

DOI: 10.7667/PSPC170419

大型光伏电站并网适应性分析

李响¹, 范建业², 曹丽璐³, 王龙¹, 胡天彤¹, 吴天恒⁴

(1. 郑州航空工业管理学院, 河南 郑州 450015; 2. 中国电力技术装备有限公司, 北京 100052;
3. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000; 4. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 为研究大型光伏电站并网适应性, 以某地区三个百兆级光伏电站并网工程为例, 根据该地区最大、最小负荷运行方式下的数据, 利用 DIgSILENT/Power Factory 软件, 在光伏电站不同出力条件下对电网的潮流大小、母线电压波动、安全性 $N-1$ 等方面进行仿真。依据相关导则要求, 对大型光伏电站并网时适应性进行研究分析。针对大型光伏并网时母线电压降低幅度过大的现象采取相应的补偿措施, 提高光伏电站并网适应性。该分析可对以后的工程提供参考。

关键词: 适应性; 光伏电站; 负荷; 电压; 潮流

Analysis on the adaptability of large-scale grid-connected PV station

LI Xiang¹, FAN Jianye², CAO Lili³, WANG Long¹, HU Tiantong¹, WU Tianheng⁴

(1. Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China; 2. China Electric Power Equipment and Technology Co., Ltd., Beijing 100052, China; 3. Xuji Group Corporation, Xuchang 461000, China; 4. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to analyze on the adaptability of the large-capacity grid-connected PV station, this paper takes the hundred-billion grade project in Mangya for example. According to the maximum and minimum load operation data of Mangya, the power flow, bus voltage fluctuation, and $N-1$ security are simulated by using DIgSILENT/Power Factory software. According to the guideline, the adaptability of large-scale grid-connected PV station is studied and analyzed. The compensation method is proposed to improve the phenomena that the bus voltage drop amplitude is too large when large-scale PV grid connection. The adaptability of large-scale grid-connected PV station is improved. The analysis provides a reference for other engineering.

This work is supported by Scientific and Technological Projects of Henan Province (No. 182102210112 and No. 172102210076).

Key words: adaptability; PV station; load; voltage; power flow

0 引言

光伏发电具有清洁高效、节能环保等特点^[1-2], 无论在世界还是中国的能源战略中都具有重要地位^[3-5]。大容量光伏电站并网将对电网的潮流和电压等产生很大影响^[6-8], 是阻碍光伏发电大规模发展的技术瓶颈之一^[9-11], 也是近年来国内外学者研究的重点和难点^[12-14]。

青海省日照时间长、日光透过率高、降雨量小, 太阳能资源十分丰富。“十二五”期间青海省大

力扶持光伏产业, 光伏建设与并网飞速发展。“十二五”末青海光伏发电装机达到 4 130 MW。

海西电网是青海西部电网的主力电网, 茫崖行委是海西地区的西部电网, 2015 年光伏安装容量为 600 MW, 占青海省光伏装机总容量的 15%, 2020 年总安装容量达到 1 200 MW。本文以茫崖行委地区的大型光伏电站并网为研究对象, 根据电网的基础数据和运行数据, 利用 DIgSILENT/Power Factory 软件, 以地区电网最大和最小负荷为背景, 从光伏电站出力变化角度, 对大乌斯、甘森、塔尔丁三个百兆级光伏电站的并网时潮流、电压、安全性等方面影响进行仿真。对照导则要求, 对三个百兆级光伏电站并网的母线电压和系统频率偏差以及系统电

基金项目: 河南省科技攻关项目 (182102210112; 172102210076); 河南省教育厅项目 (18B470013)

压、功角、频率、安全性等方面进行校验与分析,研究海西西部电网对大型光伏电站的消纳能力。通过实例,验证了仿真与分析的有效性。

1 现状电网与光伏电站接入

茫崖行委是海西电网西部电网的重要组成部分,2015年茫崖行委接入3个光伏电站:100 MW 大乌斯光伏电站、200 MW 甘森光伏电站、300 MW 塔尔丁光伏电站,共计容量600 MW。三个光伏电站接入海西电网如图1所示。

