

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.06.025

配电网中光伏功率主动削减策略研究*

王力成¹, 文东山¹, 周 斌², 刘 佳², 郭创新^{1*}

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网重庆市电力公司 检修分公司, 重庆 400039)

摘要:针对夏季正午由大量光伏功率注入配电网所带来的节点电压、线路潮流越限的问题,提出了一种通过实时计算和削减分布式光伏发电系统功率输出的主动控制方法来限制配电网中光伏功率注入量,从而避免配电网中越限事故的发生。首先给出光伏出力削减的数学优化模型,该模型以实时气象条件为基础计算光伏发电系统潜在的最大输出功率,并通过最优潮流模型结合配电网各个节点的负荷水平计算得到该时刻连接于各个节点的光伏发电系统的最大允许出力上限值。在此基础上,又设计了一种 DC/DC 变换器的电流控制策略。通过该控制策略,可以使光伏发电系统的出力在不同的光照条件下均不超过计算所得的最大允许出力上限。最后通过 IEEE33 节点模型进行算例分析。研究结果表明,所提出的光伏功率主动削减策略可以避免配电网中越限事故的发生。

关键词:光伏削减;配电网;调度;最优潮流

中图分类号:TM7

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)06-0863-06

Output curtailment strategy of photovoltaic generation system

WANG Li-cheng¹, WEN Dong-shan¹, ZHOU Bin², LIU Jia², GUO Chuang-xin¹

(1. College of Electrical Engineering Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Maintenance Branch Company, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400039, China)

Abstract: Aiming at avoiding problems such as voltage and power flow off-limits in distribution network caused by large amount of active power injection generated by large scale of photovoltaic (PV) generators during summer noon, a photovoltaic output curtailment strategy that can limit the amount of injection active power was proposed. Firstly, a PV output curtailment model was established, through which the maximum allowable output power of PV generators connected in specific nodes could be obtained. On this basis, the maximum allowable output power was transmitted to the controller which is in charge of limiting the output power of PV generators in periods when the insolation is very large. Finally, an example was presented using IEEE33 nodes system. The results indicate that the method proposed is feasible.

Key words: photovoltaic curtailment; distribution network; dispatch; optimal power flow

0 引 言

太阳能是一种重要的可再生能源。然而,光伏发电系统在配电网中的渗透率达到一定比例后,将带来反向潮流和电压越限等问题,这给配电网运行控制增加了新的挑战。

工业实践和科学研究表明有以下几种方式可以解

决配电网反向潮流越限及节点电压越限的问题:①在配电网规划设计中控制光伏发电的接入容量。文献[1-2]分别研究了配电网与输电网中光伏接入的极限容量。②利用储能(化学电池、电动汽车等)吸纳光伏发电系统在正午发出的多余有功功率,并在负荷高峰时段释放能量,从而既可消除线路潮流阻塞,又可达到削峰填谷的效果,提高了供电质量。近年来,国内外学

收稿日期:2015-01-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177143);浙江省自然科学基金资助项目(LZ12E07002);国家重点基础研究计划(973计划)资助项目(2013CB228206)

作者简介:王力成(1989-),男,浙江宁波人,主要电力系统最优潮流方面的研究. E-mail:986862154@qq.com

通信联系人:郭创新,男,教授,博士生导师. E-mail:guochuangxin@zju.edu.cn

者对储能进行了大量的研究与建模工作^[3-5]。同时,也有不少学者提出了可再生能源与储能的协同调度策略,如风光储联合调度策略^[6-7]。③利用快速启动机组(如燃气轮机)调节出力来适应光伏有功输出的变化,从而减小光伏出力随机性对电网的冲击^[8-9]。除此之外,常用的辅助方法还包括利用有载调压变压器调节配电网电压,以及利用光伏发电系统的电力电子逆变器和无功补偿设备进行无功功率的调节^[10-11]。

然而,储能系统目前还受到投资成本以及使用寿命等的约束,这使得储能系统近期还很难在电网中获得大规模应用。以锂离子电池为例,目前每千瓦时储能容量的价格约为 5 000 元,寿命约为 2 000 次,即 2.5 元/kWh,高于目前的上网电价。在此情况下,让光伏发电系统部分弃光才是更好的选择。而通过快速启动机组来应对光伏出力的变化时,光伏并网发电系统向电网输送电能是以减少相应机组利用小时数为代价的^[12]。

