

文章编号:0254-0096(2019)03-0817-08

考虑弃光的光储联合电站输出功率控制策略

王 恭¹, 张 栋¹, 李相俊^{2,3}, 曹生现¹, 王城钢³

(1. 东北电力大学自动化工程学院, 吉林 132012; 2. 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院), 北京 100192;
3. 中国国家电网公司驻日本办事处, 东京 106-61151)

摘要: 为减少弃光现象,参考国家标准确定弃光规则,建立计及弃光的光储联合电站输出功率控制目标函数,根据前一时间段历史光储联合输出功率对当前光伏输出功率进行划分,实时确定光伏正常发电区间与弃光区间,并给出各区间内储能系统输出功率范围。基于建立的目标函数采用遗传算法对储能系统输出功率进行优化,确定优化后的储能系统输出功率。最后通过 Matlab 软件仿真,证明优化后的储能系统输出功率配合当前时刻光伏输出功率能在平滑光储联合电站输出功率的情况下,能有效减少或消除弃光现象。

关键词: 弃光; 控制策略; 光伏发电; 储能系统; 智能优化

中图分类号: TM721

文献标识码: A

0 引言

近年来,随着传统化石能源的短缺问题和环境污染问题越来越严重,促使以光伏为代表的新能源发电技术得到快速发展^[1,2]。国家能源局在 2018 年光伏建设运行情况中提到截至 2018 年 9 月底,中国光伏发电装机容量达到 16474.3 万 kW,已成为全球光伏发电装机容量最大的国家^[3]。

由于光伏发电功率具有波动性,大规模光伏发电并网将会直接影响到电力系统运行的稳定性和可靠性,同时会伴有“弃光”现象产生,因此降低光伏发电输出功率的波动对电网运行的安全性与经济性具有重大意义^[4-6]。

储能系统具有能量双向流通的特点,结合此特点来平抑光伏发电输出功率波动,可以在很大程度上降低光储联合发电系统的输出电功率对电力系统的冲击^[7]。现国内外专家学者已经针对光储联合发电系统控制策略做了大量研究。其中,文献[8,9]从滤波角度出发平抑风电目标功率,考虑储能系统荷电状态、平抑效果,并进行滚动实时调节,具有良好的功率平抑效果。文献[10,11]从混合储能角度出

发,采用小波和模糊控制方法,通过与低通滤波方法进行比较证明其优越性。文献[12]采用斜率控制方法,根据电池荷电状态(SOC)进行反馈调节,实现对风光发电功率波动的平抑。文献[13]结合超短期预测技术,对储能系统充放电功率寻优,提高跟踪计划发电出力能力,平抑风电功率波动。本文在分析现有平抑方法的基础上,通过制定弃光策略,建立弃光区间,给出储能系统充放电功率区间,并在平抑目标函数中加入弃光因素,将弃光引入控制策略,降低整个光储联合电站的弃光电量。该策略基于中国某光伏示范电站的运行数据进行仿真验证,证明其有效性。

1 光伏发电功率特性分析

1.1 光伏发电功率曲线

此处分析数据来源于中国某示范工程 40 MW 光伏电站。分别为 2014 年 10 月 7 日晴天和 7 月 5 日多云 2 种天气下的 24 h 光伏发电功率曲线,如图 1 所示。

从图 1 光伏发电功率曲线可看出在晴天时,

收稿日期: 2016-11-04

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0901705); 北京市科技新星计划(Z141101001814094)

通信作者: 李相俊(1979—), 男, 博士、教授级高级工程师, 主要从事电池储能系统控制、新能源与分布式发电、电力系统运行与控制方面的研究。lixiangjun@epri.sgcc.com.cn