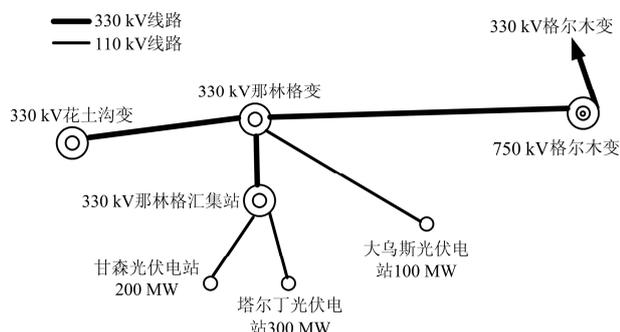


图1 光伏电站接入系统图

Fig. 1 Grid connected PV station

该地区的大型光伏电站并网时,受影响的变电站情况如下所述。

(1) 330 kV 那林格变电站

主变容量 1×240 MVA,格尔木—那林格330 kV线路型号为JL/LB20A-400,长度约为300.2 km,远期改接入750 kV柴达木变。

(2) 330 kV 花土沟变电站

主变容量 1×150 MVA,2015年建成投运,330 kV那林格—花土沟导线型号为JL/LB20A-240,长度约为187.4 km,至那林格变。

(3) 330 kV 格尔木变电站

变电容量最终为 2×150 MVA,现为 2×150 MVA。330 kV采用3/2接线,最终出线6回,现出线2回分别至乌兰变、盐湖变。

(4) 750 kV 格尔变电站

为西宁—日月山—乌兰—格尔木双回750 kV输电线路工程的重要组成部分,变电容量本期为 1×2100 MVA,750 kV出线2回,330 kV出线7回。

大乌斯光伏电站拟通过LGJ-400/110 kV接入330 kV那林格变,甘森和塔尔丁光伏电站拟共用一个330 kV汇集站升压到330 kV后接入330 kV那林格变,通过330 kV线路接入750 kV格尔木变电站后连入海西电网,最大负荷时,花土沟变、那格林变、750 kV格尔木变负荷分别为72、157、771 MW;

最小负荷时,花土沟变、那格林变、750 kV格尔木变负荷分别为35、132、383 MW。

2 光伏电站并网技术规定

2.1 电网电压质量与频率的要求

1) 电网电压质量的要求

大乌斯、甘森、塔尔丁三个百兆级光伏电站通过110 kV母线并网,通过330 kV变电站或者汇集站输送至电网,依据导则,电压质量应该满足:

(1) 大乌斯、甘森、塔尔丁光伏电站的110 kV连接点电压正、负偏差的绝对值之和不超过标称电压的10%^[15]。

(2) 在正常运行方式下,330 kV那林格变和330 kV汇集站的330 kV母线电压允许偏差为系统额定电压的0~+10%,即330~363 kV;事故运行方式下,330 kV那林格变和330 kV汇集站的330 kV母线电压为系统额定电压的-5%~+10%,即313.5~363 kV;330 kV那林格变和330 kV汇集站的110 kV母线电压在正常运行方式下,电压允许偏差为系统额定电压的-3%~+7%,即106.7~117.7 kV,事故后为系统额定电压的 $\pm 10\%$,即99~121 kV。

2) 电网频率的要求

由于大乌斯、甘森、塔尔丁光伏电站通过接入点电压等级均为110 kV通过750 kV格尔木变连接青海电网,电网容量一般较大。因此偏差值允许可按照 ± 0.2 Hz考虑^[16]。

2.2 安全稳定性

大型光伏并网,需考虑在大型光伏电站并网之后,将会改变原有电网的潮流大小、功率流向、频率及电压等^[17-18],因此,电力系统的静态和暂态稳定性会发生变化^[19]。根据我国《电力系统安全稳定导则》要求,光伏并网需满足功角、电压、频率稳定要求^[20]。

3 光伏电站出力变化对电压和负载影响分析

由于是远距离受电网络,那林格变和花土沟变受光伏电站影响较大,需分析茫崖行委最大、最小负荷运行方式下的光伏电站并网后对电网的影响。

3.1 电压影响

最大负荷时,三个光伏电站并网对各个变电站母线电压影响如图2所示。

那林格变330 kV母线和花土沟变330 kV母线受光伏电站影响较大:

1) 当光伏电站不出力时,由于线路负载率的降低,使母线电压明显上升,达到1.03 p.u。

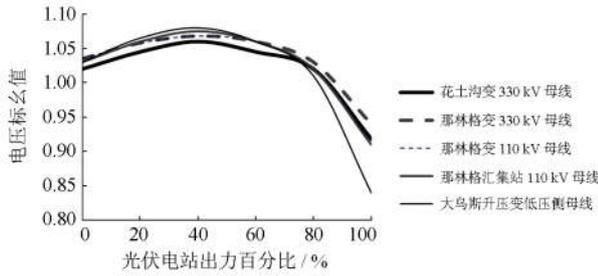


图 2 补偿前最大负荷时光伏电站出力对系统电压影响
Fig. 2 Influence of PV station output on system voltage at maximum load before compensation

2) 当光伏电站出力百分比达到 40%时, 母线电压增幅达到最大值, 约 1.07 p.u.。

3) 光伏电站出力继续增大, 无功损耗上升, 母线电压降低, 当出力最大时, 母线电压降至 0.92 p.u., 电压波动幅度达到 15%。

110 kV 母线也受到电站出力的很大影响: 那林格汇集站 110 kV 母线最大电压达 1.06 p.u., 最低电压为 0.92 p.u., 电压波动幅度达到 14%; 大乌斯光伏电站升压变低压侧母线最大电压达 1.07 p.u., 最低电压为 0.85 p.u., 电压波动幅度高达 22%, 将影响光伏电站的正常运行。

最小负荷时, 三个光伏电站并网对系统电压影响如图 3 所示。

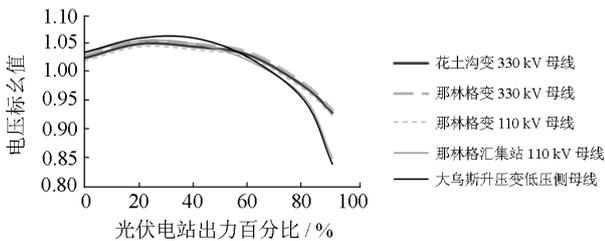


图 3 最小负荷时光伏电站出力对系统电压影响
Fig. 3 Influence of PV station output on system voltage at minimum load

当光伏电站出力不超过 30%时, 随着光伏电站出力增加, 负荷就地平衡, 各个变电站的母线将会上升。当光伏电站出力在 30%时, 母线电压为 1.06 p.u.; 如光伏电站出力继续大, 线路将倒送功率, 将使各个变电站母线电压降低, 其中, 那林格和花土沟变的低压侧母线电压降低最为严重, 当电站出力达到 84%时, 母线电压降低至 0.91 p.u., 电压波动幅度为 15%。

因此, 高、低压母线电压受光伏电站出力影响

较大, 如不装设无功补偿装置将不能保障光伏电站的正常运行。

3.2 负载影响

在最大和最小负荷时, 三个光伏电站并网对线路和主变负载影响如图 4、图 5 所示。

随着光伏电站出力增大, 线路和变压器负载率呈现先降后升的规律, 当电站出力与接入主变低压侧所带负荷相当时, 主变负载率最低。

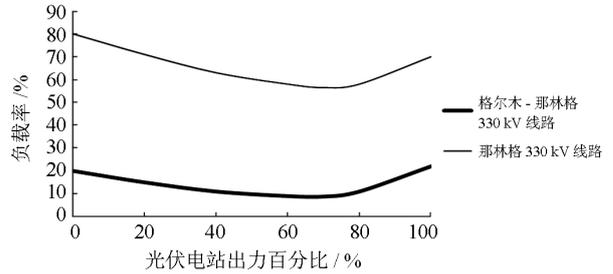


图 4 补偿前最大负荷时光伏电站出力对负载率影响
Fig. 4 Influence of PV station output on load rate at maximum load before compensation

