

基于组播的功率调节系统在光伏电站的应用

吴双惠, 孔波利, 崔丽艳, 李现伟, 丁钊, 沈志广

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对大容量光伏电站中逆变器数量较多时采用点对点的功率调节方式致使调节速度慢、调节时间长的问题, 提出了一种基于组播的功率调节系统。通过 UDP 组播一次性对全站逆变器下发遥调指令, 以提高整个电站的调节速度。详细介绍了功率调节控制系统的结构、控制模式及控制策略。在进行电压无功控制时充分利用逆变器的无功容量替代 SVG 的功能, 大大节约大型光伏电站的成本。该系统已在甘肃金昌振新 100 MWp 光伏电站中成功应用, 算例验证了所述方法的有效性。

关键词: 组播; 功率调节系统; 光伏电站; 控制策略; 电压无功控制

Application of power conditioner system based on multicast in photovoltaic power station

WU Shuanghui, KONG Boli, CUI Liyan, LI Xianwei, DING Zhao, SHEN Zhiguang

(XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: To solve the problems of slow regulative speed and long adjustment time by using peer-to-peer power regulation mode in high-capacity photovoltaic power station with numbers of inverters, a power conditioner system based on multicast is proposed, which sends the remote adjustment command to the inverters in the station at once by using UDP multicast to improve the regulative speed. The structure, control method and control strategy of the power conditioner system is introduced. It makes use of the reactive power of the inverters instead of the SVG in the voltage/reactive power control, which reduces the cost of large-scale photovoltaic power station effectively. The system has been successfully used in Jinchang Zhenxin 100 MWp photovoltaic power station in Gansu province and the method proposed is validated.

Key words: multicast; power conditioner system; photovoltaic power station; control strategy; voltage/reactive power control

中图分类号: TM615

文章编号: 1674-3415(2015)22-0114-06

0 引言

近年来, 东中部地区雾霾污染日益严重, 环境不堪重负, 大规模光伏并网发电是解决当前能源短缺、环境污染的重要举措之一。随着国家审批权下发和各项政策的出台, 以光伏、风电为代表的新能源迎来了新一轮的快速发展期。与此同时, 由于光伏发电出力不稳定, 受天气影响因素较大, 大规模光伏电站接入电网后对电网的有功潮流和无功电压产生很大影响, 不但加大了电网的功率平衡难度, 严重威胁电网安全稳定运行, 而且也给电网的调度工作带来很大的困难^[1-4]。

光伏电站的有功控制和无功电压调节能力是光伏电站可调度性的重要体现, 国标 GB/T 19964-2012《光伏电站接入电力系统技术规定》^[5]中对

光伏电站的有功控制能力和无功电压调节能力做了具体规定。为了应对大规模光伏发电接入对电网稳定性的影响, 我国各高校及电力企业相继开展了对光伏发电功率调节系统的研究工作。文献[6]提出了光伏并网运行功率的直接控制方法, 实现有功功率和无功功率的直接、统一控制, 以改善配电网供电质量; 文献[7]基于九区图原理, 以 PCC 电压和功率因数均合格为最优控制目标, 提出了大型光伏电站的无功电压控制策略; 文献[8]以传统有功自动控制技术为基础, 研究分析了包括功率限制、计划曲线跟踪等多种光伏发电有功自动控制技术; 文献[9]介绍了一种在光伏电站中应用的 AGC/AVC 控制系统, 通过对逆变器及 SVG 按照既定的策略进行自动调节与控制可以较好地跟踪调度调节指令; 文献[10]提出在功率调节系统中加入可控微源

—微型燃气轮机调节光伏输出功率, 实现注入电网功率可调度; 文献[11]针对光伏调节特性提出多种有功控制模式和性能评价方法, 通过监视控制系统框架设计和功能开发部署, 实现光伏全过程应用的一体化集成。上述研究的重点在于光伏逆变器的控制策略优化方面, 以提高光伏出力的可控性, 对光伏电站整体功率调节系统的研究较少。为提高电网对光伏发电的接纳能力, 降低光伏发电对电网运行的负面影响, 能够自动接收调度系统的调节指令, 研究光伏电站的功率调节系统是非常必要的。