光伏发电功率平滑;在多云天气下,光伏功率波动较大。天气状况对光伏输出功率有较大影响,在天气状况较差时光伏输出功率具有较强的波动性。

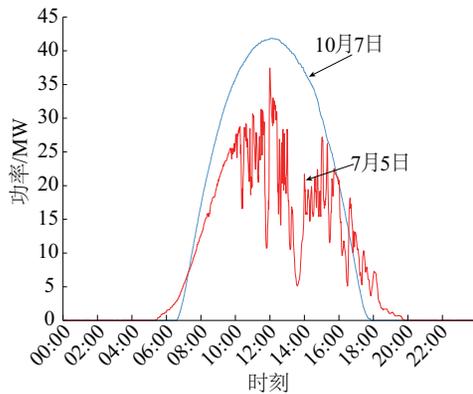


图1 光伏发电功率曲线

Fig. 1 Photovoltaic power curve

光伏发电输出功率的影响因素很多,其中最主要的是光照强度和温度^[14,15]。同样条件下光照强度越大,光伏发电组件发出的电功率也越大;在不同温度下光伏发电组件的发电性能也不相同^[16]。

1.2 光伏发电波动率分布

光伏发电功率波动率 Δ_m 与波动量 P_a 计算公式如式(1)和式(2):

$$\Delta_m = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_c} \quad (1)$$

$$P_a = P_c \times \Delta_m \quad (2)$$

式中, m ——统计时间长度; P_{\max} ——统计时间长度内电站发电功率的最大值; P_{\min} ——统计时间长度内电站发电功率的最小值; P_c ——光伏发电站的装机容量。

以青海某装机容量为 50 MW 的光伏电站为例,该电站在 2016 年 8 月份光伏输出功率 10 min 波动率分布如图 2。如图 2 所示,光伏发电功率 10 min 波动率主要分布在 10% 以下,比重总和超 80%。波动率大于 10% 的比例约为 12.5%,但是波动率超过 50% 的部分仍占有一定比例。考虑到一天 24 h 中光伏有效发电时间仅约为 8 h,因此光伏发电功率 10 min 波动率所占比例会更高。

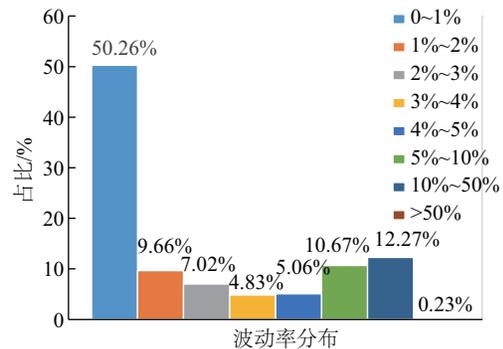


图2 波动率分布

Fig. 2 Distribution of volatility rate

由图 2 数据分析可看出,光伏输出功率具有很大的波动性,且存在比较大的波动率尖峰值,因此在储能系统参与光伏输出功率平抑时,为达到光伏并网波动率要求将会导致弃光现象产生,所以控制储能系统参与光伏输出功率平抑考虑弃光很有必要。

2 考虑弃光的平抑策略

2.1 基本平抑策略

为降低光伏发电功率的波动性,文献[12]已针对储能系统 SOC 和充放电功率提出基本的平抑策略:

1) 当光伏发电功率增加超过目标波动率允许区间上限时,储能系统通过充电吸收光伏发电功率,将联合输出功率限制在波动率允许区间上限。

2) 当光伏发电功率降低越出目标波动率允许区间时,储能系统通过放电,配合光伏发电功率,将联合输出功率限制在波动率允许区间下限。

3) 当光伏发电功率在目标波动率允许区间范围内时,储能系统输出功率为 0。

4) 当储能系统需要输出的功率超出 SOC 和充/放电功率限制时,输出功率为 0。在此策略中,将会出现光伏并网弃光现象,具体弃光策略可参考 2.2.1 节原有光伏电站并网运行时产生弃光现象的情况。

2.2 降低弃光平抑策略

2.2.1 弃光规则

原有国家标准^[17,18]已提到光伏电站并网运行时:当光伏发电功率不满足波动率要求,超过波动率要求的上限时,通过调节光伏并网逆变器,将高于波动要求上限的功率作为弃光功率,允许出现因

太阳能辐照度降低而引起的光伏发电功率有功功率变化超出限值的情况。

本策略确定新的弃光规则如下:

规则 1: 当光伏发电功率不满足波动率要求, 超过波动率要求上限时, 通过储能系统吸收超出波动率要求上限的功率。当吸收功率超出储能系统 SOC 和充放电功率约束时, 调节光伏并网逆变器, 将超出约束部分功率作为弃光功率。其中弃光功率能够发出的电量定义为弃光电量。