事实上,在规划时期所确定的是光伏发电系统额定容量^[13]。为保证在任何可能的光照强度下配电网都不会发生电压和潮流越限,规划中所确定的光伏发电系统额定容量通常都留有较大的裕度,这将大大制约人们对清洁太阳能的使用。目前,光伏发电系统的出力控制通常采用最大功率点跟踪策略。而会引起配电网电压、潮流越限的光伏出力高峰时段只占全年光伏有效出力时间很小的一部分。若能合理地削减出力高峰时段的光伏功率,使配电网不至于越限,则可增加光伏发电系统的接入容量,从而在非出力高峰时段获得更多的光伏功率。

由于配电网是高电阻网络,由接入配电网的光伏发电系统所产生的反向有功潮流会显著地提高沿线节点的电压。同时,过大的反向有功潮流也可能导致线路潮流过载。因此,对配电网的有功注入量进行主动控制是至关重要的。

基于此,本研究针对配电网中接入的光伏电站提出一种考虑光伏出力削减的实时控制策略。

1 光伏出力削减模型

1.1 光伏出力最大值计算

光伏发电系统的最大输出功率具有一定的随机性,其值受到太阳辐照量、外界环境温度以及光伏模块的自身参数等因素的影响。当已知太阳辐照量为 s ($0 < s < 1$) 时,光伏发电系统运行在最大功率点的输出功率可以由式(1~5)计算所得^[15]。

$$T_{cy} = T_A + s \left(\frac{N_{OT} - 20}{0.8} \right) \quad (1)$$

$$I_y = s [I_{sc} + K_i (T_{cy} - 25)] \quad (2)$$

$$V_y = V_{oc} - K_v \times T_{cy} \quad (3)$$

$$FF = \frac{V_{MPPT} \times I_{MPPT}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (4)$$

$$P_{pv}^{\max}(s) = N \times FF \times V_y \times I_y \quad (5)$$

式中: T_{cy} , T_A —光伏模块的温度和环境温度; N_{OT} , I_{sc} , V_{oc} —光伏模块标称运行温度、短路电流以及开路电压; K_v , K_i —电压温度系数和电流温度系数; FF —填充因子; N —光伏发电系统中包含的光伏模块的个数。 I_{MPPT} , V_{MPPT} —最大功率点的电流和电压; P_{pv}^{\max} —当太阳辐照量为 s 时,光伏发电系统的最大输出功率。

所以,在已知光伏模块参数的情况下,通过实时地测量外界气象条件,就可以由式(1~5)计算得当前光伏发电系统的最大输出功率。

1.2 光伏出力削减模型

根据一天中光照强度的变化规律,光伏发电系统通常在正午迎来出力高峰时段;而夏季与冬季中某天中的同一时刻,其光照强度亦相差很大。对于依据最大功率点跟踪(MPPT)进行控制的光伏发电系统,其极限接入容量是按照光伏出力高峰时段(如夏季正午)的功率输出量进行安全计算的。而在该光伏渗透率水平下,非高峰时段的光伏发电系统出力还远未达到引起电网越限的最大有功注入量。由于非高峰时段光伏出力占据光伏有效出力时间的绝大部分,通过削减光伏出力高峰时段的有功输出,可以增加光伏发电接入容量。

由于光伏出力的不确定性,研究人员不能像调度传统发电机那样来调度光伏电站的出力,但却可以将光伏的实际出力从一个较大的值(由式(1~5)计算所得的当前光伏发电系统的潜在最大输出功率)削减至某一合适的出力值。所以,本研究所指的削减策略,实际上就是一种为了满足系统安全约束,将光伏出力向下主动调节的调度策略。

