

DOI: 10.7667/PSPC170730

# 基于 PQ-QV-PV 节点的光储输出功率主动控制方法

翟建伟, 张勇军, 刘斯亮, 程小华

(华南理工大学, 广东 广州 510640)

**摘要:** 光伏接入配电网易产生电压越限问题, 储能的有功调压能力和光伏逆变器的无功调压能力可向配电网提供有功和无功支撑, 以减少电压越限并提高光伏的渗透率。通过分析光伏出力波动时光伏逆变器和储能对光伏并网点电压调节机理, 提出了一种基于 PQ-QV-PV 节点转换的光储输出功率主动控制方法。该方法首先给各个光伏并网点设置一个较小的电压波动范围, 其次依照所提的主动控制策略将光伏并网节点类型根据并网点电压水平依次在 PQ、QV 和 PV 节点之间进行转换, 从而在考虑减少网损的基础上将并网点电压限制在较小的范围内。仿真分析结果表明, 该方法能很好地解决光伏接入下的电压越限问题。

**关键词:** 光伏发电; PQ-QV-PV 节点; 电压约束; 储能; 光伏逆变器

## Active control strategy on photovoltaic-storage systems based on extended PQ-QV-PV node

ZHAI Jianwei, ZHANG Yongjun, LIU Siliang, CHENG Xiaohua  
(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The problem of voltage exceeding specified limits may occur when the photovoltaic is connected to the distribution network. The active power regulation ability of Energy Storage (ES) and the reactive power regulation ability of grid-connected photovoltaic inverter can provide support of active power and reactive power for distribution network to solve the problem of voltage exceeding specified limits and improve the penetration of photovoltaic. A strategy of actively controlling the output power for photovoltaic-storage system based on extended PQ-QV-PV node is proposed by analyzing the voltage regulating mechanism of Point of Common Coupling (PCC) of photovoltaic with energy storage by controlling photovoltaic inverter and energy storage when PV output fluctuates. The strategy firstly sets a small wave range of voltage to every photovoltaic, then according to the proposed active control strategy converts the types of PV grid-connected nodes among PQ, QV, and PV successively based on voltage level of grid-connected node, thereby controls the grid-connected level into a smaller range considering power loss decrease. The simulation results indicate that the proposed method can solve the problem of voltage exceeding specified limits when photovoltaic is connected to electric distribution network.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377060).

**Key words:** photovoltaic power generation; PQ-QV-PV node; voltage limits; energy storage; photovoltaic inverter

## 0 引言

分布式光伏发电(Distributed Photovoltaic Power Generation, DPPG)作为清洁能源的一种, 可将太阳能直接转化成电能使用。随着 DPPG 发电技术的发展成熟, 越来越多的 DPPG 接入到配电网, 在给人类用电带来便利的同时也给电网的安全运行带来挑战<sup>[1-2]</sup>。DPPG 并入配电网后, 原来的传统辐射状单电源配电网变为双向供电多电源结构, 并且光伏

发电的间歇性、随机性、波动性和不可调度性以及负荷的不确定性很容易引起潮流逆向流动, 并可能导致谐波、直流注入、闪变和电压越限等一系列电能质量问题<sup>[3-5]</sup>, 降低配电网的可靠性, 也将限制 DPPG 的并网能力。

针对分布式光伏接入配电网所引起的电压越限, 通过定功率控制<sup>[3]</sup>来调节并网点电压是其最主要的解决方法。文献[6]提出自适应性有功限制无功补偿控制方法以抑制过电压; 文献[7]根据光伏并网点电压越限程度将配电网分为正常情况和紧急情况, 分别依靠光伏自身逆变器和同一馈线上的光伏

系统的无功功率来进行电压调节；文献[8]使用分布式光伏逆变器自动电压与功率因数控制方式降低光伏并网点电压；文献[9]研究了基于瞬时电压-电流控制的动态电压控制方法；文献[10]提出一种考虑负荷和光伏出力不确定性的鲁棒区间电压调整策略；文献[11]建立了基于有功-无功协调优化的过电压预防控制方法；文献[12]提出一种新型主动功率优化控制策略来防止低压馈线过电压现象发生。

