

新能源发电低电压穿越的 VSG 实验平台研制

周 稳¹, 毕大强², 戴瑜兴¹, 成林俞¹, 熊书华¹

(1. 温州大学 电气数字化设计技术浙江省工程实验室, 浙江 温州 325035;

2. 清华大学 电机系 电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 针对低电压穿越(LVRT)试验所需电压跌落发生器(VSG), 提出一种基于 LabVIEW 上位机控制的变压器形式 VSG 设计方法。重点分析了所研制 VSG 实验平台的设计原理, 通过 LabVIEW 设计上位机与本地 VSG 控制器进行通信控制, VSG 控制器采用 STM32F103 作为主控芯片构建控制系统。VSG 主体结构主要包括抽头变压器、继电器与限流电阻。研制的实验平台可实现上位机安全可靠操作 VSG, 能精确设置电压跌落持续时间, 模拟不同跌落深度的电网故障电压, 满足 LVRT 试验要求。实验结果表明所研制 VSG 实验平台的有效性与可靠性。

关键词: 电压跌落发生器; 通信; 控制; LabVIEW; 低电压穿越; 可再生能源

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.01.017

0 引言

伴随光伏发电、风力发电等新能源发电的应用不断增多, 许多国家出台标准要求光伏电站、风力发电站在并网时电网发生故障情况下, 一定时间内不能脱网, 必须具备一定的低电压穿越 LVRT (Low Voltage Ride Through) 能力^[1-4]。为了实验研究与测试风力发电或光伏发电系统在电网电压因故障跌落时的穿越能力, 需要考虑各种可能遇到的电压跌落情况。然而, 电网电压故障不可控制, 在正常实验系统中做跌落实验也不允许。因此, 研制电压跌落发生器 VSG (Voltage Sag Generator) 十分必要。

目前研究 VSG 的拓扑结构主要为 3 种形式: 阻抗形式、电力电子变换形式和变压器形式^[5]。文献[6]提出了一种光伏发电 LVRT 实验用阻抗形式的 VSG, 仅进行仿真研究, 缺乏可靠实验验证。文献[7]提出一种阻抗形式 VSG 中限流电抗器和接地电抗器的拓扑结构及电气参数设计方法。文献[8]研究指出阻抗形式 VSG 是低成本实现 VSG 的方案。虽然阻抗形式 VSG 结构简单, 研制实现方便, 但其能量损耗大。文献[9]提出一种可编程电网故障模拟电源的设计方案, 采用背靠背式 PWM 变换器, 通过控制模拟各类电网故障。文献[10]研究了一种基于电压源型逆变器的可编程 VSG 方案, 利用比例积分谐振控制器实现 4 种电网故障电压模拟。文献[11-12]设计采用电力电子形式 VSG 方案, 利用逆变器控制为可控电压源形成电压跌落。电力电子变

换形式 VSG 方案的形式较为灵活, 但是受到电子开关器件功率的制约, 其功率等级受限, 且成本高, 可靠性低, 控制较为复杂。文献[13]采用一种三相自耦变压器和由可控器件 IGBT 构成的双向开关实现 VSG 方案, 能实现各种类型电压跌落的故障模拟, 但其缺乏关于上位机控制的分析研究。文献[14]研制了一种 LVRT 现场测试用的变压器形式 VSG, 其结构简单、容易实现, 适用功率等级高, 但跌落持续时间配置不灵活, 操作无上位机控制, 较为不方便。

因此, 本文提出一种基于 LabVIEW 控制的采用中心抽头变压器形式的 VSG 设计方法, 研制搭建了一个 VSG 实验平台。VSG 采用 STM32F103 控制, 其通过与 LabVIEW 上位机通信, 能够灵活方便地进行电压跌落操作, 精确控制跌落持续时间, 产生三相对称、三相不对称、两相、单相不同跌落深度的电压故障情况。该设计方法安全性高、可靠性强、成本低, 能够满足风力或光伏发电 LVRT 实验要求。