1.2.1 目标函数

本研究为了在配电网不越限的情况下,充分利用光伏发电,将目标函数设定为使配电网从主网中吸收的有功功率量最小,即:

$$f = \min P_i \quad (6)$$

式中: P_i —配电网从主网中吸收的有功功率,以流入配电网为正。

该目标函数兼顾了减小网损以及尽可能多地利用光伏发出的电能。

1.2.2 约束条件

(1)节点功率平衡方程:

$$P_i + V_i \sum_{j=1}^{NB} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (7)$$

$$Q_i + V_i \sum_{j=1}^{NB} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (8)$$

式中: V_i, V_j —节点 i, j 的电压幅值; NB —节点个数; P_i, Q_i —节点 i 注入的功率,取决于该节点上的光伏发电量以及负荷水平; θ_{ij} —节点 i 与节点 j 的电压相角差; G_{ij}, B_{ij} —导纳矩阵对应元素的实部和虚部。

(2)线路潮流约束:

$$-T_i^{\max} \leq T_i \leq T_i^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, NL \quad (9)$$

式中: T_i 与 T_i^{\max} —第 i 条线路上的潮流及线路潮流上限值。 NL —支路条数。

(3)节点电压约束:

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, NB \quad (10)$$

式中: V_i^{\max}, V_i^{\min} —节点 i 的电压上下限值。

(4)光伏出力约束:

$$0 \leq P_{pvi} \leq P_{pvi}^{\max} \quad (11)$$

式中: P_{pvi} —节点 i 的光伏有功注入上限值,是待优化变量。 P_{pvi}^{\max} 可由式(1~5)计算得到。式(11)表达了光伏出力削减的思想,即连接于某个节点上的光伏出力从最大功率点 P_{pvi}^{\max} 被削减至某一个合适的出力值 P_{pvi} ,从而避免配电网节点电压和线路潮流越限。根据式(6~11),可以通过优化计算得到一个合理的光伏出力削减策略。本研究采用 GAMS 优化软件建模,调用 KNITRO 求解器进行优化计算。

2 通过 DC/DC 电路削减光伏出力

为了对接入配电网的集中式光伏发电系统进行日内实时优化调度和控制,配电网能量管理(调度控制)中心通过上文所叙述的光伏削减策略,每隔 10 min(符合 EN 50160 和 IEC61000-4-3 标准)计算一次各个节点上光伏发电系统的最大允许出力上限值 P_{pvi} ,并将该值作为指令分别传递到各个光伏发电系统,如图 1 所示。在该 10 min 内,光照强度可能会略有变化,但配电网中各个光伏发电系统的出力始终不允许超过 P_{pvi} 。若光照强度较强,光伏发电系统的潜在输出功率大于 P_{pvi} ,则通过主动控制使其出力恒定在 P_{pvi} ;若光照强度变弱,光伏发电系统的潜在输出功率小于 P_{pvi} ,则使光伏发电系统运行在其最大功率点上。到下一个 10 min,配电网调度控制中心重新计算 P_{pvi} ,并将新值传递给各个光伏发电系统。通过上述控制策略,各个时段的实际光伏出力会等于或略小于计算值 P_{pvi} ,但

能保证配电网始终不会发生电压、潮流越限。图 2 展示了一个典型的两级式并网光伏发电系统的结构,由光伏电池阵列、DC/DC 变换器、DC/AC 光伏并网逆变器、控制器、储能电容等组成^[16]。通常,DC/DC 变换器负责将光伏阵列所产生的直流电压 V_{pv} 变换成受控的直流电压 V_{dc} 供给后一级 DC/AC 光伏并网逆变器,同时实现对光伏阵列的最大功率点跟踪功能。而 DC/AC 变换器负责将直流母线上的直流电逆变成交流电,为本地负荷提供电能,并将多余的电能注入配电网。然而,在光伏出力高峰时段,多余的光伏功率需要被削减掉,所以此时对光伏阵列继续进行最大功率点跟踪就不适宜了。

