

宁夏光伏电站模型参数对电网 安全稳定性的影响

焦 龙

(宁夏电力能源安全重点实验室, 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750011)

摘 要: 通过开展光伏电站的等值建模、参数辨识、模型评价的体系研究, 为宁夏电网开展光伏电站模型参数测试业务提供完备的技术储备, 为包含光伏发电的宁夏电网安全稳定分析和运行控制提供了基础模型和数据支撑, 可广泛应用于方式计算、运行规划、事故分析及反措制定等方面, 具有广阔的推广应用前景和实用价值。

关键词: 光伏电站; 安全稳定; 参数辨识; 模型参数测试

中图分类号: TM743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-3643(2019)04-0015-07

有效访问地址: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2019.04.003>

Influence of model parameters of photovoltaic power station on the security and stability of Ningxia power grid

JIAO Long

(Ningxia Key Laboratory of Electric Energy Security, Power Research Institute of State Grid Ningxia
Electric Power Co., Ltd., Yinchuan Ningxia 750011, China)

Abstract: Through the systematic study of equivalent modeling, parameter identification and model evaluation of photovoltaic power stations, a complete technical reserves will be provided for Ningxia power grid to carry out parameter testing of photovoltaic power stations. It provides the basic model and data support for safety stability analysis and operation control of Ningxia power grid including photovoltaic power generation, which can be widely used in mode calculation, operation planning, accident analysis and countermeasures formulation, and has broad application prospects and practical value.

Keywords: photovoltaic power station; safety and stability; parameter identification; parameter testing of model

DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2019.04.003

收稿日期: 2019-04-02

作者简介: 焦龙(1984), 男, 工程硕士, 从事电力系统仿真计算与系统试验工作。

宁夏电网的新能源装机规模不断增加,截止 2018 年底,新能源装机达 18.3 GW,装机占比超过 43%;2018 年 10 月 1 日,光伏最大出力达到 5.54 GW,占当时全网总发电比例的 42%。如此大规模光伏电站接入电网后,光伏发电本身所特有的季节、昼夜的功率输出波动性给电网的安全稳定运行带来了新的挑战,主要体现在频率稳定、电压稳定、功角稳定、电能质量等方面^[1]。

1 研究现状及问题

国外最早开展光伏电站机电暂态建模技术研究的机构是美国通用电气(GE)公司,2009 年,GE 公司建立了光伏电站动态模型,随后该模型不断完善,至 2012 年,美国西部电力系统协调委员会(WECC)和美国电力科学研究院(EPRI)联合研究,发布通用化的光伏电站机电暂态模型结构^[2]。与此同时,德国等欧洲国家也对光伏发电的机电暂态仿真分析模型开展研究,还提出一系列光伏发电模型验证标准^[3-5]。研究人员虽然已经初步建立了太阳能光伏发电系统的基础模型,并对太阳能光伏发电系统的运行特性进行了深入的研究,但由于缺乏实际运行经验的积累,尚未深入开展太阳能发电模型与参数的辨识技术研究,现有的太阳能发电模型与参数尚不能满足不同精度要求的太阳能发电系统接入电网后电力系统仿真计算需要^[6-8]。

国内在光伏发电建模方面起步较晚,但借鉴国外已有研究成果,以中国电力科学研究院为代表的国内科研机构,开展了光伏发电系统的电磁暂态模型和机电暂态模型研究,开展了光伏发电

参数辨识及模型验证相关技术研究,开发具有自主知识产权的光伏发电参数辨识及模型验证软件,制定了相关标准,旨在为光伏电站并网评价、电力系统安全稳定分析和运行控制提供更为准确的光伏发电机电暂态模型,然而,对于光伏发电模型与参数准确性对电力系统安全稳定分析结果的影响尚缺乏研究。

2 原理

2.1 光伏电站模型描述

光伏电站的模型结构如图 1 所示,包括光伏方阵模型、厂站级控制模型、有功/无功控制环节、故障穿越控制及保护环节、输出电流计算环节、等值集电线路和变压器模型。光伏方阵模型是能量输入源,模拟辐照度扰动时的功率输出特性。逆变器模型描述电网故障情况下的光伏电站的暂态特性,逆变器模型的响应时间一般为数十毫秒到数秒。厂站级控制系统模型模拟光伏电站响应上级调度指令时的动态响应特性,厂站级控制模型的响应时间一般为数十秒到数分钟^[9]。