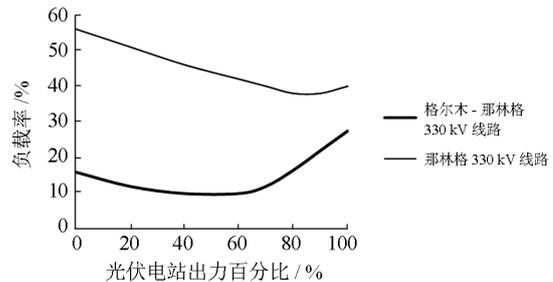


图 5 最小负荷时光伏电站出力对负载率影响
Fig. 5 Influence of PV station output on load rate at minimum load

4 无功补偿对并网运行的影响分析

为保证电网正常运行, 需要在两个地点装设无功补偿装置:

- 1) 大乌斯光伏电站升压变低压侧自动调节容性无功补偿装置 3×4 Mvar。
- 2) 那林格光伏电站汇集站低压侧自动调节的感性、容性无功补偿装置分别为 2×12 Mvar、12×8 Mvar。

补偿后, 光伏电站对电网电压的影响如图 6、图 7 所示。

由于那林格和花土沟 330 kV 变电站主要为受端电网, 无功补偿对线路负载率改变并不大, 对母线电压改善有比较明显的影响, 经补偿后的电网各节点电压能维持在 1.015~1.055 p.u., 电压波动幅度

为 4%, 符合标准要求。

线路和主变的负载随光伏电站出力变化如图 8、图 9 所示。

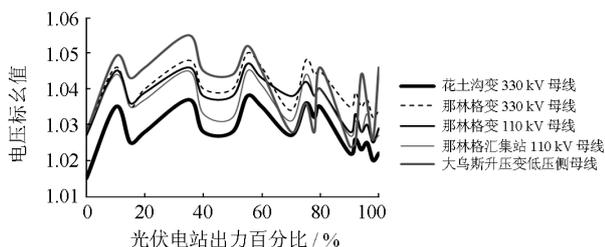


图 6 补偿后最大负荷时光伏电站出力对系统电压影响

Fig. 6 Influence of PV station output on system voltage at maximum load after compensation

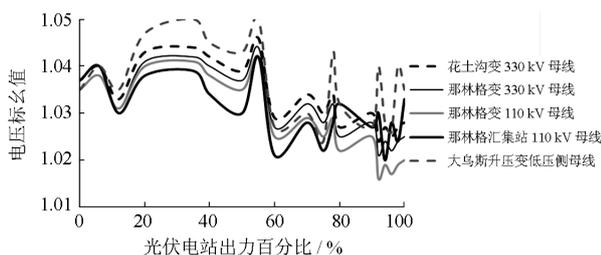


图 7 补偿后最小负荷时光伏电站出力对系统电压影响

Fig. 7 Influence of PV station output on system voltage at minimum load after compensation

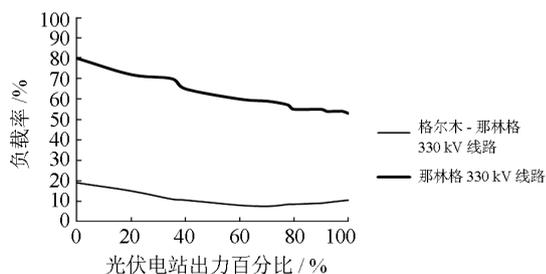


图 8 补偿后最大负荷时光伏电站出力对负载率影响

Fig. 8 Influence of PV station output on load rate at maximum load after compensation

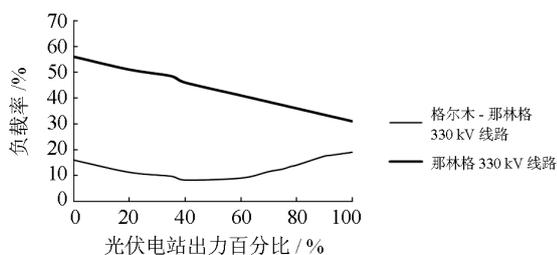


图 9 补偿后最小负荷时光伏电站出力对负载率影响

Fig. 9 Influence of PV station output on load rate at minimum load after compensation

