出电压和电流通过 MPPT 算法计算生成光伏输出电压的参考值, 然后与实际测量的光伏输出电压做无静差调节, 产生 PWM 脉冲信号, 进而调节输出电压。其具体的控制系统如图 6 所示。

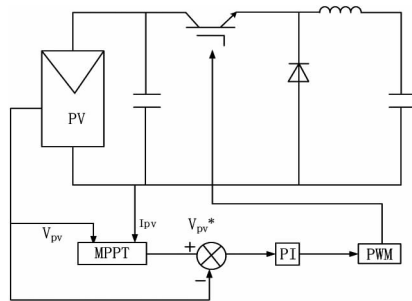


图 6 前级 Boost 变换器的 MPPT 控制

Fig. 6 MPPT control of pre-stage Boost converter

3.1.2 后级逆变器并网控制

后级逆变器并网控制一方面要维持直流侧电压的恒定, 实现两级功率平衡和最大功率点跟踪控制, 另一方面要实现与交流系统的同相同幅控制。本文采用的是基于比例谐振调节器的双闭环控制策略, 直接控制交流侧输出电流, 实现对电流的无静差控

能保持正常运行。

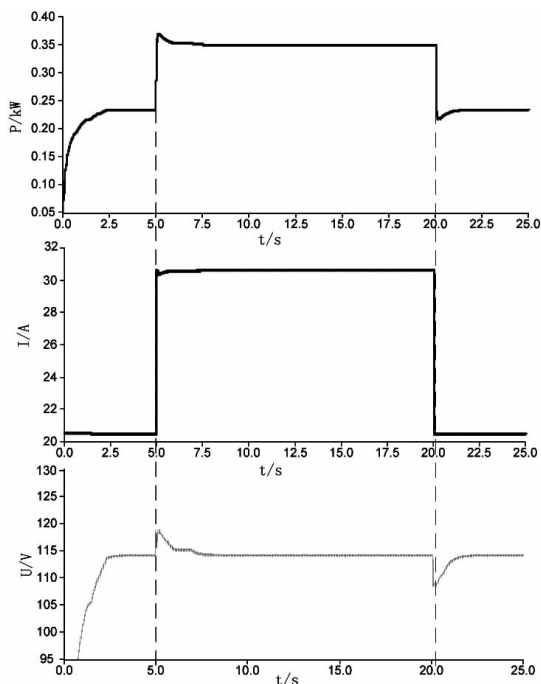


图 9 MPPT 控制输出特性图

Fig. 9 Characteristic chart of MPPT control output

4.2 StatCom 平衡补偿

StatCom 进行无功补偿的关键是维持直流侧电压的恒定。文中将直流侧电容电压参考值设置为 1 500 V,0.5 s 时将其投入运行。

如图 10 所示,单相光伏接在 A 相和中性线之间,0-0.5 s A 相电流明显大于其他两相,出现了一定程度的三相不平衡。0.5 时,StatCom 投入运行,快速检测系统的无功补偿量,然后分别对每一相进行一一补偿,电流快速实现了平衡,补偿效果比较明显。

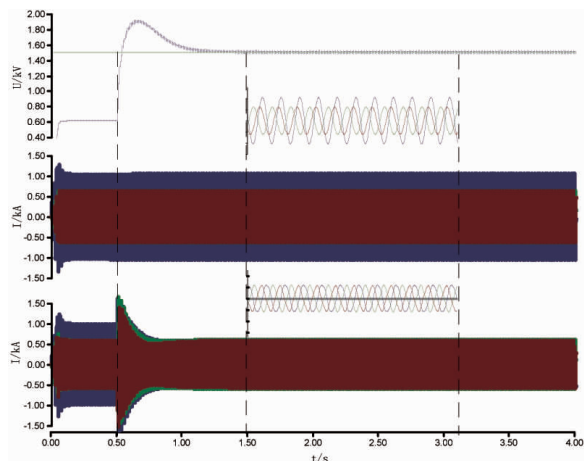


图 10 StatCom 的平衡补偿仿真图

Fig. 10 Balanced Compensation Simulation

Diagram for StatCom

由图 11,当系统的三相电流补偿平衡后,网侧的无功功率也降低至 0,有效降低了系统的无功损耗。由于实际运行中,光伏的光照强度会随着时间的出现非线性变化,其功率输出也会随着光照强度的变化而变化。文中设置了两个光照强度变化点,分别在 0.500 2 s 和 20 s。由图 9,当光照强度发生变化时,网侧的无功在经过短时的波动后继续维持在 0 附近,表明 StatCom 能够进行动态无功补偿。