DPPG并网后配网电压越上限主要是在负荷较轻且光伏输出较大的时刻发生。由于配电网线路阻抗比 $R/X$ 较大，其中的电压抬升量很大一部分是由于有功潮流在电阻上产生的分量，而另一部分才是由于无功潮流在电抗上产生的分量。单纯依靠无功的调节对电压控制的效果有限，抑制过电压所需逆变器的无功也将很大，而上述逆变器无功控制策略对光伏容量限制和线路载流量限制的依赖性较高。要有效解决电压抬升量的有功分量，最有前景的方式就是采取分布式储能<sup>[13-16]</sup>与DPPG联合运行，利用储能实现电压越限时的控制。

光储结合可有效弥补和降低光伏发电的随机性、波动性和间歇性，对改善光伏发电品质，协调电网调峰，稳定电压波动等具有重要作用。文献[17]以经济性和可靠性为双目标进行储能配置；文献[18]提出了考虑电压约束的抑制光伏并网电压扰动的配电网储能配置方法；文献[19]将光储并网点扩展为QV节点，并提出固定并网点电压的光储联合日前规划，但该文献缺乏对配电网的经济性运行的考虑。

以上文献从控制光伏并网点的电压、光储结合以及光伏逆变器的控制方面进行了相关的研究，但是对于光储联合系统的并网节点的内涵缺乏针对描述，没有考虑通过转换光伏-储能并网点的节点类型达到主动控制并网点电压目的的研究。

本文首先分析了光伏逆变器和储能对并网电压的影响，然后在详细分析了文献[19]QV节点潮流计算的基础上，设计了基于PQ-QV-PV节点变换的光储输出功率主动控制方法，为每个逆变器和储能提供相对最优功率参考值，不需要依赖各个节点之间的通信联系，有效地将光储并网点的电压限制在一定的范围。

## 1 光储联合抑制配网电压扰动机理

为了充分利用光伏所产电能，DPPG常以单位功率因数并网，而储能具有平衡有功功率输出的特点，改变传输在等值电阻上的电压降，因此可有效调节光伏接入点的电压<sup>[18]</sup>。另外，DPPG的容量限制了光伏输出的有功和光伏逆变器输出的无功，当

DPPG的有功小于其额定功率时，光伏逆变器可以向配电网输送无功功率以减少并网点电压越限现象的发生。

图1为光伏并网等值电路的简化模型。图中：PV是分布式光伏电源； $R$ 和 $X$ 分别为线路电阻和电抗； $V_{pcc}$ 为光伏并网点的电压； $V_s$ 为低压配电网系统等值电压； $P_{pv}$ 和 $Q_{pv}$ 分别为光伏发出的有功和无功功率； $P_L$ 和 $Q_L$ 分别是光伏接入点当地的有功和无功负荷。

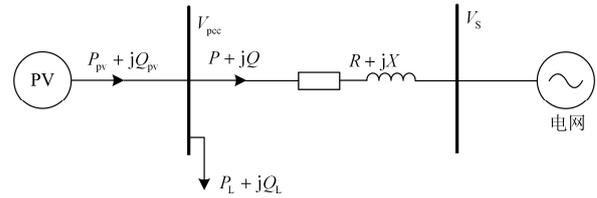


图1 光伏并网等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit of grid-connected PV system

$V_{pcc}$ 通过式(1)计算得出。

$$\dot{V}_{pcc} = V_s - \frac{(P_L - P_{pv})R + (Q_L - Q_{pv})X}{V_{pcc}} - j \frac{(P_L - P_{pv})X - (Q_L - Q_{pv})R}{V_{pcc}} \quad (1)$$

由式(1)得

$$V_{pcc} = \sqrt{\frac{V_s^2 - 2a + \sqrt{V_s^4 - 4aV_s^2 - 4b^2}}{2}} \quad (2)$$