目前, 国内现有的光伏电站功率调节的方式大部分属于点对点调节方式, 即由监控系统逐个下发调节指令到通信接入设备, 再通过串口逐个下发到逆变器。如装机容量为 100 MW 的光伏电站, 在进行功率调节时需要 100~200 条控制指令, 完成一轮调节的时间需要 3~6 min。若光伏电站容量较大、逆变器数量较多, 采用这种点对点的调节方式必将降低调节速度, 调节时间长及响应慢会对电网的稳定性造成一定的影响。

鉴于此, 本文提出了一种基于组播模式的功率调节方式, 在监控系统中增加 IP 组播通信模块, 下发调节指令时, 通过组播模式一次性对全站逆变器下发调节指令, 以提高整个系统的调节速度。同时, 在进行电压无功自动控制时充分利用并网逆变器自身的无功输出能力作为无功补偿设备的补偿或替代, 最大限度地减少原有光伏电站中 SVG 的配置容量甚至不用配置 SVG, 大大降低光伏电站的成本, 具有广泛的工程应用价值。

1 基于组播模式的功率调节系统

基于组播模式进行功率调节的控制系统结构图如图 1 所示。组播功能功率调节系统支持远方控制和就地控制, 远方控制为功率调节系统按照调度中心下达的指令进行调节, 就地控制为功率调节系统不经过调度中心, 直接接收监控系统人工预置的本地控制指令。

远动装置将调度下发的调节模式(恒有功/恒无功/恒电压/恒功率因数)及调节目标发送至光伏监控系统, 或在监控系统人工预置调节模式及调节目标; 光伏监控系统通过通信接入装置获取当前每个逆变器的实时通信状态、运行状态、实发有功、实发无功等信息, 且在监控平台中增加组播模块, 便于下发组播命令; 功率调节系统通过读取监控系统的数据库获取相关数据, 根据调节模式及调节目标计算全站逆变器相同的调节目标值, 并调用监控系统的组播接口, 采用组播的方式将调节指令发送至

各通信接入装置, 各通信接入装置接收到组播命令后进行解析并处理后发送至逆变器进行功率调节。

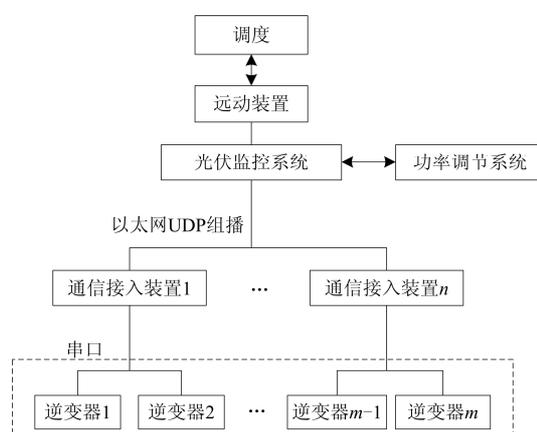


图 1 控制系统结构图

Fig. 1 Structure of the control system

1.1 有功功率自动控制

与点对点的调节方式逐个向逆变器下发调节指令不同, 基于组播的功率调节系统需要通过 UDP 组播一次性对全站逆变器下发相同的调节指令, 因此, 所下发的调节目标百分比的正确性至关重要。功率调节的步骤如下。

(1) 功率调节系统从监控系统获取相关参数, 根据有功目标值、实时有功、调节精度判断是否需要调节。

(2) 根据调节目标值、可调逆变器的总容量及其实时输出功率计算调节目标百分比。

(3) 最后调用监控系统的组播接口将调节目标广播至各逆变器, 使整个电站的有功出力实时跟随调度指令值变化且不超过调度指令值。

在步骤(2)中, 每轮调节都会判断每个逆变器是否可调, 若上轮调节中逆变器未调到目标值则在本轮中会判断为不可调。在光照强度较弱, 全站有功功率达不到调度下发的调节指令时, 会认为全站逆变器都不可调, 此时整站便不是处于限功率阶段, 而是全站逆变器处于 MPPT 状态, 不限制逆变器发电。