规则 2: 当光伏发电功率不满足波动率要求, 且低于波动率要求下限时, 调节光伏并网逆变器以 MPPT 方式工作, 以最大功率输出。此时储能系统放电, 降低光储联合电站的波动率。

2.2.2 目标函数确定与优化

光储联合电站平抑策略目标函数表达式, 即式(3), 具体如下:

其中,

$$\min G = a_1 F_1 + a_2 F_2 + a_3 F_3 \quad (3)$$

$$F_1 = \text{abs}(S_{\text{soc}}(t) - S_{\text{soc_ref}}) \times 2 \quad (4)$$

$$F_2 = \text{abs}(P_{\text{bess}}(t)/P_b) \quad (5)$$

$$F_3 = \text{abs}\left\{\frac{1}{P_{\text{bess}}(t)/[P_p(t) - P_{\text{zmax}}(t)]}\right\} \quad (6)$$

式中, G —— 目标函数; F_1 —— SOC 偏离因子; F_2 —— 放电深度因子; F_3 —— 弃光因子; a_1 —— SOC 偏离因子权重系数; a_2 —— 放电深度因子权重系数; a_3 —— 弃光因子权重系数; $S_{\text{soc}}(t)$ —— t 时刻储能系统的荷电状态; $S_{\text{soc_ref}}$ —— 储能系统 SOC 参考值; P_b —— 储能系统所能允许的最大充电/放电功率; P_{zmax} —— 波动率允许的最大光伏输出功率值; $P_p(t)$ —— t 时刻光伏电站的输出功率。

在考虑储能系统 SOC 偏离程度和充放电功率的情况下, 加入弃光因素建立策略目标函数。在目标函数中可通过调节各因子权重系数的大小来调整对应因子的作用效果。其中加入弃光因素的目的在于提高光储联合电站的太阳能利用率, 提高电站的经济效益。

目标函数中 SOC 偏离因子 F_1 大小通过实时 SOC 值与设定 SOC 参考值差的绝对值来决定。此值越大说明实时 SOC 值与 SOC 参考值差别越大, 即当前时刻 SOC 值偏离 SOC 参考值越大。其中包括 2 种极端情况, 即 SOC 达到电池的 SOC 上限或

下限。目标函数设立该因子的目的在于, 实时调节 SOC 趋近于 SOC 参考值。

目标函数放电深度因子 F_2 通过储能系统输出功率与储能系统所能允许的最大充电/放电功率的比值来确定。目标函数设立该因子的目的在于尽量降低储能系统输出功率, 降低储能系统使用寿命损耗。

弃光因子 F_3 为储能系统充电功率与储能系统不参与功率输出时弃光功率比值绝对值的倒数。即, 通过储能充放电利用的弃光功率占当前时刻总弃光功率的比例, 来衡量储能系统减少弃光的作用效果。目标函数设立该权重因子的意义在于让储能系统尽量吸收弃光功率, 来消除或降低弃光功率。

目标函数对储能系统输出功率区间内的功率值进行寻优计算, 确定输出功率区间内能使目标函数 G 取得最小值的功率值。即寻优计算的结果充分考虑储能系统 SOC 偏离程度、放电深度来使光储联合电站发出更多的功率, 充分利用太阳能。计算过程中可通过调节 a_1 、 a_2 、 a_3 、 $S_{\text{soc_ref}}$ 的值, 实时调整储能系统 SOC、充放电功率、弃光因子对目标函数的影响程度。其中弃光因子权重系数只有在光伏发电输出功率在弃光区间时才有作用, 其他区间 a_3 为零。

2.2.3 储能输出功率区间

基于本文制定的弃光规则和平抑目标函数, 确立光伏功率弃光区间与正常发电区间。步骤如下:

1) 通过光储联合发电历史数据, 计算出 P_{pmax} 、 P_{pmin} 。其中 P_{pmax} 、 P_{pmin} 分别是计算时间长度 m 内光储联合发电功率的最大值、最小值。