式中： $a$ 、 $b$ 分别如式(3)、式(4)所示。

$$a = (P_L - P_{pv})R + (Q_L - Q_{pv})X \quad (3)$$

$$b = (P_L - P_{pv})X - (Q_L - Q_{pv})R \quad (4)$$

以下根据 $P_{pv}$ 和 $P_L$ 的大小分两种情况进行分析。

1) 当DPPG输出有功小于本地局部有功负荷(即 $P_{pv} < P_L$ )时，由配电网侧流向光伏并网点的功率是 $P_L - P_{pv}$ ，据式(2)计算出并网点电压可知，若 $P_{pv}$ 出力很小而负荷重载时， $a$ 值很大，则 $V_{pcc}$ 可能会越下限。这时，如果在光伏并网点处配置储能发出有功功率，或者使光伏逆变器向系统发出(感性)无功功率，都有助于将并网点电压抬升到合格范围之内，从而提高电压质量。

2) 当DPPG输出有功大于本地局部有功负荷(即 $P_{pv} > P_L$ )时，由光伏流向配电网的功率是 $P_{pv} - P_L$ 。因此在计算并网点电压时用 $P_{pv} - P_L$ 代替 $P_L - P_{pv}$ ，用 $Q_{pv} - Q_L$ 代替 $Q_L - Q_{pv}$ ，然后重新计算 $a$ 、 $b$ ，进而计算出这种情况下并网点电压。该情况下若 $P_{pv}$ 出力较大且系统轻载时，则 $V_{pcc}$ 可能会越上限。这时，

如果在光伏并网点处配置储能吸收有功功率, 或者使光伏逆变器向系统吸收(感性)无功功率以拉低并网点的电压, 则投入储能和逆变器有助于提高电压质量。

## 2 光储联合并网点的 QV 节点描述

电力系统传统潮流计算根据给定变量的不同将系统中的节点分为 PQ、PV 和平衡节点<sup>[20]</sup>。随着 DPPG 渗透率的不断提高, 配电网的潮流分布发生的变化会影响到配电网的电压稳定。通常情况下, 为了最大化利用清洁能源, DPPG 通常只发有功功率, 将功率因数设定为 1.0 运行。

DPPG 的接入可能造成光伏并网点处电压的抬高甚至越限风险。因此在调节 DPPG 电压的前提下, 光伏容量和储能容量的确定过程中将光储并网点的有功输出作为未知量<sup>[20]</sup>。由此, 衍生出了含 QV 节点的潮流计算问题, 对 QV 节点, 等值电源的无功和等值负荷是给定的, 节点电压的大小也是给定的, 待求量则是等值电源的有功和节点电压的相位角。一般将具有有功出力裕度并严格控制电压的纯有功电源选作 QV 节点, 例如配置储能并严格约束电压的 DPPG 等<sup>[18]</sup>。使用牛顿-拉夫逊法计算拓展 QV 节点的电力系统潮流计算的详细步骤见文献<sup>[19]</sup>。

将光储联合并网点当作 QV 节点计算时, 电压幅值  $V$  的确定是一个关键问题, 目前国内外关于  $V$  的设定主要依靠光伏系统历史运行数据和专家经验, 其次将  $V$  设为一个定值所计算得到的配电网潮流不一定是最优潮流, 当 DPPG 在配电网中的渗透率高时, 若将其选作 QV 节点, 储能的调节运行代价可能偏高。

## 3 光储输出功率主动控制策略

光储结合能够利用储能吸收光伏发出的有功以防止电压越限。传统的光储联合系统输出模式将光储输出有功功率固定为某限定确定值<sup>[21-23]</sup>。考虑到光伏出力的不确定性以及负荷的实时波动, 因此, 需要光储联合并网点电压波动尽可能小, 从而实现抑制其他节点电压的波动, 减小电压越限概率。

基于此, 本文综合考虑含光储的配电网的经济性和安全性, 依据光伏并网点的电压幅值、光伏逆变器和储能的容量限制主动将光储联合并网点的节点类型在 PQ、QV 和 PV 节点之间依次进行变换, 在考虑减少配电网网损的基础上, 控制光储联合系统输出的有功功率和光伏逆变器的无功功率, 提高光储联合并网点的电压质量。