对比补偿前, 各线路及变压器变负载率有所变化, 但均不会过载。

5 安全性及接纳能力分析

5.1 N-1 安全校验

主变和线路 N-1 安全校验: 330 kV 花土沟变通过那林格-花土沟 330 kV 线路接入那林格变, 那林格通过格尔木-那林格 330 kV 线路接入格尔木变, 格尔木-那林格 330 kV 线路和那林格-花土沟 330 kV 线路均为单回线路, 因此, 无法通过线路 N-1 安全校验。330 kV 那林格变主变只有 1 台, 亦不能满足主变 N-1 安全校验, 考虑未来光伏电站容量进一步增加及安全、经济性要求, 可在未来规划时再扩建。

5.2 就地接纳能力分析

那林格变 110 kV 侧可接入的最大光伏电站安装容量主要受主变容量的限制, 并与负荷水平密切相关, 2015 年那林格变主变容量为 240 MVA, 最小负荷约 130 MW。假定大乌斯光伏电站出力持续增加, 到光伏电站出力 346 MW 时, 那林格变满载, 建议那林格变 110 kV 侧安装的光伏总容量不宜大于 346 MW。

5.3 电网接纳能力分析

茫崖地区电网是海西西部电网的重要组成部分, 在光伏电站接入之前, 需要满足当地负荷需求。茫崖地区电网属于受端电网, 受电通道主要为 330 kV 断面。当接入光伏电站的容量逐步增大, 在满足受端电网的负荷需求外, 过剩的电力将通过 330 kV 断面外送, 茫崖地区电网变成送端电网。而海西西部电网网架结构较为薄弱, 330 kV 变电站布点少, 可接纳的光伏容量有限, 因此, 网架结构与变电站容量成为制约海西西部电网接纳光伏能力的重要因素。

若光伏接入容量保持现状不变, 装设无功补偿装置后, 海西西部电网能够消纳。考虑到 2020 年底, 甘森二期 600 MW 将投入运行, 茫崖地区电网光伏接入容量为 1 200 MW, 即使 330 kV 那林格变扩建, 也难以满足光伏电站的接入需求。因此, 为了增加海西西部电网的接纳能力, 在将 330 kV 那林格扩建并改接至 750 kV 柴达木变的同时, 需新建 330 kV 甘森变接纳甘森光伏电站一二期 800 MW 装机容量, 变电容量不宜低于 480 MW, 通过 330 kV 线路直接接入 750 kV 格尔木变。为确保光伏充分接纳, 330 kV 甘森变可为周边地区的资源开发提供可靠的电力保障, 兼顾冷湖地区的工业用电, 以切实缓解电力供给相对滞后对资源开发和园区发展的制约, 为循环经济和特色优势产业发展打下坚实的基础。

6 结论

大型并网光伏电站并网时会对电网产生很大的影响,为了研究其并网适应性,本文以茫崖行委地区 600 MW 光伏电站为研究对象,根据茫崖行委地区最大、最小负荷运行方式下数据及光伏并网情况,按照并网技术导则要求,在大乌斯、甘森、塔尔丁三个百兆级光伏电站的并网后,对在电站出力变化条件下系统潮流、母线电压进行分析,并根据稳定导则对安全性及最大接纳能力分析影响进行分析,确保在大型光伏电站出力变化的情况下电网安全稳定运行。