2) 判断 P_{pmax} 与 P_{pmin} 之间的差值。若差值小于波动量 P_a 时, 直接计算弃光区间 B、C、D、E 与正常发电区间 A 的功率上下限; 若 P_{pmax} 与 P_{pmin} 之间的差值大于波动量 P_a 时, 则进行区间修正。区间修正为:

$$P_{\text{pmax}} = P_{\text{pmax}} \quad (7)$$

$$P_{\text{pmin}} = P_{\text{pmax}} - P_a \quad (8)$$

3) 确定正常发电区间 A; 弃光区间 B、C、D、E。其中区间 B、D 参照弃光规则 1, 通过储能系统降低弃光电量; 区间 C、E 参照弃光标准 2, 通过储能降低光储联合电站波动率。区间划分及各区间上下限如图 3 所示。

各区间上下限计算方法如下:

$$P_{zmax} = P_{pmin} + P_a \quad (9)$$

$$P_{zmin} = P_{pmax} - P_a \quad (10)$$

$$P_{cmax} = P_{zmax} - P_{ch} \quad (11)$$

$$P_{cmin} = P_{zmin} - P_{disch} \quad (12)$$

式中, P_{ch} ——储能系统最大充电功率; P_{disch} ——储能系统最大放电功率。储能系统输出功率, 充电为负, 放电为正。

弃光调节区间 D	区间 D 上限: P_c
充电调节区间 B	区间 D 下限; 区间 B 上限: P_{cmax}
正常发电区间 A	区间 B 下限; 区间 A 上限: P_{zmax}
放电调节区间 C	区间 A 下限; 区间 C 上限: P_{zmin}
弃光调节区间 E	区间 C 下限; 区间 E 上限: P_{cmin}
	区间 E 下限: 0

图3 区间划分及区间上下限示意图

Fig. 3 Sketch map of interval partition and upper and lower bounds of interval

光伏发电区间对应区间储能系统充放电功率如表 1 所示。

表 1 储能系统充放电控制策略

Table 1 Charge and discharge control strategy of energy storage system

光伏发电功率区间	储能系统输出功率区间
A	$P_{ch} \sim P_{disch}$
B	$P_p - P_{zmin} \sim P_p - P_{zmax}$
C	$P_p - P_{zmin} \sim P_p - P_{zmax}$
D	$P_{ch} \sim 0$
E	P_{disch}

2.2.4 寻优计算

针对光储联合电站平抑策略目标函数, 对储能系统输出功率区间内功率进行寻优计算。储能系统 SOC 限制和充放电深度限制分别如式(13)、式(14)。

$$S_{soc_low} \leq S_{soc}(t) \leq S_{soc_hi} \quad (13)$$

$$P_{ch} \leq P_{bess}(t) \leq P_{disch} \quad (14)$$

式中, S_{soc_hi} ——储能系统能量存储 SOC 上限值; S_{soc_low} ——储能系统能量存储 SOC 下限值。

采用遗传算法(genetic algorithm, GA)针对储能

系统输出功率区间进行寻优计算。

遗传算法是模拟生物在自然环境中的优胜劣汰规则, 使用遗传和进化形成的一种具有自适应能力, 全局性的概率搜索算法。算法主要包括:

1) 编码。本文将算法寻优的储能系统输出功率区间映射到二进制编码空间, 具体每一个二进制数对应储能系统输出功率值。这个二进制数对应算法中的染色体, 其中每位数的 0 或 1 代表染色体的基因。

2) 选取适应度函数。适应度函数即为优胜略汰、适者生存的选择标准。将染色体带入适应度函数, 计算所得的值为该染色体对应的表现型。对应表现型越好的染色体, 被后代遗传的概率越大。此处适应度函数即为平抑策略目标函数, 通过目标函数来评价储能系统输出功率值的优劣。

3) 针对选取的染色体进行交叉、变异。染色体通过交叉更能将染色体中的优秀基因集中到一起, 变异更是增加了染色体基因的更多可能性。

4) 进行迭代运算, 求出最优解, 将最优解映射回解空间, 即解出储能系统最优输出功率。

针对本策略优化计算部分进行试验测试。迭代次数为 100 时, 单点最优功率计算时间仅为 62 ms, 相比于在实际运行控制中, 储能系统控制周期为 1 s, 影响较小。因此本策略优化速度可满足实际需求。