基于 PQ-QV-PV 节点的光储输出功率主动控制方法的程序框图如图 2 所示。

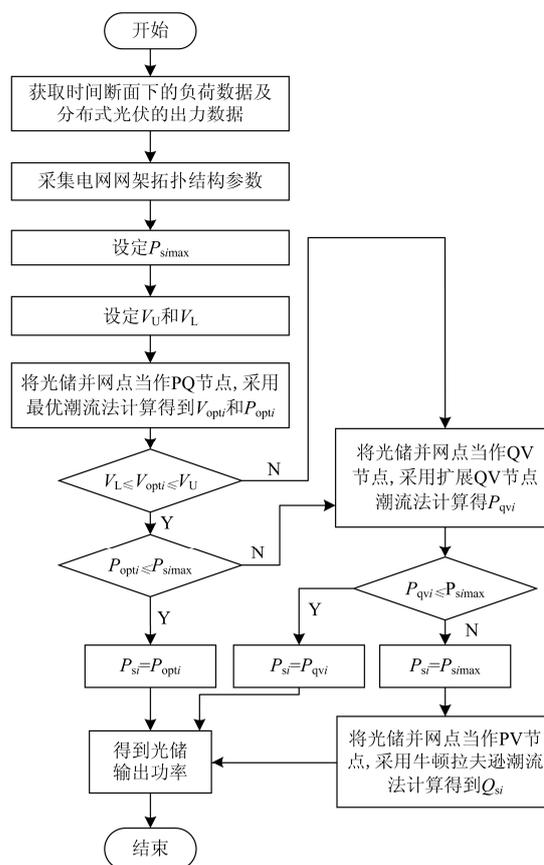


图 2 PQ-QV-PV 节点变换的程序框图

Fig. 2 Program block diagram of the PQ-QV-PV bus alternation

基于 PQ-QV-PV 节点的光储输出功率主动控制策略如下所述。

- 1) 获取配电网架信息数据。
- 2) 根据天气预报和负荷历史数据预测未来一天每个小时的光伏出力和负荷数据。
- 3) 将光储联合并网点作为 PQ-QV-PV 节点, 并设定并网点电压幅值波动范围的上、下限值:  $V_U$ 、 $V_L$ 。
- 4) 将配电网中各光伏并网点类型均设定为 PQ 节点, 以配电网中的有功网损最小为目标函数, 采用内点法计算得到优化后各个光储联合并网点的电压幅值  $V_i$ 、光储联合并网点中储能有功出力  $P_{opti}$  和光伏的无功出力  $Q_{opti}$ ;

对于上述模型, 其中状态变量和控制变量分别为

$$\begin{cases} \bar{x} = [\theta_1 \ V_1 \ \theta_2 \ V_2 \ \cdots \ \theta_n \ V_n] \\ \bar{u} = [P_{p1} \ P_{p2} \ \cdots \ P_{pr} \ Q_{p1} \ Q_{p2} \ \cdots \ Q_{pr}] \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\bar{x}$  是状态变量;  $\bar{u}$  是控制变量;  $V_i$  和  $\theta_i$  分别为第  $i$  个节点的电压幅值和电压相位角;  $P_{pi}$  和  $Q_{pi}$  分别为第  $i$  个节点光储输出的有功和无功功率, 具有  $n$  个节点的电网系统的状态变量共有  $2n$  个, 若有  $r$  个光储并网节点, 则控制变量为  $2r$  个;

本文的目标函数是最小化配电网系统的有功网损。

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in i} G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (6)$$

式中:  $P_{\Sigma}$  为配电网系统的网络损耗;  $G_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  之间的电导;  $\theta_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  之间的电压相角差。

等式约束方程为每个节点的潮流方程。

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{pi} - P_{Li} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{pi} - Q_{Li} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $P_{Li}$  和  $Q_{Li}$  分别为节点负荷有功和无功功率;  $B_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  之间的电纳。

不等式约束条件为

$$\begin{cases} \underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i & (1 \leq i \leq n) \\ \underline{S}_{ij} \leq S_{ij} \leq \bar{S}_{ij} & (1 \leq i \leq n, i \leq j \leq n) \\ \underline{P}_{pi} \leq P_{pi} \leq \bar{P}_{pi} & (1 \leq i \leq r) \\ \underline{Q}_{pi} \leq Q_{pi} \leq \bar{Q}_{pi} & (1 \leq i \leq r) \end{cases} \quad (8)$$