在有功功率调节过程中, 为防止电压扰动影响系统的运行, 在调节流程中增加有电压扰动调节环节。在每轮调节有功功率之后, 检查是否有电压扰动, 若电压扰动大于电压调节精度, 则会转向电压调节模式, 具体调节策略见 1.2.2 节。

1.2 电压无功自动控制

大中型并网光伏电站中, 在电网负荷扰动或光照强度波动时, 并网点电压常有一定程度的波动, 常规的解决方式是在光伏电站内加装 SVG 等无功

补偿装置,在电压跌落时发出无功以提升并网点电压,但这种方式忽略了光伏逆变器本身的无功输出能力,造成了一定程度上的浪费;另一方面,SVG等无功补偿装置价格昂贵,大大增加了光伏电站的投资成本。

《光伏电站接入电力系统技术规定》标准中指出,光伏电站要充分利用并网逆变器的无功容量及其调节能力,当逆变器的无功容量不能满足系统电压调节需要时,应在光伏电站集中加装适当容量的无功补偿装置。由此可以看出,并网点电压波动时,应首先利用逆变器的无功容量调节逆变器在输出有功功率的同时输出一定的无功功率,实现电站的无功平衡。电压无功控制支持恒无功、恒电压、恒功率因数三种控制模式。

1.2.1 恒无功控制模式

当调度下发的调节模式或本地人工预置的调节模式为恒无功模式时,与有功功率的调节过程相同,功率调节系统根据无功目标值、逆变器的无功容量、无功调节精度、逆变器的通信状态等参数计算并下发逆变器的无功调节目标百分比。

1.2.2 恒电压控制模式

由于在光伏电站中,变压器及线路都会有无功损耗,造成一定程度上的电压降,且大量的逆变器分散安装在电站的不同位置,造成各逆变器的输出电压在同一时刻并不相同,因此在调节模式为恒电压模式时,直接下发电压目标百分比会存在一定的误差,导致调节后的并网点电压不能满足精度要求(已在本系统所运行的光伏电站中进行验证)。本系统的设计方案是在并网点电压 V_{meas} 与电压目标值 V_{ref} 的偏差大于电压调节精度时,根据系统阻抗 X 将电压目标值转换成无功目标值 Q_{ref} ,通过调节无功功率达到调节电压的目标,其计算式为

$$Q_{\text{ref}} = \frac{(V_{\text{ref}} - V_{\text{meas}})V_{\text{ref}}}{X} + \frac{Q_{\text{meas}}}{V_{\text{meas}}} V_{\text{ref}} \quad (1)$$

其中,系统阻抗 X 可采用式(2)进行计算^[12]。

$$X = \frac{V_2 - V_1}{\frac{Q_2}{V_2} - \frac{Q_1}{V_1}} \quad (2)$$

式(2)中: V_1 、 Q_1 为前次计算系统阻抗的并网点电压及无功功率; V_2 、 Q_2 为本次计算系统阻抗的并网点电压及无功功率。

在调节过程中,若因负载突变等原因引起并网点电压发生扰动时,在下轮调节过程中,逆变器就会发出无功以平衡电压,调节电压达到其目标值。

若电压扰动较大,全站逆变器的无功容量不足以平衡电压时,则会安排投入适当容量的 SVG 以补偿无功功率,维持并网点电压在恒定值。

1.2.3 恒功率因数控制模式

国家标准规定光伏并网逆变器应具备在额定有功出力下功率因数在超前 0.95~滞后 0.95 的范围内动态可调,参与电网电压的调节。在光伏电站中,变压器及线路都会造成一定的无功损耗,导致逆变器的功率因数与并网点的功率因数并不一致,因此需要将功率因数目标值转换成无功功率目标值之后通过调节无功来达到调节功率因数的目的。由于在本系统所运行的光伏电站中,采用的是限功率运行方式,且逆变器在输出无功功率时其输出的有功功率基本不变,因此可采用式(3)根据当前并网点有功功率 P 及功率因数目标值 $\cos\theta_{\text{ref}}$ 将 $\cos\theta_{\text{ref}}$ 转换为无功功率目标值 Q_{ref} 。

$$Q_{\text{ref}} = \frac{P}{\cos\theta_{\text{ref}}} \sqrt{1 - \cos^2\theta_{\text{ref}}} \quad (3)$$