2.2 厂站级控制系统建模技术

当光伏电站参与电网调压和调频时,需要搭建厂站级控制模型,主要包括厂站级有功功率控制和无功电压控制。有功功率控制根据光伏电站最大输出功率水平以及并网点频率确定有功功率输出指令;无功电压控制根据并网点电压水平确定无功指令。

正常运行状态时,光伏电站有功控制系统响应上级调度指令,结合当前有功输出值以及预测

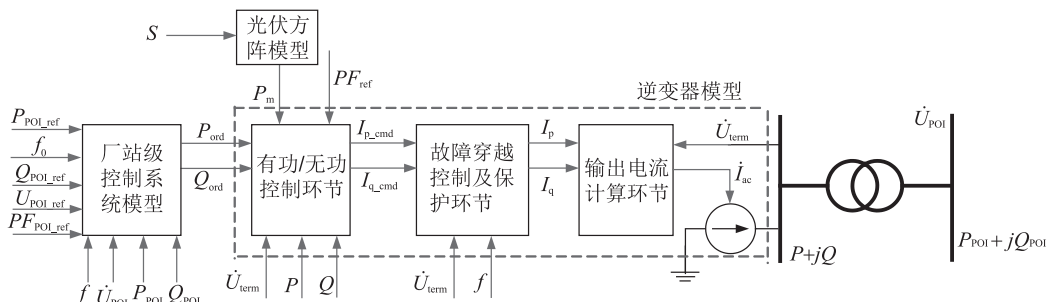


图 1 光伏电站暂态等值模型

值,同时控制电站有功功率升率/降率,得到各发电单元的参考值,并通过站内通讯下发到发电单元的无线网关 CPE,由无线网关 CPE 二次计算后分配到各逆变器,逆变器得到控制指令后执行。

无功控制系统根据上级调度指令,可以工作在恒电压/恒无功/恒功率因数控制等控制模式。与有功控制系统相类似,站级控制系统计算得到各发电单元的无功参考值,通过站内通讯下发到无线网关 CPE,由无线网关 CPE 二次计算后转发至各逆变器^[10]。

光伏电站的功率控制系统模型如图 2 所示,模型通过控制标志位的选择来模拟光伏电站的工作模式,通过改变控制器参数改变系统的响应速度。

2.3 系统辨识在电力系统中的应用

电力系统按辨识对象的复杂程度可分为两类:单个元件的参数辨识和复杂系统的动态等值。对于复杂的、高阶的电力系统,一般难以直接辨识其原型,通常用降阶的模型系统来动态拟合原型系统,即动态等值。表征电力系统的参数也可分为两类:第一类是结构参数,指网络参数、机电设备发电机等参数;第二类是运行参数,指功率、电压、功角等电气量。系统辨识的对象主要是针对结构参数,而对运行参数的估计就构成了状态估计^[10]。

在参数辨识中,要根据用途来确定模型的类

型,在分析计算中多数模型采用连续系统模型,可为时域也可为频域,以状态空间方程或传递函数表示。在实时控制中,为便于与计算机连接,有时用离散系统模型,以差分方程表示。

电力系统一些动态机理是已知的,但不完全,可按物理机理先列出数学模型,再用系统辨识技术求出参数。这种灰箱建模的方法是电力系统辨识的一个特点。

电力系统模型参数辨识主要是确定四大参数,即同步发电机参数、励磁系统及其调节器参数、原动机及其调节器参数、电力负荷参数。电力系统参数辨识也主要是围绕这四大参数开展研究,此外还包括动态等值建模、输电线路建模、动力系统建模,以及电力系统参数误差、系统不良数据辨识等。在辨识算法方面,近年来学者们尝试用新的方法和技术来解决电力系统参数辨识问题,以提高计算速度和精度,实现在线辨识,保证获得较好的辨识结果,如人工智能辨识法、模糊聚类法、小波网络系统辨识法、PMU 技术、云计算技术等^[11]。