3 仿真实例

本文根据中国某光伏示范电站 7 月 5 日多云天气的实际功率数据, 基于 Matlab 软件进行仿真验证。该示范电站光伏发电装机容量 $C_p = 40 \text{ MW}$, 配备储能系统容量 $C_{bess} = 14 \text{ MW} \times 1 \text{ h}$ 。波动率要求 10 min 有功功率变化不超过装机容量的 10%。

1) 情景 1 光储联合电站储能系统不参与工作, 按照光伏原始发电功率输出功率。

2) 情景 2 光储联合电站参照基本平抑策略运行。

3) 情景 3 光储联合电站按照本文提出的考虑弃光的控制策略。基本参数设置: 在区间 A、C、E 时 $a_1 = 0.5$ 、 $a_2 = 0.5$ 、 $a_3 = 0$; 在区间 B、D 时 $a_1 = 0.25$ 、 $a_2 = 0.25$ 、 $a_3 = 0.5$ 。GA 参数设置: 迭代次数为 100、群体规模为 50、交叉概率 0.8、变异概率 0.05、 $S_{soc_low} = 0.1$ 、 $S_{soc_hi} = 0.9$ 。

图 4 示出了 3 种情况下光储联合电站输出功率走势。从图中情景 1 对比情景 2、情景 3 可看出原始光伏输出功率走势波动较多,且波动幅度较大,当储能系统参与光伏输出功率平抑后,能有效降低光伏输出功率波动值,降低光伏输出功率波动率。情景 2 和情景 3 可对比看出在原始光伏输出功率波动较大的区域,由于储能系统限制,考虑弃光的控制策略具有更好的平抑效果。

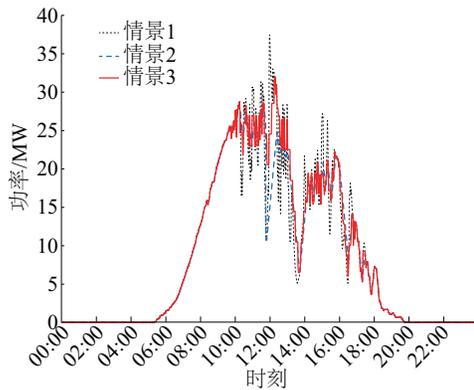


图 4 光储联合出力曲线

Fig. 4 Curve of the PV/battery power

图 5 示出了 3 种情景下光储联合电站输出功率波动率走势。对比情景 1,情景 2 能够将光储联合电站输出功率波动率控制在 10 min 10%以内,但存在个别超出波动率要求的点。在情景 2 中,虽然个别点不满足波动率要求,但仍低于原始波动率。对比情景 2,由于情景 3 策略中考虑弃光规则,储能系统在弃光区间中能够在储能系统 SOC 和放电功率限制范围内尽量平抑输出功率波动,因此能将光储联合输出功率波动率完全控制在波动率要求范围内。

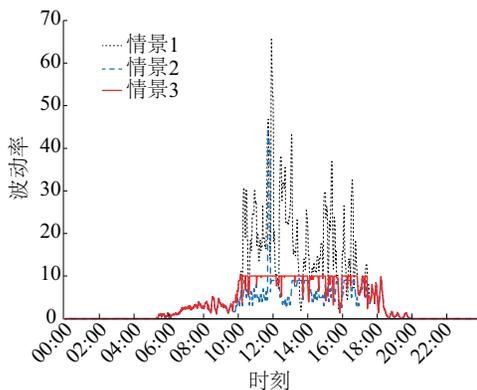


图 5 波动率曲线图

Fig. 5 Curve of volatility rate

图 6 示出情景 2 和情景 3 这 2 种情况下光储联合电站中储能系统 SOC 走势图。从图 6 可看出 2 种情景下,储能系统充放电状态转换次数基本相同,并且 SOC 都能够满足区间 0.1~0.9 的要求。表 2 更是示出 2 种情景下储能系统充电、放电电量统计结果,对比发现,2 种情景中,储能系统一天充、放电电量大幅度低于储能电站容量,并且都为浅充浅放。对比情景 2,情景 3 储能系统充、放电电量略有减少。从图 6 中还可看出,情景 2 经过一天的循环后, SOC 能回归到 0.50 附近,但情景 3 经过一天循环后储能系统 SOC 从 0.50 变为 0.21。针对情景 3,经过一天循环后,储能系统 SOC 不能回归到 0.5 附近这种情况,用本文数据进行 5 次迭代试验。