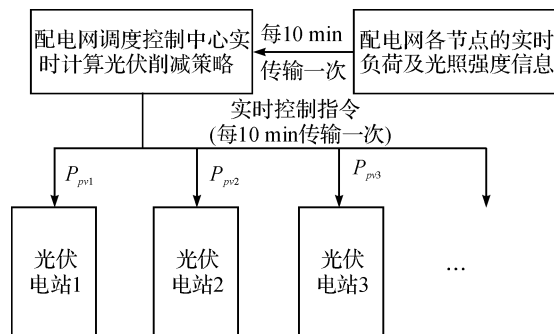


图 1 控制信号流向图

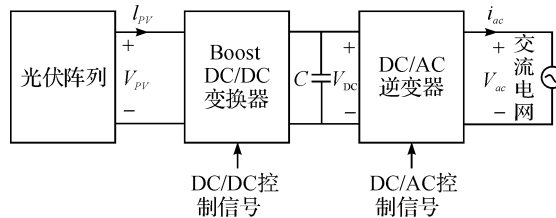


图 2 并网光伏发电系统结构图

光伏阵列的输出功率与输出电压呈现非线性关系,且该 PV 特性曲线会随着外界环境的变化而变化。国内外学者对光伏阵列的最大功率点跟踪已经进行了大量的研究,其控制策略主要包括定电压跟踪法、扰动观察法、电导增量法等^[17-18]。受到最大功率点跟踪的启示,本研究提出了一种将光伏发电系统输出功率维持在某一给定值的控制策略。根据配电网调度控制中心所给定的指令值 P_{pvi} ,DC/DC 变换器的控制器通过合理地改变占空比来调节出力,使光伏发电系统的输出功率降至 P_{pvi} 以下,从而实现光伏出力的主动削减,避免配电网节点电压和线路潮流越限。

本研究通过基于 Simulink 的光伏模块来进行仿真计算。对光伏发电系统出力的主动调节是通过控制太阳能电板端电流来实现的,具体控制逻辑如图 3 所示。

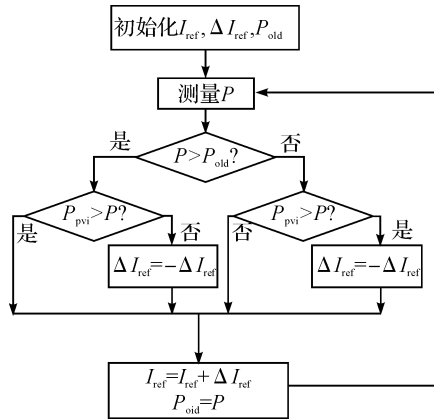


图 3 电流控制逻辑图

P_{pvi} —传递给光伏发电系统的最大允许出力值; $I_{ref}, \Delta I_{ref}$ —光伏阵列的控制电流和控制电流的增量; P, P_{old} —本次循环光伏阵列的输出功率值及上一次循环光伏阵列的输出功率

3 算例分析

本研究采用 IEEE33 节点的配电网系统,在节点 18、25、32 上添加了光伏电站,并以此为基础进行仿真计算。IEEE33 节点配电网的基准电压为 12.66 kV,三相功率基准值为 10 MVA。采用文献[19]所提供的数据通过式(1~5)计算光伏在该条件下的最大出力值。具体参数的数据如表 1 所示。

表 1 光伏发电系统参数

参数名称	$T_A/^\circ\text{C}$	$N_{OT}/^\circ\text{C}$	I_{MPPT}/A	V_{MPPT}/V
数据	30.76	43	7.76	28.36
参数名称	I_{SC}/A	V_{oc}/V	$K_i/(A/^\circ\text{C})$	$K_v/(V/^\circ\text{C})$
数据	8.38	36.96	0.005 45	0.127 8

正午时分(光伏发电系统出力高峰时段),各个节点上的光伏最大允许出力值如表 2 所示。文中规定电压上下限值分别为 1.05 至 0.9(标么值)。当没有光伏接入时,线路 1—2 上的正向潮流最大,所以将该值作为所有线路潮流的上限约束。为了使连接主网与配电网的有载调压变压器可以自由调压(调压范围为 0.95~1.05),本研究在计算时将节点 1 上的电压设为 1.05。由计算结果可知,节点 18 与节点 25 上的光伏出力需要适当地进行削减,节点 32 上的光伏发电系统依旧可以运行在其最大功率点上。节点 18、25、32 上的原有的有功负荷分别为 90 kW、420 kW、210 kW。所以,此时网络中会产生大量的反向潮流。