人工智能方法开展电力系统参数辨识研究,有学者提出了一种应用混沌优化方法进行电力系统静态负荷模型参数辨识的新策略,利用混沌变量的随机性、规律性、遍历性寻优,能够克服传统的基于梯度寻优的辨识方法容易陷入局部极小点的不足^[12];或选择总体测辨法为突破口,针对总

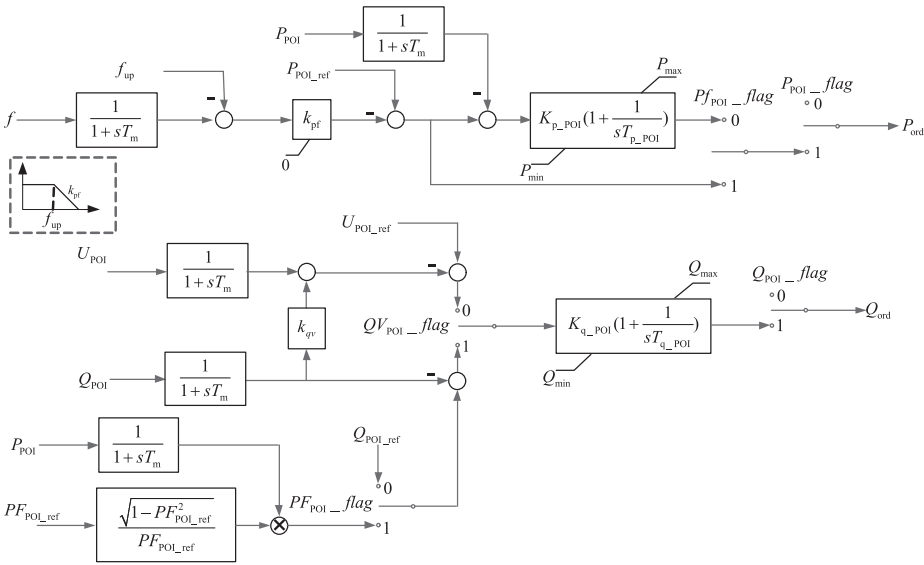


图 2 厂站级功率控制模型

体测辨法对模型选择和寻优方法的依赖性,将蚁群算法引入负荷模型的参数辨识过程,提高了辨识精度与辨识参数的合理性^[13]。近期,有学者采用了遗传算法,在电力系统频率特性、负荷参数、PSS 标准模型参数的辨识方面开展了研究^[14];同时,针对电力系统的参数误差和不良数据开展检测和辨识研究,其中引入了模糊聚类的基本理论及方法,分析电力系统不良数据的模糊性问题,将实时数据预处理技术与综合模糊聚类法相结合,构建了一种新型的不良数据辨识系统;或提出利用基于模式匹配的状态估计算法以及基于专家系统的方法,识别电力系统中与变电站自动化系统及调度自动化相关的不良数据。有学者研究了电力系统动态等值的辨识建模方法,提出了利用相量测量单元(PMU)记录电网的实时动态信息,实现对输电线路、发电机模型、励磁系统及调速器模型参数的辨识^[15]。

随着电力系统规模的扩大,电力系统的建模与参数辨识已经向广域电力系统方向开展深入研究。参数辨识的数据来源已不再是单一来源,可以取自 SCADA 系统、故障信息系统、PMU/WAMS 系统等,已有学者提出充分地、综合地利用现有的各种数据,开展电力系统参数辨识和建模工作^[15]。此外,随着可再生能源发电技术的发展,风力发电、光伏发电系统建模与参数辨识也逐渐开始引起重视,为可再生能源发电及接入电网提供可靠的依据。

3 光伏建模实测

3.1 电站信息

接入电网方式:110 kV,单回线送出。结构如图 3 所示。

3.2 测试方法及相关条件

确认光伏电站各机组稳定运行,快速频率响应投入,监控 AGC 功率调节开环(不向能量管理平台开出指令)。

3.2.1 定有功功率控制

设定光伏电站初始无功功率 $Q_c < 0.1 Q_{max}$ 且 $Q_L < 0.1 Q_{max}$ (Q_{max} 为光伏电站最大无功出力),初始有功功率为 $90\% P_N$ (P_N 为光伏电站额定功率);按照图 4 的设定曲线控制光伏电站的有功功率参考值;同步记录整个试验过程中控制指令和光伏电站有功功率。