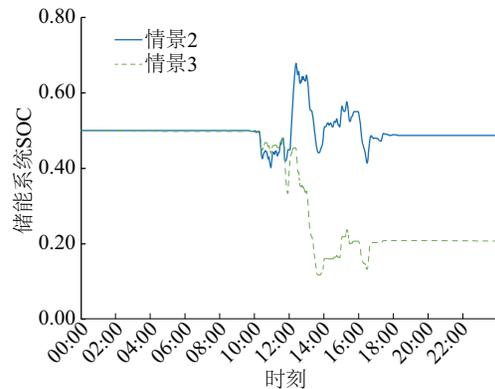


图 6 SOC 曲线图

Fig. 6 Curve of SOC

表 2 储能系统充放电电量统计表

Table 2 Statistical table of charge and discharge of energy storage system

策略	充电电量/MWh	放电电量/MWh
情景 2	10.56	10.74
情景 3	5.83	9.88

将试验初始参数中储能系统初始 SOC 值定为 0.21,并将此次计算结果 SOC 值重新赋值给系统初始 SOC 值,连续进行 5 次循环计算。如表 3,计算结果表明,情景 3 策略经过 5 次循环后,储能系统 SOC 初始值和结束值没有超出 SOC 限制,并且稳定在 0.21 附近。统计稳定情况下储能系统充放电电量为 8.5 MWh,仍低于情景 2 策略下充放电电量。

表 4 统计了 3 种情景下光储联合电站的弃光

电量。情景 2、情景 3 的结果表明,储能系统配合光伏电站工作能够降低光伏电站的弃光率,验证了储能系统配合光伏电站组成光储联合系统的必要性。对比情景 2,情景 3 能在储能系统配合减少弃光电量的基础之上,充分考虑弃光因素,再次降低光储联合系统的弃光电量,证明本文策略的正确性与有效性。

表 3 SOC 迭代运算结果

Table 3 Results of SOC iterative operation

迭代次数	初始 SOC	介绍 SOC
1	0.5	0.21
2	0.21	0.22
3	0.22	0.20
4	0.20	0.21
5	0.21	0.22

表 4 弃光电量统计

Table 4 Energy of photovoltaic power curtailment

策略	电量/MWh
情景 1	0.5
情景 2	0.21
情景 3	0.22

4 结 论

本文提出计及弃光的光储联合输出功率平抑策略。该策略参考国家标准,确定弃光规则,在考虑储能系统 SOC、放电深度情况下,加入弃光因子建立光储联合电站平抑策略目标函数,针对历史光储联合输出功率实时确定弃光区间与正常发电区间,给出储能系统输出功率范围,并根据平抑策略目标函数对储能系统输出功率范围内的功率值进行寻优计算,最终确定当前时刻储能系统输出功率值。仿真结果表明本策略能够在满足功率平抑目标情况下,利用储能装置降低光储联合输出,并且可有效的减少弃光电量,提高联合电站的光伏利用效率。

[参考文献]

- [1] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012, 104—117.
- [1] Liu Zhenya. Electric power and energy in China [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012, 104—117.
- [2] 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(2): 101—107.
- [2] 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(2): 101—107.
- [3] 国家能源局. 2018 年前三季度光伏建设运行情况 [EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2018-11/19/c_137617256.htm, 2018-11-19.
- [4] 陈 炜, 艾 欣, 吴 涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 33(2): 26—32.
- [4] Chen Wei, Ai Xin, Wu Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 33(2): 26—32.
- [5] Cheng F, Willard S, Hawkins J, et al. Applying battery energy storage to enhance the benefits of photovoltaics [A]. 2012 IEEE Energytech [C], Cleveland, OH, USA, 2012: 1—5.
- [6] Li Xiangjun, Yao Liangzhong, Hui Dong. Optimal control and management of a large-scale battery energy storage system to mitigate fluctuation and intermittence of renewable generations [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(4): 593—603.
- [7] 国家电网公司“电网新技术前景研究”项目咨询组. 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, 2013, 37(1): 3—8.
- [7] Consulting group of state grid corporation of China to prospects of new technologies in power systems. An analysis of prospect for application of large-scale energy storage technology in power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 3—8.
- [8] 丁 明, 林根德, 陈自年, 等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 1—6.
- [8] Ding Ming, Lin Gende, Chen Zinian, et al. A control strategy for hybrid energy storage system [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 1—6.
- [9] 沈 枢, 张沛超, 李中豪, 等. 平抑长短期风电功率