表 2 光伏出力削减模型计算结果

节点编号	光伏最大功率点出力值/kW	光伏最大允许出力值/kW
18	976	822
25	1 301	1 181
32	1 626	1 626

IEEE33 节点配电网节点电压幅值沿馈线的变化

趋势如图 4 所示。图 4 中:星形、方块和圆形分别代表了光伏出力高峰时段,配电网不接入光伏,接入光伏且采用出力削减策略、接入光伏但不采用出力削减策略时的各个节点的电压幅值。由图 4 可知,当配电网中无光伏发电系统接入时,电压幅值从 1 号节点(配电网与输电网相连接的节点)开始沿着馈线逐渐降低。其中,节点 18 与节点 33 电压较低,对应于配电网中两条馈线上的最末端点。当配电网中接入大量的光伏发电系统后,若对注入配电网的有功功率不加以控制,则在光伏出力的高峰时段,会在配电网中形成较大的反向潮流,显著抬高系统节点电压,造成电压越限。通过光伏出力削减策略对注入配电网的有功功率进行主动控制,则可将所有的节点电压都控制在上限值以下(如图 4 中方块所示)。对于节点 1 至节点 18 的馈线,方形点在节点 9 对应于最小电压幅值,表明由节点 18 上的光伏发电系统所产生的反向潮流到节点 9 就基本消失了,即节点 18 上的光伏发电系统此刻支持了从节点 9 至节点 18 的用电负荷。

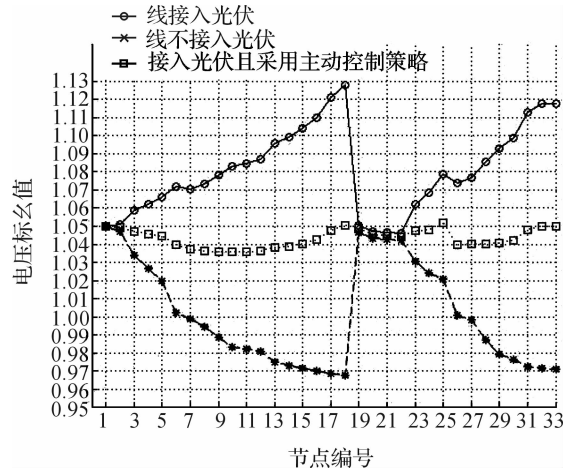


图 4 节点电压幅值沿馈线变化图

当调度控制中心给定位于不同节点上的光伏发电系统最大允许出力值 P_{pvi} 后,连接于各个节点上的光伏发电系统就需要根据该指令值主动控制自身的输出功率。本研究假设太阳光照强度从 400 W/m^2 至 1000 W/m^2 变化,如图 5 所示。

在该光照条件下,本研究假设传递给光伏发电系统控制器的指令是,输出功率不得大于 822 kW。通过图 4 所给出的电流控制逻辑,本研究可以将光伏发电系统的出力控制在所规定的功率以下。

控制电流 I_{ref} 与光伏阵列输出功率随光照强度变化而变化的曲线图如图 6 所示。图 6 中: P_{pv} 与 P_{pv0} 分别为应用本研究所提出的控制策略与最大功率点跟踪控制策略下光伏模块输出的有功功率。由图 6 可得,