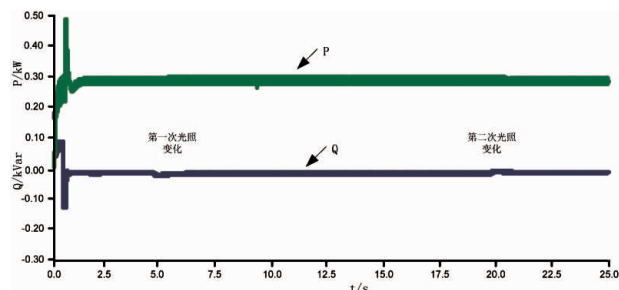


图 11 网侧的功率输出图

Fig. 11 Power output diagram of network side

4 结语

低压配电网中单相负荷的不均衡分布以及非线性负载的存在,致使其本身存在一定程度的三相不平衡,单相光伏的引入会加剧其三相不平衡度。同时,由于低压配电网多为三相四线制的结构特点,三相不平衡时存在零序分量,本文采用先去零序电流,再由瞬时无功理论进行正负序分离的方式,实现 StatCom 对每一相的一一补偿。由仿真结果,基于瞬时无功理论控制的 StatCom 能够实现对系统三相不平衡的平衡补偿,能够有效降低系统的无功损耗。

参考文献:

- [1] 王冕,谢百明,文屹,等. 配电变压器负荷不平衡有源补偿技术应用研究[J]. 电力大数据,2018,21(05):8-17.
WANG Mian, XIE Baiming, WEN Yi, et al. Research on the application of active compensation technology for load unbalance of distribution transformer[J] Power System and big data,2018,21(05):8-17.
- [2] 郑薇. 低压三相不平衡调相装置的研究与设计[D]. 淄博:山东理工大学,2017.
- [3] 赵晋泉,刘绪,林昌年,等. 单相光伏大量接入的三相不平衡配电网无功优化[J]. 电力系统自动化,2016,40(13):13-18+70.
ZHAO Jinquan, LIU Xu, LIN Changnian, et al. Three-phase