当功率调节系统获取的调节模式为恒功率因数控制模式时,首先判断远方或本地下发的功率因数目标值是否在允许的范围内(超前 0.95~滞后 0.95),若不在,则直接退出本轮调节流程;若在,则按照式(3)计算无功目标值之后按照无功调节流程进行调节。

2 应用效果分析

2.1 应用光伏电站基本情况

本文所述的基于组播的功率调节系统已在甘肃金昌振新 100 MWp 光伏电站投入运行,运行情况良好。100 MW 光伏发电设备以 1 MW 为单元,分别接入两回 35 kV 母线,经两套 50 MW 变压器升至 110 kV 后经母线统一送出。该光伏电站包括 200 套逆变器(500 kW 的阳光逆变器和易事特逆变器),均具备恒有功、恒无功、恒电压、恒功率因数几种控制模式,100 套箱式变压器,每个变压器配置有远程可控箱变测控装置。监控系统通过许继 SRU-801 远动装置与调度中心进行通信,厂内设备经过许继 SGU-802 单元通信接入装置和 SGU-801 装置进行数据采集后,接入许继 Solar-8100 光伏电站智能监控系统实现远程监控,网络结构图如图 2 所示。

2.2 有功控制能力测试

测试时电站所有逆变器或部分逆变器并网运行(部分逆变器停机或通信异常),不限制光伏电站的有功功率变化速度。通过在光伏监控主站上预置有功计划曲线,以每隔 10 s 采用广播报文的形式

下发遥调有功指令分别为: $30\%P_n$ 、 $25\%P_n$ 、 $20\%P_n$ 、 $10\%P_n$ 、 $20\%P_n$ 、 $35\%P_n$ (P_n 为 100 MW), 光伏电站的实际出力与计划曲线图如图 3 所示。

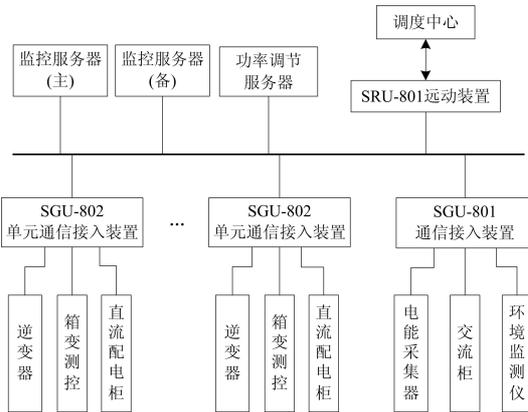


图 2 网络结构图

Fig. 2 Network structure of the station

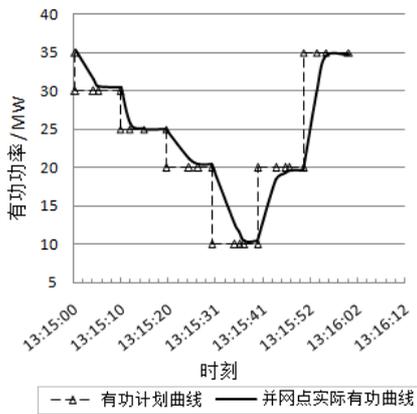


图 3 光伏电站实际有功出力与计划曲线

Fig. 3 Photovoltaic station active power output and generation scheduling curves

由图 3 可以看出: 光伏电站有功出力能够较好地跟踪计划曲线, 并达到较高的控制精度。由于通信时间及逆变器响应时间的限制, 整体的有功调节时间在 6~7 s 左右, 远远小于采用点对点调节方式时的 3~5 min。上述的测试是在中午进行的, 在光照强度较弱, 光伏电站的出力达不到调度下发的功率限额值时, 全站逆变器便会运行在 MPPT 状态, 光伏电站处于非限功率阶段。

2.3 电压无功控制能力测试

2.3.1 恒无功控制模式下测试

调节逆变器在恒无功运行方式, SVG 处于退出状态, 通过在光伏监控主站上预置无功计划曲线, 以每隔 10 s 采用广播报文的形式下发遥调无功指令分别为: 0、0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、0、-0.5、