分别设定光伏电站初始无功功率 $Q_c > 0.5 Q_{max}$, $Q_L > 0.5 Q_{max}$,重复上述有功功率控制过程。

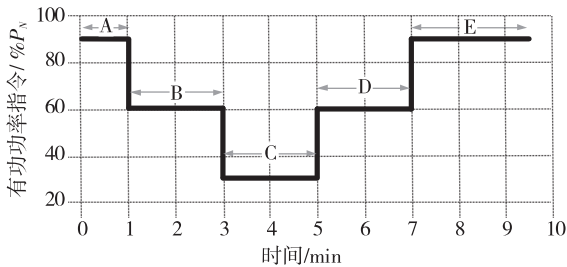


图 4 有功功率控制曲线

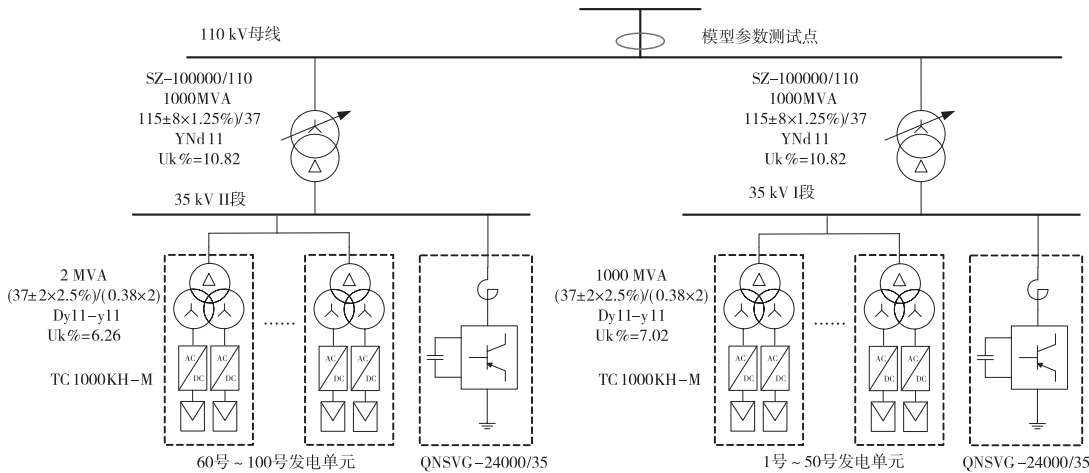


图 3 200 MW 光伏电站一次接线

3.2.2 定电压控制

设定光伏电站初始有功功率 $50\% P_N$, 初始无功功率 $Q_c < 0.1 Q_{\max}$ 且 $Q_L < 0.1 Q_{\max}$; 按照图 5 的设定曲线控制光伏电站的并网点电压参考值; 同步记录整个试验过程中控制指令和光伏电站并网点电压、有功功率、无功功率。

分别设定光伏电站初始有功功率 $20\% P_N$, $80\% P_N$, 重复上述电压控制过程。

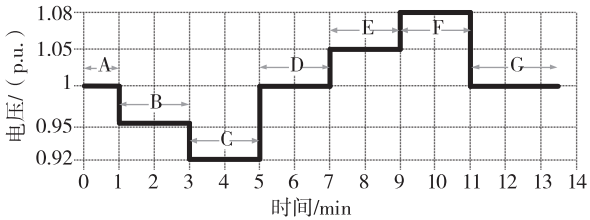


图 5 电压控制曲线

4 光伏电站模型验证

4.1 定有功功率控制

(1) 定有功控制 $Q_0 = 0$ Mvar, 结果见图 6、表 1、表 2。

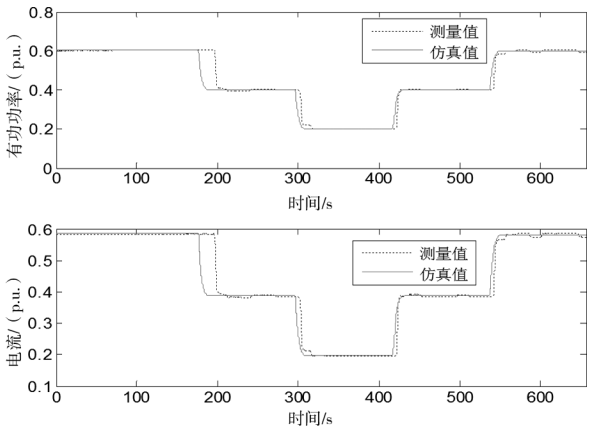


图 6 定有功功率控制响应曲线 ($Q_0 = 0$ Mvar)