1 新能源发电 LVRT 测试

根据《风电场接入电网技术规定》^[15], 其 LVRT 要求曲线如图 1 所示(并网点电压为标幺值), 风电场内的风电机组接入点的电压降低到标称电压的 20% 时, 能够保持并网运行 625 ms 的 LVRT 能力。额定电压的 90%~110% 范围内, 风电场内的风电机组可以正常运行, 并网点电压发生跌落 2 s 内能够快速恢复到额定电压的 90% 以上。风力发电并网 LVRT 测试中, 一般会选取一定规格的跌落电压, 电压跌落规格^[16]如表 1 所示, 其中 U_{TP} 为实际并网点输出三相线电压有效值, U_n 为电网额定三相线电压有效值。

根据国家标准 GB/T 19964—2012《光伏发电站接入电力系统技术规定》^[17], 其 LVRT 要求曲线如图

收稿日期: 2015-09-07; 修回日期: 2016-11-02

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA051201)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012AA-051201)

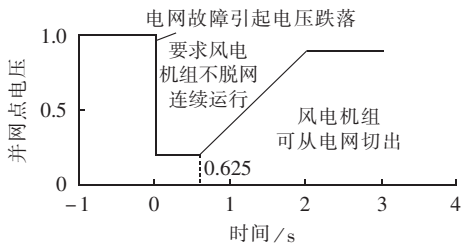


图 1 风电场 LVRT 要求

Fig.1 Requirement of wind farm for LVRT

表 1 风电 LVRT 电网电压跌落测试规格
Table 1 Voltage sag specifications for LVRT test of wind farm

规格	电压跌落幅值 (U_T/U_N)	故障持续时间 / ms
1	0.90-0.05	2000±20
2	0.75±0.05	1705±20
3	0.50±0.05	1214±20
4	0.35±0.05	920±20
5	0.20±0.05	625±20

2 所示(并网点电压为标么值)。其要求光伏电站并网点电压跌落至 0 时,能连续不脱网运行 150 ms,并网点电压跌至曲线 1 以下时,光伏电站可以从电网切出。依据光伏发电并网 LVRT 要求曲线以及国家标准 NB/T 32005—2013《光伏电站低电压穿越检测技术规程》,光伏 LVRT 测试检测需要至少选取 5 个跌落规格点^[18],其中应该包含 0% U_N 与 20% U_N ,其他点分别分布在 20% U_N ~50% U_N 、50% U_N ~75% U_N 、75% U_N ~90% U_N ,由此,可选择采用如表 2 所示的规格进行实验测试。

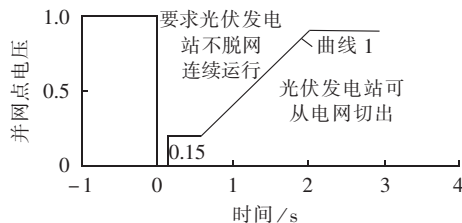


图 2 光伏电站 LVRT 要求

Fig.2 Requirement of photovoltaic station for LVRT

表 2 光伏 LVRT 电网电压跌落测试规格
Table 2 Voltage sag specifications for LVRT test of photovoltaic station

规格	电压跌落幅值 (U_T/U_N)	故障持续时间 / ms
1	0.9	2000±20
2	0.8	1804±20
3	0.6	1411±20
4	0.4	1018±20
5	0.2	625±20
6	0	150±20

然而实际测试研究 LVRT 时,为了更好地考核穿越能力,故障跌落电压持续时间可能比标准要求的更长,因此,进行 LVRT 实验测试时,需要 VSG 灵活配置跌落电压深度以及持续时间,提供符合以上

测试规格的跌落电压。

2 VSG 设计原理

为了满足实验测试 LVRT 要求,设计如图 3 所示 VSG 实验平台原理图,采用意法半导体公司的 STM32F103 作为主控芯片,实现驱动控制 4 个三相接触器、电压数据实时采样以及上位机通信。核心部件为带抽头变比可调的三相变压器, K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 为 4 个继电器控制信号,每一个继电器相应控制一个三相接触器,由此控制 A、B、C 三相电压在变压器副边侧的通断。 R_1 — R_6 为限流电阻,限流电阻的设计参数依据变压器绕组承受的电流范围、电阻短路时的过载能力而设定。 L_2 、 L_3 、 L_4 为三相变压器副边抽头。