参考文献

- [1] TELLES B L, GUILHERME A T, IVO B. A control strategy for parallel operation of single-phase voltage source inverters: analysis, design and experimental results[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(6): 2194-2204.
- [2] 王以笑, 崔丽艳, 雷振锋, 等. 分布式光伏电站区域智能调控系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 118-121.
WANG Yixiao, CUI Liyan, LEI Zhenfeng, et al. Research on the regional intelligent regulating system of distributed PV station[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 118-121.
- [3] 邢志斌, 韦钢, 贺静, 等. 基于图论的主动配电网双阶段电压控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 40-47.
XING Zhibin, WEI Gang, HE Jing, et al. A dual-stage voltage control method in active distribution network based on graph theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 40-47.
- [4] 李升, 卫志农, 孙国强, 等. 大规模光伏发电并网系统电压稳定分岔研究[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 17-23.
LI Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Voltage stability bifurcation of large-scale grid-connected PV system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 17-23.
- [5] 瞿继平, 吴兴全, 闫凯, 等. 光伏电站弱电源特性对送出线路继电保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 146-151.
QU Jiping, WU Xingquan, YAN Kai, et al. Influence of PV station weak power feature on relay protection of outgoing transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 146-151.
- [6] HE Jinwei, LI Yunwei, DUBRAVKO B, et al. Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 234-246.
- [7] 郑晨, 周林, 谢宝, 等. 基于相位裕度补偿的大型光伏电站谐波谐振抑制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 85-96.
ZHENG Chen, ZHOU Lin, XIE Bao, et al. The harmonic resonance suppression strategy of large-scale photovoltaic plants based on phase margin compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 85-96.
- [8] 侯李祥, 卓放, 师洪涛, 等. 基于系统稳定性分析的微电网阻抗测量技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 153-162.
HOU Lixiang, ZHUO Fang, SHI Hongtao, et al. New techniques for measuring impedance characteristics of anislanded microgrid based on stability analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 153-162.
- [9] 李春来, 王晶, 杨立滨. 典型并网光伏电站的等值建模研究及应用[J]. 电力建设, 2015, 36(8): 114-121.
LI Chunlai, WANG Jing, YANG Libin. Equivalent modeling research and application of typical grid connected photovoltaic power station[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(8): 114-121.
- [10] 高明杰, 惠东, 高宗和, 等. 国家风光储输示范工程介绍及其典型运行模式分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 59-64.
GAO Mingjie, HUI Dong, GAO Zonghe, et al. Presentation of national wind/photovoltaic/energy storage and transmission demonstration project and analysis of typical operation modes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 59-64.
- [11] 李乃永, 梁军, 赵义术. 并网光伏电站的动态建模与稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 12-18.
LI Naiyong, LIANG Jun, ZHAO Yishu. Research on dynamic modeling and stability of grid-connected photovoltaic power station[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 12-18.

- [12] 李春华, 朱新坚. 基于混合储能的光伏微网动态建模与仿真[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 39-46.
LI Chunhua, ZHU Xinjian. Dynamic modeling and simulation of hybrid energy storage-based photovoltaic microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 39-46.
- [13] 胡文平, 雷胜华, 王雪, 等. 大型移动式光伏电站防孤岛能力检测平台的研究与开发[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 120-127.
HU Wenping, LEI Shenghua, WANG Xue, et al. Design and development of the mobile platform to test the ability of anti-islanding for large-scale PV power station[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 120-127.
- [14] 张战彬, 翟红霞, 徐华博, 等. 光伏电站多逆变器并网系统输出谐波研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 142-146.
ZHANG Zhanbin, ZHAI Hongxia, XU Huabo, et al. Study on output harmonic of multi-inverter grid-connected in photovoltaic plant[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 142-146.
- [15] 分布式电源接入电网技术规定: Q/GDW 480—2010[S].
Technical rule for distributed resources connected to power grid: Q/GDW 480—2010[S].
- [16] 电能质量电力系统频率允许偏差: GB/T 15945—2008[S].
Power quality-frequency deviation for power system: GB/T 15945—2008[S].
- [17] 周林, 任伟, 廖波, 等. 并网型光伏电站无功电压控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 168-175.
ZHOU Lin, REN Wei, LIAO Bo, et al. Reactive power and voltage control for grid-connected PV power plants[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 168-175.
- [18] 赵争鸣, 雷一, 贺凡波, 等. 大容量并网光伏电站技术综述[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 101-107.
ZHAO Zhengming, LEI Yi, HE Fanbo, et al. Overview of large-scale grid-connected photovoltaic power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 101-107.
- [19] 陈功贵, 陈金富. 含风电场电力系统环境经济动态调度建模与算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 27-35.
Chen Gonggui, Chen Jinfu. Environmental/economic dynamic dispatch modeling and method for power systems integrating wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 27-35.
- [20] 电力系统安全稳定导则: DL 755—2001[S].
Guide on security and stability for power system: DL 755—2001[S].

收稿日期: 2017-03-24; 修回日期: 2017-05-16

作者简介:

李响(1979—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为分布式发电和微电网技术。E-mail: nomad0729@163.com

(编辑 张爱琴)