-1、-1.5、-2、-2.5、-3、-3.5(单位均为 Mvar), 光伏电站的实际无功输出与计划曲线图如图 4 所示。

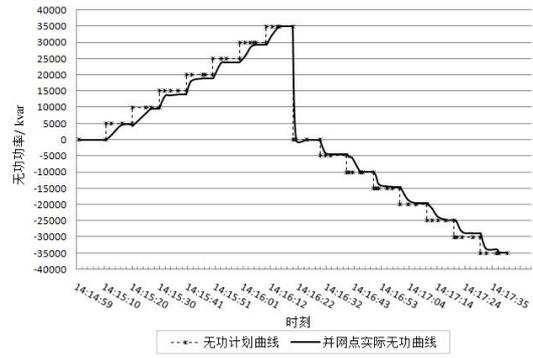


图 4 光伏电站实际无功出力与计划曲线

Fig. 4 Photovoltaic station reactive power output and generation scheduling curves

2.3.2 恒电压控制模式下测试

调节逆变器在恒电压运行方式, SVG 处于退出状态, 通过在光伏监控主站预置电压计划曲线, 以每隔 10 s 采用广播报文的形式下发遥调电压指令分别为: 120、119、118、117、116、115、117、119、120、121、122、123(单位均为 kV), 光伏电站的实际电压与计划曲线图如图 5 所示。

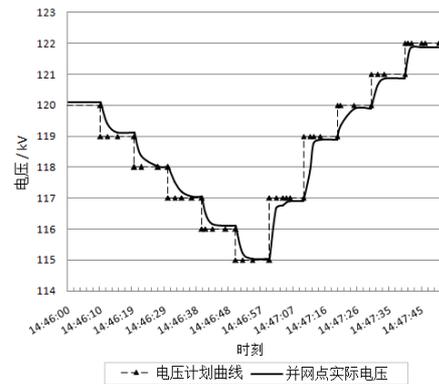


图 5 实际电压与计划曲线

Fig. 5 Voltage curve at the PCC and generation scheduling curve

2.3.3 恒功率因数控制模式下测试

该光伏电站逆变器的功率因数在超前 0.90 至滞后 0.90 范围内动态可调。在测试时, 调节逆变器在恒功率因数运行方式, SVG 处于退出状态, 通过在光伏监控主站预置功率因数, 以每隔 10 s 采用广播报文的形式下发遥调功率因数指令分别为: 1、-0.98、-0.96、1.00、0.98、0.96、0.94、0.92、0.9, 调节前后并网无功及功率因数变化的数据如表 1 所示。

表 1 调节前后数据对比表

Table 1 Reactive power and power factor comparison

序号	目标	并网点无功变化		并网点功率因数变化		
		试验前/kvar	试验后/kvar	试验前	试验后	调节时间/s
1	1	8832.3	0	0.99	1	4.75
2	-0.98	0	-10 275.4	1	-0.980 8	5.25
3	-0.96	-10 275.4	-12 698.2	-0.980 8	-0.961 86	7.192
4	1	-12 698.2	0	-0.961 86	1	4.832
5	0.98	0	10 180.2	1	0.980 17	5.281
6	0.96	10 180.2	14 378.3	0.980 17	0.960 726	5.086
7	0.94	14 378.3	17 673.6	0.960 726	0.940 61	4.813
8	0.92	17 673.6	20 401.3	0.940 61	0.920 831	5.147
9	0.9	20 401.3	22 999.8	0.920 831	0.901 28	4.252

由图 4、图 5 及表 1 可以看出,在不投入 SVG 时,三种电压无功控制模式下,逆变器自身的无功输出能力均可使并网点的无功/电压/功率因数很好地跟踪预置的计划调节指令,能够实现较高的调节精度,且调节时间均在 10 s 以内。在光照强度较弱时,只会影响光伏电站是处于 MPPT 阶段还是处于限功率阶段,对光伏电站的无功调节基本上没有影响。