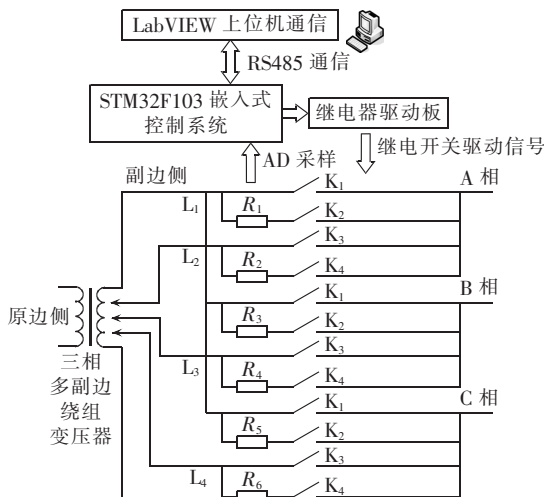


图 3 VSG 实验平台设计原理图

Fig.3 Schematic diagram of VSG testbed design

工作原理如下。

以 A 相为例,正常电网条件下 K_1 导通, K_2 — K_4 关断,A 相输出与副边 L_1 相连。当 A 相电压发生跌落时,为了避免 K_1 和 K_3 同时导通而发生短路,控制继电器按照如下顺序动作: K_2 导通→ K_1 关断→ K_3 导通→ K_2 关断。此时,A 相输出与副边 L_2 相连。由于 L_2 的变压比可以不同于 L_1 ,A 相输出电压将发生跳变。电压恢复过程与之类似,其继电器通断顺序为: K_4 导通→ K_3 关断→ K_1 导通→ K_4 关断。综上所述,对于 A 相,通过选择不同的变压比副边 L_2 ,可以选择不同的电压跌落深度,通过控制跌落和恢复过程的时间间隔,可以控制故障电压持续的时间,从而在 A 相上模拟出需要的电压故障。对 B、C 相进行类似的处理控制,通过调节变压器副边抽头 L_2 、 L_3 、 L_4 的位置,实现 VSG 的三相、两相、单相不同深度的电压跌落,可以模拟出电网电压的各种故障,如幅值跳变、相位跃迁等,从而完全可以满足新能源发电设备 LVRT 测试所需电网电压跌落要求。

3 上位机设计

设计上位机可实现安全、灵活地操作 VSG,为风力发电、光伏发电 LVRT 实验提供方便。采用虚拟仪器的 LabVIEW 图形化的程序进行上位机设计开发,所设计的程序总体结构采用顺序式,可实现对电网电压跌落实验平台的操作及显示实际电压跌落情况。

上位机通过 RS485 串口与主控芯片 STM32 进行通信,波特率设置为 19 200 bit/s。自定义设计与主控芯片之间的通信协议,保障通信质量。设计的通信协议包含命令数据帧与响应数据帧。下发命令数据帧包括报头、报尾校验字节、主电路合闸、断开、数据复位、数据读取、跌落执行、跌落时间等设置命令。在通信握手成功后,执行控制板上上位机回传响应帧,包括三相线电压有效值、当前 VSG 的状态等信息。

上位机前面板如图 4 所示,上位机操作流程:首先,选择跌落器工作模式,标准模式与自由模式决定的是跌落持续时间,其中标准模式是依据 LVRT 曲线计算跌落持续时间,而自由模式时可给定 100 ms~2 s 时间内的数值;其次,合闸主电路即 K_1 继电器合闸,使 VSG 接入三相电压;然后,执行跌落操作;最后,开始读取数据,可显示跌落电压数据情况。

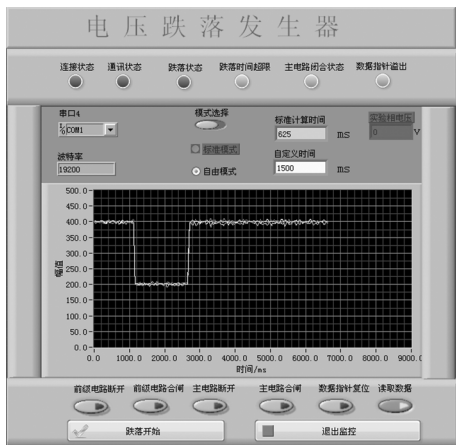


图 4 三相电压跌落 50% 时上位机显示情况
Fig.4 Display of 50% three-phase voltage drop on supervisory computer