- 波动的风储协调运行方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 12—18.
- [9] Shen Shu, Zhang Peichao, Li Zhonghao, et al. A coordination operation method of wind power and energy storage hybrid system for smoothing short-term and long-term wind power fluctuations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 12—18.
- [10] 吴振威, 蒋小平, 马会萌, 等. 用于混合储能平抑光伏波动的小波包-模糊控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 317—324.
- [10] Wu Zhenwei, Jiang Xiaoping, Ma Huimeng, et al. Wavelet packet-fuzzy control of hybrid energy storage systems for PV power smoothing[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 317—324.
- [11] Li Xiangjun, Li Yong, Han Xiaojuan, et al. Application of fuzzy wavelet transform to smooth wind/PV hybrid power system output with battery energy storage system[J]. Energy Procedia, 2011, 12(39): 994—1001.
- [12] Li Xiangjun, Hui Dong, Lai Xiaokang. Battery energy storage station (BESS)-based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 464—473.
- [13] 闫鹤鸣, 李相俊, 麻秀范, 等. 基于超短期风电预测功率的储能系统跟踪风电计划出力控制方法[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 432—439.
- [13] Yan Heming, Li Xiangjun, Ma Xiufan, et al. Wind power output schedule tracking control method of energy storage system base on ultra-short term wind power prediction[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 432—439.
- [14] 徐瑞东. 光伏发电系统运行理论与关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- [14] Xu Ruidong. Study on theory and key technology of photovoltaic system operation [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [15] 张雪莉, 刘其辉, 马会萌, 等. 光伏电站输出功率影响因素分析[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(5): 75—81.
- [15] Zhang Xueli, Liu Qihui, Ma Huimeng, et al. Analysis of influencing factor of output power of photovoltaic power plant[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(5): 75—81.
- [16] 尚 华, 王惠荣. 太阳能光伏发电效率的影响因素[J]. 宁夏电力, 2010, (5): 48—57.
- [16] Shang Hua, Wang Huirong. Analysis on the factor affecting the efficiency of solar energy photovoltaic power generation[J]. Ningxia Electric Power, 2010, (5): 48—57.
- [17] 国家电网公司. Q/GDW617—2011 光伏电站接入电网技术规定[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [17] State Grid. Q/GDW617—2011 Technical rule for photovoltaic power station connected to power grid [S]. China Electric Power Press, 2011.
- [18] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19964—2012 光伏电站接入电力系统技术规定[S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2012.
- [18] Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T19964—2012 Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system [S]. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2012.

CONTROL STRATEGY OF PHOTOVOLTAIC-ENERGY STORAGE POWER GENERATION SYSTEM CONSIDERING PHOTOVOLTAIC POWER CURTAILMENT

Wang Gong¹, Zhang Dong¹, Li Xiangjun^{2,3}, Cao Shengxian¹, Wang Chenggang³

(1. School of Automation Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. State Key Laboratory of New Energy and Energy Storage Operation Control (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China;

3. State Grid Japan Representative Office, Tokyo 106-6115, Japan)

Abstract: In order to reduce the limitation of photovoltaic power generation, according to the national standard, the article proposed the curtailment standard of photovoltaic power and the photovoltaic volatility control target also be established. According to the historical power output of photovoltaic-energy storage power generation system the previous time period, the current PV power output was real time divided into photovoltaic normal power generation section and photovoltaic power curtailment section. The power output of energy storage system also be established. Using genetic algorithm to optimize the output power, the control strategy was finally determined energy storage system power output. Finally, the effectiveness of the control strategy proposed was verified through the simulation in Matlab. The simulation results showed that the control strategy can not only smooth the photovoltaic-energy storage power generation system's output power, but also effectively reduce the phenomenon of photovoltaic power curtailment.

Keywords: photovoltaic power curtailment; control strategies; photovoltaic power generation; energy storage system; intelligent optimization