- unbalanced for distribution system with a large number of single phase solar generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016,40(13):13-18+70.
- [4] 谢天舒,蔡定国,唐金权,等. 并网光伏逆变系统中变压器与逆变器的参数匹配分析[J]. 变压器,2017,54(05):18-21.
XIE Tianshu, CAI Dingguo, TANG Jinquan, et al. Analysis of parameter matching between transformer inverter in grid-connected PV inverter system[J]. Transformer, 2017,54(05):18-21.
- [5] 程军照,吴夕科,李澍森,等. 采用 Boost 的两级式光伏发电并网逆变系统[J]. 高电压技术,2009,35(08):2048-2052.
CHENG Junzhao, WU Xike, Li Shusen, et al. Boost-based two-level grid-connected photovoltaic inverter system [J]. High voltage engineering, 2009,35(08):2048-2052.
- [6] 唐杰. 配电网静止同步补偿器(D-STATCOM)的理论与技术研究[D]. 长沙:湖南大学,2007.
- [7] 肖远逸,王珺,翟立唯,等. 基于 STATCOM 的光伏低电压穿越技术的应用研究[J]. 电力学报,2017,32(02):116-122.
XIAO Yuanyi, WANG Hao, ZHAI Liwei, et al. Research on application of low voltage traverse technology based on STATCOM [J]. Journal of Electric Power, 2017,32(02):116-122.
- [8] 杨勇,李世华,朱彬彬,等. 基于双阶广义积分的单相光伏并网逆变器灵活功率控制[J]. 电网技术,2014,38(04):952-958.
YANG Yong, LI Shihua, ZHU Binbin, et al. A secod order generalized integrator based flexible power control for single-phase photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power system technology, 2014,38(04):952-958.
- [9] 彭双剑,罗安,荣飞,等. LCL 滤波器的单相光伏并网控制策略[J]. 中国电机工程学报,2011,31(21):17-24.
PENG Shuangjian, LUO An, RONG Fei, et al. Single-phase photovoltaic grid-connected control strategy with LCL filter [J]. Proceedings of the CSEE, 2011,31(21):17-24.
- [10] 孟娇,曾光,杨波. STATCOM 零输出无功时电容电压平衡控制方法研究[J]. 电力电子技术,2018,52(02):108-111.
MENG Jiao, ZENG Guang, YANG Bo. Research on zero output reactive power capacitor voltage balancing control method for STATCOM[J]. Power Electronics, 2018,52(02):108-111.
- [11] NEYSHABOURI YOUSEF, IMAN-EINI HOSSEIN. A new fault-tolerant strategy for a cascaded H-Bridge based STATCOM [J]. IEEE Transactions On Industrial Electronics, 2018,65(08):6436-6445.
- [12] CHAU TAT KEI, YU SAMSON SHENGLONG, FERNADO TYRONE A load-forecasting-based adaptive parmeter optimization strategy of statcom using ANNS for enhancement of LFOD in power system [J]. IEEE transactions on industrial infomatics. 2018,14(06):2463-2472.
- [13] 周虎,陈佳黎,鲜龙,等. 电网三相不平衡下农网低电压治理的研究[J]. 电网与清洁能源,2015,31(11):13-18+25.
ZHOU Hu, CHEN Jiali, XIAN Long, et al. Research on the low voltage of three-phase unbalanced in rural grid [J]. Power system and clean energy, 2015,31(11):13-18+25.
- [14] 辛业春,李国庆,王朝斌. 无功和三相负荷不平衡的序分量法补偿控制[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(14):72-78.
XIN Yechun, LI Guoqing, WANG Chaobin. Compensation control of reactive power and three-phase unbalance load based on the method of sequence component [J]. Power System Protection and Control, 2014,42(14):72-78.
- [15] 林志雄,陈岩,蔡金锭,等. 低压配电网三相不平衡运行的影响及治理措施[J]. 电力科学与技术学报,2009,24(03):63-67.
LIN Zhixiong, CHEN Yan, CAI Jinding, et al. Impact and countermeasure of three-phase unbalanced operation for low voltage distribution systems [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2009,24(03):63-67.
- [16] 刘志明,邓昆玲. 分布式光伏接入中低压配电网安全配置关键技术研究[J]. 内蒙古电力技术,2016,34(06):12-16.
LIU Zhiming, DENG Kunling. Research on safety configuration key technology of distributed photovoltaic connecting to mid and low voltage distribution network [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2016,34(06):12-16.
- [17] 黄兵,赵晋泉,朱斌,等. 含分布式电源三相不平衡配电网供电能力评估[J]. 广东电力,2018,31(06):120-126.
HUANG Bing, ZHAO Jinquan, ZHU Bin, et al. Evaluation on power supply ability of unbalanced three-phase distribution network with three-phase unbalance of distributed generation [J]. Guangdong Electric Power, 2018,31(06):120-126.

收稿日期:2018-12-11

作者简介:



胡实(1993),男,硕士研究生,研究方向为电力电子在电力系统中的应用。

(本文责任编辑:范斌)

Research on balance compensation technology of low-voltage distribution network bsaed on single phase photovoltaic access

Hu Shi^{1,2}, Yuan Xufeng¹, Cao Mingjie^{1,2}, Zhang Tianwei¹, Tan Zhukui², Wang Mian²

(1. College of electrical engineering, Guizhou University, Guiyang 550025 Guizhou, China

2. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co. ,Ltd. ,Guiyang 550002 Guizhou, China)

Abstract: Affected by factors such as non-linear load and single-phase load, the low-voltage distribution network itself has a serious three-phase imbalance problem. With the large-scale access of single-phase photovoltaics in the low-voltage distribution network, its three-phase unbalance degree is aggravated, resulting in a series of problems such as reduced transformer service life and increased line reactive loss. In order to solve the three-phase unbalance problem caused by single-phase photovoltaic access, considering the three-phase unbalanced factors of distribution network and the structural characteristics of low-voltage distribution network, this paper studies a balanced compensation technology of static synchronous compensator based on instantaneous reactive power theory. Firstly, this paper points out the three-phase unbalance problem caused by single-phase photovoltaic access, then analyzes the principle of static synchronous compensator in theory, and puts forward the control strategy of static synchronous compensator suitable for low-voltage distribution network according to the characteristics of low-voltage distribution network. Finally, a simulation model is built in PSCAD to simulate. The results show that the proposed compensation technology can effectively solve the three-phase unbalance problem caused by single-phase photovoltaic access.

Key words: single-phase photovoltaic; low-voltage distribution network; three-phase unbalance; instantaneous reactive power theory; statcom