3 总结

随着光伏电站容量的增大,所需逆变器数量剧增,若使用单播模式下点对点的调节方式必将降低整站的调节速度,延长调节时间,容易引起电网的波动。鉴于此,本文提出了一种基于组播的功率调节方式,通过 UDP 组播一次性对全站逆变器下发调节指令,使得装机容量为 100 MW 的光伏电站的一轮调节时间由原来的 3~5 min 降低到 10 s 以内,显著提高了功率调节速度;另一方面,在进行电压无功自动控制时利用并网逆变器自身的无功输出能力代替 SVG 的功能,大大降低光伏电站的成本。该系统已在甘肃金昌振新 100 WMP 光伏电站中成功应用,运行情况良好,具有广泛的工程应用价值。

参考文献

- [1] 王鹤, 胡志坚, 陈珍. 基于集合经验模态分解和小波神经网络的短期风功率组合预测[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 137-144.
WANG He, HU Zhijian, CHEN Zhen. A hybrid model for wind power forecasting based on ensemble empirical model decomposition and wavelet neural networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 137-144.
- [2] 王以笑, 张新昌, 路进升, 等. 基于 DIgSILENT 的并网光伏发电系统的建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 49-54.

制, 2014, 42(3): 49-54.

WANG Yixiao, ZHANG Xinchang, LU Jinsheng, et al. Modeling and simulation of grid-connected PV system based on DIgSILENT software[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 49-54.

- [3] 茆美琴, 周松林, 苏建徽. 基于风光联合概率分布的微电网概率潮流预测[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 55-63.
MAO Meiqin, ZHOU Songlin, SU Jianhui. Probabilistic power flow forecasting of microgrid based on joint probability distribution about wind and irradiance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 55-63.
- [4] 朱星阳, 张建华, 刘文霞. 风电并网引起电网电压波动的评价方法及应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 88-98.
ZHU Xingyang, ZHANG Jianhua, LIU Wenxia. Evaluation methodology and its application of voltage fluctuation in power networks caused by interconnected wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 88-98.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19964-2012. 光伏发电站接入电力系统技术规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the people's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 19964-2012. Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [6] 陈树勇, 鲍海, 吴春洋, 等. 分布式光伏发电并网功率直接控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(11): 6-11.

- CHEN Shuyong, BAO Hai, WU Chunyang, et al. Direct grid-tie power control method for distributed photovoltaic generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(11): 6-11.
- [7] 葛虎, 毕锐, 徐志成, 等. 大型光伏电站无功电压控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 45-50.
- GE Hu, BI Rui, XU Zhicheng, et al. Research on reactive power and voltage control of large-scale photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 45-50.
- [8] 施佳锋, 沈燕, 程彩艳, 等. 光伏发电有功自动控制技术[J]. 宁夏电力, 2012(1): 1-5.
- SHI Jiafeng, SHEN Yan, CHENG Caiyan, et al. Analysis on the automatic control technology of active power of photovoltaic Power generation[J]. Ningxia Electric Power, 2012(1): 1-5.
- [9] 魏世贵, 刘双. AGC/AVC 在光伏电站的应用[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(2): 35-42.
- WEI Shigui, LIU Shuang. Application of AGC/AVC in photovoltaic power station[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(2): 35-42.
- [10] 邓浩, 周念成, 王强钢, 等. 光伏并网功率调节系统的建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 62-66.
- DENG Hao, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. Modeling and simulation of grid-connected photovoltaic power regulation system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 62-66.
- [11] 徐瑞, 滕贤亮, 张小白, 等. 大规模光伏有功综合控制系统设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 24-28.
- XU Rui, TENG Xianliang, ZHANG Xiaobai, et al. Design of integrated active power control system for large-scale photovoltaic system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 24-28.
- [12] 潘琪, 徐洋, 高卓. 含分布式光伏电站接入的配电网三级电压控制系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 64-68.
- PAN Qi, XU Yang, GAO Zhuo. Design of three level voltage control system in distribution network with the connection of many distributed photovoltaic power plants[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 64-68.

收稿日期: 2015-04-28; 修回日期: 2015-06-04

作者简介:

吴双惠(1975-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护研究及管理工作。E-mail: wushuanghui@xjgc.com

(编辑 周金梅)