表 1 实测与仿真数据的功率误差 ($Q_0 = 0$ Mvar)

区间	偏差类型	有功功率控制指令阶跃/(p. u.)			
		0.6→0.4	0.4→0.2	0.2→0.4	0.4→0.6
区间 A(稳态)	最大偏差	0.001 2	0.000 6	0.001 5	
	平均偏差	0.000 9	0.000 2	0.001 1	
区间 B(暂态)	平均偏差	0.073 8	0.051 9	0.054 8	

续 表

区间	偏差类型	有功功率控制指令阶跃/(p. u.)			
		0.6→0.4	0.4→0.2	0.2→0.4	0.4→0.6
区间 B(稳态)	最大偏差	0.035 1	0.017 3	0.048 5	
	平均偏差	0.019 4	0.003 9	0.014 3	
整体	加权偏差	0.034 1	0.017 3	0.024 5	

表 2 实测与仿真数据的电流误差 ($Q_0 = 0$ Mvar)

区间	偏差类型	有功功率控制指令阶跃/(p. u.)			
		0.6→0.4	0.4→0.2	0.2→0.4	0.4→0.6
区间 A(稳态)	最大偏差	0.002 4	0.003 2	0.002 9	
	平均偏差	0.001 8	0.002 8	0.002 4	
区间 B(暂态)	平均偏差	0.069	0.051 7	0.054 4	
区间 B(稳态)	最大偏差	0.031 6	0.018 6	0.047 3	
	平均偏差	0.015 6	0.002 5	0.013 9	
整体	加权偏差	0.031 3	0.018 5	0.024 6	

(2) 定有功控制 $Q_0 = 20$ Mvar, 结果见图 7、表 3、表 4。

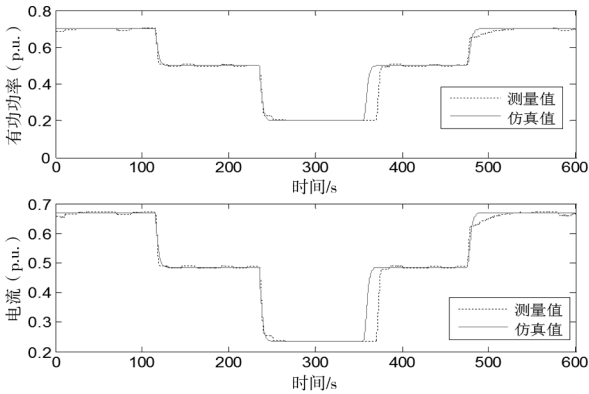


图 7 定有功功率控制响应曲线 ($Q_0 = 20$ Mvar)

表 3 实测与仿真数据的功率误差分析

区间	偏差类型	有功功率控制指令阶跃/(p. u.)			
		0.7→0.5	0.5→0.2	0.2→0.5	0.5→0.7
区间 A(稳态)	最大偏差	0.003 5	0.004	0.004 4	
	平均偏差	0.003 1	0.003 5	0.004	
区间 B(暂态)	平均偏差	0.024 4	0.058 5	0.017 6	
区间 B(稳态)	最大偏差	0.132 5	0.143 5	0.126 8	
	平均偏差	0.073 5	0.024 4	0.059 9	
整体	加权偏差	0.039 9	0.025 2	0.033 4	

表 4 实测与仿真数据的电流误差

区间	偏差类型	有功功率控制指令阶跃/(p.u.)			
		0.7→0.5	0.5→0.2	0.2→0.5	0.5→0.7
区间 A(稳态)	最大偏差	0.003 5	0.003 1		0.003 5
	平均偏差	0.003	0.002 6		0.003
区间 B(暂态)	平均偏差	0.021 8	0.044 2		0.015
区间 B(稳态)	最大偏差	0.121 6	0.127 4		0.116
	平均偏差	0.067 4	0.024 3		0.054 7
整体	加权偏差	0.036 6	0.021 6		0.030 1