4 实验结果

为验证前文所述设计,研制了电网电压跌落实验平台。按照前文上位机操作步骤进行实验测试,图 4 为实验三相电压跌落 50%、上位机设置自由模式 1.5 s、上位机的设置以及读取三相线电压有效值的情况,由图可知,实验平台上位机通信可靠,能够实现设计功能以及 LVRT 实验所要求的时间自由配置。图 5 为电压跌落至 50%、上位机设置持续时间 1.5 s 时 VSG 运行实验波形,图中 u_{ab} 、 u_{bc} 、 u_{ca} 为测试输出的三相线电压。

图 6 为三相电压跌落至 20%、上位机设置持

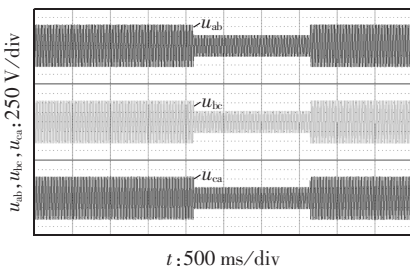


图 5 三相电压跌落至 50% 的实验波形
Fig.5 Experimental waveforms of three-phase voltage drop to 50%

续时间 2 s 时的实验波形。图 7 为三相电压跌落至 0%、上位机设置持续时间 140 ms 时的实验波形。由图可知,本文设计的电网电压跌落实验平台,能够自由设置 LVRT 实验过程中跌落规格电压、故障持续时间,安全可靠地通过上位机操作实现,精确控制跌落电压持续时间。

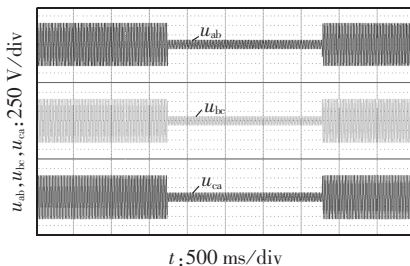


图 6 三相电压跌落至 20% 的实验波形
Fig.6 Experimental waveforms of three-phase voltage drop to 20%

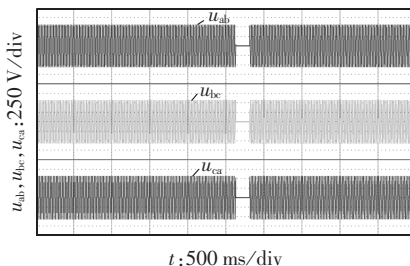


图 7 三相电压跌落至 0% 的实验波形
Fig.7 Experimental waveforms of three-phase voltage drop to 0%

图 8 为三相不对称电压跌落、上位机设置持续

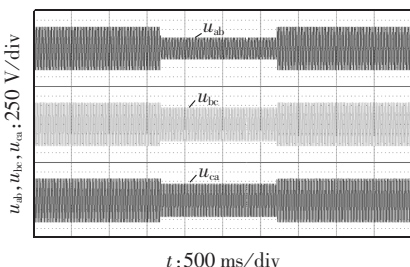


图 8 三相电压不对称跌落的实验波形
Fig.8 Experimental waveforms of asymmetrical three-phase voltage drop

时间 1.5 s 时的实验波形,由图可知,VSG 可以形成不对称故障电网电压,适用于新能源 LVRT 实验测试。

5 结语

本文提出一种基于 LabVIEW 上位机控制的变压器形式 VSG 设计方法。该方法采用 STM32F103 作为主控芯片控制 VSG,通过与上位机通信进行操作。本文分析了 VSG 的设计原理,研制了样机。实验结果表明,所设计的 VSG 安全、可靠,能以低成本的方式实现电网电压跌落故障模拟,可以灵活方便地进行操作,满足新能源发电中风力或光伏发电 LVRT 测试的要求。

参考文献:

- [1] 张雅静,郑琼林,马亮,等. 采用双环控制的光伏并网逆变器低电压穿越[J]. 电工技术学报,2013,28(12):136-141.
ZHANG Yajing,ZHENG Trillion Q,MA Liang,et al. LVRT of photovoltaic grid-connected inverter adopting dual-loop control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(12):136-141.
- [2] 李生虎,安锐,许志峰,等. 混合风电场中 PMSG 协助感应发电机低电压穿越[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):21-27.
LI Shenghu,AN Rui,XU Zhifeng,et al. Coordinated LVRT of IG and PMSG in hybrid wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):21-27.
- [3] 张明锐,黎娜,王之馨. 新型永磁风电系统的低电压穿越性能研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):128-134.
ZHANG Mingrui,LI Na,WANG Zhixin. LVRT ability of PMSG wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(1):128-134.
- [4] 章心因,胡敏强,吴在军,等. 基于 VSC-HVDC 的风力发电系统低电压穿越协调控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):138-143.
ZHANG Xinyin,HU Mingqiang,WU Zaijun,et al. Coordinated LVRT control of wind power generation system based on VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):138-143.
- [5] 胡书举,李建林,梁亮,等. 风力发电电压跌落发生器研究综述[J]. 电力自动化设备,2008,28(2):101-103.
HU Shuju,LI Jianlin,LIANG Liang,et al. Review of voltage sag generator for wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(2):101-103.
- [6] ZHENG Fei,ZHANG Junjun,DING Mingchang. A novel voltage sag generator for low voltage ride-through testing of grid-connected PV system[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering. Zhangjiajie,China:IEEE,2012:136-140.
- [7] 张军军,郑飞,黄晶生,等. 用于光伏低电压穿越测试的电压跌落发生器设计与试验[J]. 电力系统自动化,2014,38(19):108-112.
ZHANG Junjun,ZHENG Fei,HUANG Jingsheng,et al. Design and test of voltage sag generators for low voltage ride-through test of photovoltaic systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(19):108-112.
- [8] YANG Yongheng,BLAABJERG F,ZOU Zhixiang. Benchmarking of voltage sag generators[C]//IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal,Canada:IEEE,2012:943-948.
- [9] 徐海亮,章伟,胡家兵,等. 可编程电网故障模拟电源的设计[J]. 电工技术学报,2012,27(10):91-97.
XU Hailiang,ZHANG Wei,HU Jiabing,et al. Design of a programmable grid-fault emulating power supply[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(10):91-97.
- [10] ZENG Rong,NIAN Heng,ZHOU Peng. A three-phase programmable voltage sag generator for low voltage ride-through capability test of wind turbines[C]//2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Atlanta,USA:IEEE,2010:305-311.
- [11] 杜新,朱凌,孟建辉,等. 电压跌落发生器实验系统设计与实现[J]. 电力电子技术,2013,47(7):106-108.
DU Xin,ZHU Ling,MENG Jianhui,et al. Design and realization of the experimental system for voltage sag generator[J]. Power Electronics,2013,47(7):106-108.
- [12] 赵洪,曾嵘,年珩,等. 用于低电压穿越测试的电压跌落发生器研究[J]. 电力电子技术,2011,45(1):27-29.
ZHAO Hong,ZENG Rong,NIAN Heng,et al. Research on voltage sag generator for low voltage ride-through capability test of wind turbines[J]. Power Electronics,2011,45(1):27-29.
- [13] 胡书举. 一种新型风力发电电压跌落发生器的研制[J]. 大功率变流技术,2009(6):49-52.
HU Shuju. Development of a novel voltage sag generator for wind power system[J]. High Power Converter Technology,2009(6):49-52.
- [14] 何亮,张俊杰. 一种低穿现场测试用的电压跌落发生器的研制[J]. 电气自动化,2015,37(2):106-114.
HE Liang,ZHANG Junjie. Development of a voltage sag generator for LVRT field test[J]. Electrical Automation,2015,37(2):106-114.
- [15] 中国电力科学研究院. 风电场接入电网技术规定(修订版)[R]. 北京:国家电网公司,2009.
- [16] 国家能源局. 风电机组低电压穿越能力测试规:NB/T 31051—2014[S]. 北京:新华出版社,2014.
- [17] 中国电力科学研究院. 光伏电站接入电力系统技术规定:GB/T 19964—2012[S]. 北京:国家电网公司,2012.
- [18] 国家能源局. 光伏电站低电压穿越检测技术规程:NB/T 32005—2013[S]. 北京:中国电力出版社,2013.