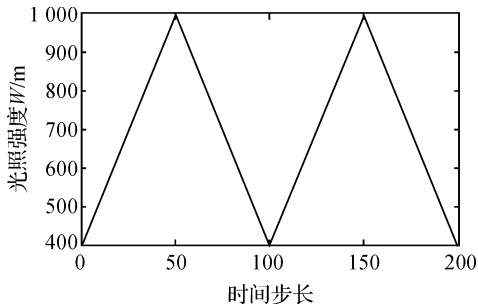


图5 光照强度变化图

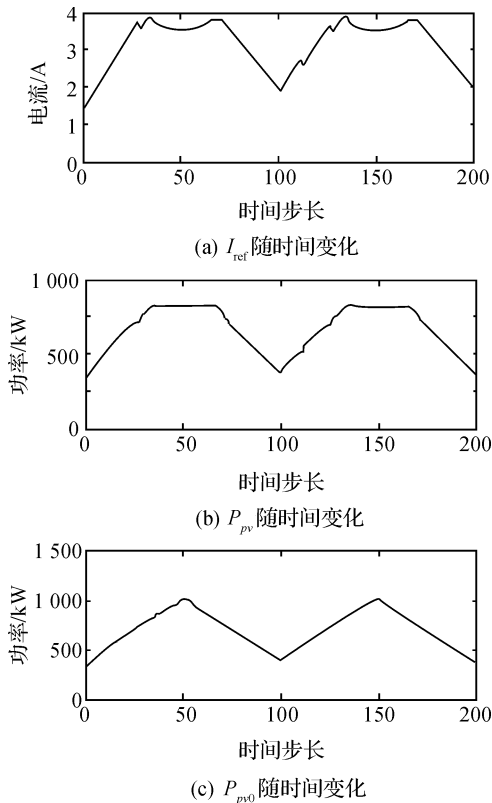


图6 光伏发电系统的控制电流与输出功率

控制器通过合理地改变控制电流 I_{ref} , 达到了削减光伏出力的效果。从 0 时刻起, 随着光照强度的增加, 控制器通过不断增加 I_{ref} 来增大光伏发电系统有功功率的输出, 直到监测装置监测到输出功率超过了所给定的最大允许值 822 kW。在此之前, 光伏发电系统始终运行在最大功率点。在此之后, 控制电流不再随着光照强度的增加而增加, 光伏发电系统离开其最大功率点运行, 从而维持恒定的有功功率输出。在光照强度较大的时段, 控制电流的曲线有向下凹陷的趋势。尽管太阳光照强度在此后的一段时间里都保持在较高水平, 但光伏发电系统的输出功率始终维持在 822 kW 附

近。当光照强度重新下降到较小的数值时, 控制器能及时减小控制电流的数值, 使得光伏发电系统重新回到最大功率输出状态。

4 结束语

本研究提出了一种光伏发电系统的实时出力削减策略, 该策略通过光伏出力削减模型实时计算各个节点光伏发电系统的最大允许出力值, 并将该值传递给光伏发电系统的控制器, 使光伏发电的有功输出得到了合理控制。通过主动控制光伏出力高峰时段配电网有功功率的注入量, 可以避免在大量光伏接入时配电网的潮流、节点电压越限问题的发生。此外, 本研究提出的光伏出力削减策略并不需要添加额外的配套设备, 从而可节省投资费用。

参考文献 (References):

- [1] RAFAEL AMARAL SHAYANI, et al. Photovoltaic generation penetration limits in radial distribution systems [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2011, 26 (3): 1625-1631.
- [2] 王一波, 许洪华. 基于机会约束规划的并网光伏电站极限容量研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 22-28.
- [3] 王松岑, 来小康, 程时杰, 等. 大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 37(1): 3-8.
- [4] TENG JEN HAO. Optimal charging/discharging scheduling of battery storage systems for distribution systems interconnected with sizeable PV generation Systems [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2013, 28(2): 1425-1433.
- [5] 吴雨, 潘文霞. 基于混合储能的微电网功率控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(2): 109-114.
- [6] 朱兰, 严正. 风光储微网系统蓄电池容量优化配置方法研究[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 26-31.
- [7] 赵书强, 刘晨亮. 基于机会约束规划的储能日前优化调度[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3055-3059.
- [8] MIAO FAN. Probabilistic power flow analysis with generation dispatch including photovoltaic resources [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2013, 28(2): 1797-1805.
- [9] 周念成. 光伏与微型燃气轮机混合微网能量管理研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 74-84.
- [10] LIU Xiao-hu. Coordinated control of distributed energy storage system with tap changer transformers for voltage rise mitigation under high photovoltaic penetration [J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2012, 3(2): 897-906.

(下转第 877 页)

本文引用格式:

王力成, 文东山, 周斌, 等. 配电网中光伏功率主动削减策略研究[J]. 机电工程, 2015, 32(6): 863-867, 877.

WANG Li-cheng, WEN Dong-shan, ZHOU Bin, et al. Output curtailment strategy of photovoltaic generation system [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(6): 863-867, 877.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>