4.2 定电压控制

(1)定电压控制 $P_0=40\text{ MW}$,结果见图 8、表 5、表 6。

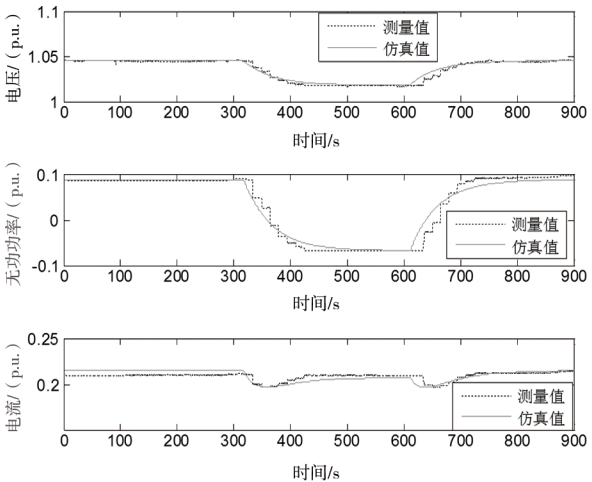


图 8 定电压控制响应曲线 ($P_0=40\text{ MW}$)

表 5 实测与仿真数据的无功功率误差分析
——定电压控制 ($P_0=40\text{ MW}$)

区间	偏差类型	电压控制指令阶跃/(p.u.)	
		1.045→1.018	1.018→1.045
区间 A(稳态)	最大偏差	0.003 2	0.012 1
	平均偏差	0.002 8	0.002 3
区间 B(暂态)	平均偏差	0.006 2	0.016 2
区间 B(稳态)	最大偏差	0.017 3	0.019 2
	平均偏差	0.008 7	0.009 5
整体	加权偏差	0.000 9	0.001 4

表 6 实测与仿真数据的电流误差分析 ($P_0=40\text{ MW}$)

区间	偏差类型	电压控制指令阶跃/(p.u.)	
		1.045→1.018	1.018→1.045
区间 A(稳态)	最大偏差	0.003 5	0.006 2
	平均偏差	0.003	0.003 1
区间 B(暂态)	平均偏差	0.002 3	0.002
区间 B(稳态)	最大偏差	0.007 6	0.003 4
	平均偏差	0.005	0.000 3
整体	加权偏差	0.003 3	0.001 3

(2)定电压控制 $P_0=100\text{ MW}$,结果见图 9、表 7、表 8。

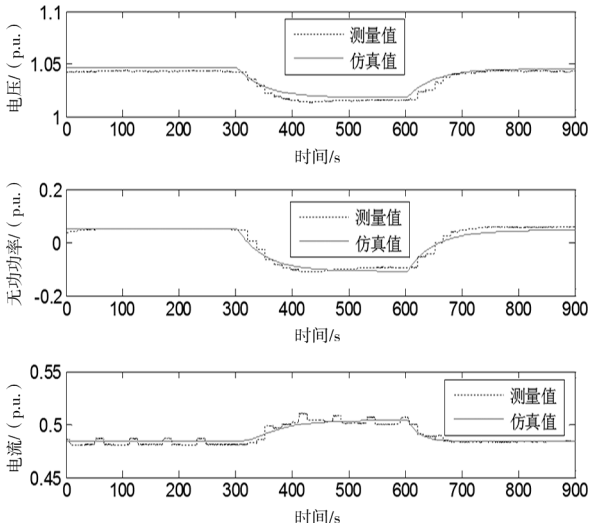


图 9 定电压控制响应曲线 ($P_0=100\text{ MW}$)

表 7 实测与仿真数据的误差无功功率分析
——定电压控制 ($P_0=100\text{ MW}$)

区间	偏差类型	电压控制指令阶跃/(p.u.)	
		1.045→1.018	1.018→1.045
区间 A(稳态)	最大偏差	0.006 7	0.012 9
	平均偏差	0.006 2	0.012 2
区间 B(暂态)	平均偏差	0.007 3	0.004 1
区间 B(稳态)	最大偏差	0.018 7	0.021 3
	平均偏差	0.006 8	0.017 5
整体	加权偏差	0.002 7	0.010 2