作者简介:



周 稳

周 稳(1989—),男,湖南长沙人,硕士研究生,主要研究方向为新能源微电网(E-mail:zhouwen403159758@163.com);

毕大强(1973—),男,吉林敦化人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统主设备继电保护、电力电子技术电力系统中的应用;

戴瑜兴(1956—),男,湖南长沙人,教授,博士,主要研究方向为大功率变流技术与逆变装备、新能源微电网技术及应用、数控技术与装备信息化。

Design of VSG testbed for LVRT of renewable energy

ZHOU Wen¹,BI Daqiang²,DAI Yuxing¹,CHENG Linyu¹,XIONG Shuhua¹

(1. Zhejiang Province Engineering Laboratory of Electrical Digital Design Technology,Wenzhou University,
Wenzhou 325035,China;2. State Key Lab of Power Systems,Department of Electrical Engineering,
Tsinghua University,Beijing 100084,China)

Abstract: A method of transformer-type VSG(Voltage Sag Generator) design based on the LabVIEW control system is proposed for the LVRT(Low Voltage Ride Through) test and the design principle of the VSG testbed is analyzed. The control of communication between the supervisory computer and the local VSG controller is designed by LabVIEW and the VSG control system adopts STM32F103 as its master control chip. The main structure of VSG includes tapped transformer,relay and current-limiting resistor. In order to meet the requirements of LVRT test,the developed testbed operates the VSG safely and reliably via the supervisory computer,sets the voltage sag duration accurately,and simulates the grid fault voltage with different drop depths. The experimental results validate the effectiveness and reliability of the designed VSG testbed.

Key words: voltage sag generator; communication; control; LabVIEW; low voltage ride through; renewable energy resources

(上接第 106 页 continued from page 106)

作者简介:



张程熠

张程熠(1991—),女,浙江宁波人,硕士研究生,主要研究方向为新能源发电预测与微电网能量管理(**E-mail**:zcyee@zju.edu.cn);
唐雅洁(1993—),女,湖南长沙人,硕士研究生,主要研究方向为微电网能量管理(**E-mail**:tyj@zju.edu.cn);
李永杰(1989—),男,山东东营人,博

士研究生,主要研究方向为电力系统小干扰稳定分析与控制(**E-mail**:yongjieee@zju.edu.cn);
高 强(1985—),男,山西稷山人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统调控运行(**E-mail**:gaoqiang242@163.com);
江全元(1975—),男,湖北黄冈人,教授,博士,主要研究方向为电力系统稳定与控制、电力系统高性能计算、电力系统最优化(**E-mail**:jqy@zju.edu.cn)。

Photovoltaic power forecast based on neural network with a small number of samples

ZHANG Chengyi¹,TANG Yajie¹,LI Yongjie¹,GAO Qiang²,JIANG Quanyuan¹

(1. College of Electrical Engineering,Zhejiang University,Hangzhou 310027,China;
2. Power Dispatch and Control Center of State Grid Zhejiang Electric Power Company,Hangzhou 310007,China)

Abstract: Since the conventional short-term PV(PhotoVoltaic) power forecast based on neural network normally needs a large number of samples for training,it is not suitable for the newly-built PV station with insufficient historical data,for which,a method of PV power forecast based on dual-layer neural network is proposed for a small number of samples. The conventional single-layer neural network is divided into two layers according to the decoupling characteristics of different influencing factors of PV generation and each layer has a simplified structure. Instead of multi-step forecasting,single-step forecasting is adopted to lower the input and output dimensions of neural network. Based on the statistical analysis,the weather factors are effectively integrated into the forecast model to simplify the mapping between input and output. Practical data are applied to train and verify the proposed model and results show that,the proposed method can effectively reduce the demand of training samples while guarantee the forecast accuracy.

Key words: photovoltaic generation; short-term power forecast; a small number of samples; neural networks; single-step prediction