表 8 实测与仿真数据的电流误差分析($P_0=100\text{ MW}$)

区间	偏差类型	电压控制指令阶跃/(p. u.)	
		1.045→1.018	1.018→1.045
区间 A(稳态)	最大偏差	0.003 7	0.003 1
	平均偏差	0.003 4	0.002 7
区间 B(暂态)	平均偏差	0.003 5	0.002 7
区间 B(稳态)	最大偏差	0.010 6	0.007 1
	平均偏差	0.001 6	0.000 4
整体	加权偏差	0.002 1	0.001 1

通过光伏电站开展的定有功功率控制和定电压控制模型参数现场测试数据与光伏电站模型参数仿真数据对比,可以看出光伏电站模型性能平稳,模型参数测试结果满足模型验证要求。

5 结 论

(1)基于光伏电站模型参数实测数据,研究光伏电站模型参数变化与宁夏电网安全稳定主要指标的灵敏度;研究光伏电站模型参数变化对电网安全稳定计算结果影响的定量分析方法;结合宁夏电网实际需求,定量评估光伏电站模型参数对宁夏电网安全稳定影响。

(2)通过光伏电站开展的定有功功率控制和定电压控制模型参数现场测试数据与光伏电站模型参数仿真数据对比,可以看出光伏电站模型性能平稳,模型参数测试结果满足模型验证要求。

(3)结合宁夏地区光资源特性和地理因素,提出适用于宁夏电网的光伏电站模型参数测试方法;研究基于实测与仿真相结合的光伏电站模型验证方法和模型准确性评价指标。

参考文献

[1] 唐西胜,苗福丰,齐智平,等. 风力发电的调频技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(25):4304-4314.

[2] DUVAL J, MEYER B. Frequency behavior of grid with high penetration rate of wind generation [C]//2009 IEEE Buchares in Power Technology. Bucharest: IEEE, 2009:1-6.

[3] MARGARIS I D, PAPATHANASSIOU S A. Frequency control in autonomous power systems with high wind power penetration [J]. IEEE Trans on Sustainable Energy,2012,3(2):189-199.

[4] CHANG-CHIEN L R, LIN W T, YIN Y C. Enhancing frequency response control by DFIGs in the high wind penetrated power systems [J]. IEEE Trans on Power Systems,2011,26(2):710-718.

[5] VIDYANANDAN K V, NILANJAN S. Primary frequency regulation by deloaded wind turbines using variable droop [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(2):837-846.

[6] MANOJ Datta, TOMONOBU S, ATSUSHI Y, et al. A Frequency-Control Approach by Photovoltaic Generator in a PV-Diesel Hybrid Power System [J]. IEEE Trans on Energy Conversion,2011,26(2):559-571.

[7] ZARINA P P, MISHRA S, SEKHAR P C. Photovoltaic systems based transient mitigation and frequency regulation[C]// 2012 Annual IEEE India Conference (INDICON 2012), December 7-9:1245-1249.

[8] BRAUN M, STETZ T, REIMANN T, et al. Optimal reactive power supply in distribution networks - technological and economic assessment for PV systems[C]// European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 2009:3872-3881.

[9] GEIBEL D. Multifunctional photovoltaic inverter systems - energy management and improvement of power quality and reliability in industrial environments[C]// IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, CA, 2009:3881-3888.

[10] CRACIUN B I, MAN E A, MUREASAN V A, et al. Improved voltage regulation strategies by PV inverters in LV rural networks [C]// IEEE Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Aalborg, 2012: 775-781.

[11] 田新首,王伟胜,迟永宁,等. 基于双馈风电机组有效储能的变参数虚拟惯量控制[J]. 电力系统自动化,2015,39(5):19-26.

[12] 刘彬彬,杨健维,廖凯,等. 基于转子动能控制的双馈风电机组频率控制改进方案[J]. 电力系统自动化,2016,40(16):17-22.

[13] 胡泽春,夏睿,吴林林,等. 考虑储能参与调频的风储联合运行优化策略[J]. 电网技术,2016,40(8):2251-2257.

[14] 李欣然,黄际元,陈远扬,等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016,44(7):145-153.

[15] 李立成,叶林. 变风速下永磁直驱风电机组频率-转速协调控制策略[J]. 电力系统自动化,2011,35(17):26-31.