式中: 符号的上横线和下横线分别表示为该变量允许的上下限值;  $S_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  之间的传输容量;  $P_{pi}$  是光储的有功功率;  $Q_{pi}$  是光储的无功功率。

通过最优潮流计算得到储能的有功输出功率  $P_{opti}$  为

$$P_{opti} = P_{pi} - P_{PVi} \quad (1 \leq i \leq r) \quad (9)$$

式中,  $P_{PVi}$  为光储联合并网节点中光伏的有功功率。

5) 判断  $V_i$  是否满足  $V_i \in [V_L, V_U]$ 。若满足, 则令光储联合并网节点中储能的有功输出功率  $P_{si} = P_{opti}$ , 光伏的无功输出功率  $Q_{si} = Q_{opti}$ , 其中  $P_{si} > 0$  表示储能处于放电状态,  $P_{si} \leq 0$  表示储能处于充电状态; 若不满足, 则将越上(下)限的光储联合并网节点由 PQ 节点向 QV 节点转化, 其中  $Q$  设定为 0, 即光伏的无功输出功率  $Q_{si} = 0$ ,  $V$  设定为  $V_U (V_L)$ , 进行含 QV 节点的潮流计算, 得到光储联合发电系统中储能的有功功率  $P_{qvi}$ 。

6) 判断  $P_{qvi}$  是否满足  $|P_{qvi}| \leq P_{smax}$ 。若满足, 则令  $P_{si} = P_{qvi}$ ; 若  $|P_{qvi}| > P_{smax}$ , 则将光储联合并网节点类

型转化成 PV 节点, 其中  $P_{si}$  设定为  $\pm P_{smax}$ ,  $V$  设定为  $V_U (V_L)$ , 用牛顿拉夫逊潮流计算方法计算该配电网潮流, 通过控制光伏逆变器的无功输出将光储联合并网节点的电压约束在合理范围之内。若光伏逆变器出力达到最大值电压仍不满足要求, 可以调动无功补偿装置投切来调节, 如果仍不能解决电压越限问题, 必要时可以采取限制光伏出力的措施来确保电压安全性。

## 4 算例分析

仿真算例选取佛山市某 10 kV 配电网, 为了凸出观察配网中关键节点的电压变化, 将其配电网简化为如图 3 所示的网络拓扑结构, 网络线路参数见表 1。使用 Matlab 建立该 10 kV 配电网的仿真模型, 其中, 将线路首端节点 1 设置为平衡节点,  $V_1 = 1.05$  p.u。节点 6、10 为光伏并网节点, 两者接入容量分别为 800 kW 和 1 000 kW, 光伏出力按照未来一天的光伏预测输出特性曲线变化。该算例选取一天之内的 24 个小时断面进行仿真, 其中负荷预测数据和光伏出力预测数据见图 4、图 5。

为了验证本文所提的基于 PQ-QV-PV 节点的光储输出功率主动控制方法的控制效果, 将本文所提策略与 DPPG 不配置储能, 光伏按照日前计划自由输出方案、文献[19]提出的基于 QV 节点的光储有功控制计划方案、基于最优潮流的光储有功输出限制模式方案相比较, 从而构成了 4 个测试方案。

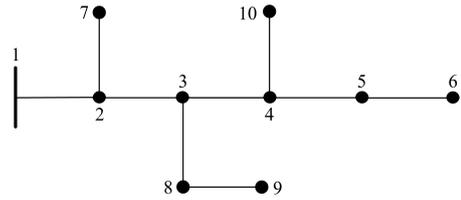


图 3 某 10 kV 配电网拓扑结构

Fig. 3 Topology of a 10 kV distribution network

表 1 线路参数

Table 1 Data of line

首节点号	末节点号	支路电阻/ $\Omega$	支路电抗/ $\Omega$
1	2	0.265	0.462
2	3	0.456	0.627
3	4	0.513	0.706
4	5	0.698	0.798
5	6	0.454	0.519
2	7	0.285	0.392
3	8	0.349	0.399
8	9	0.558 4	0.683 4
4	10	0.314	0.36

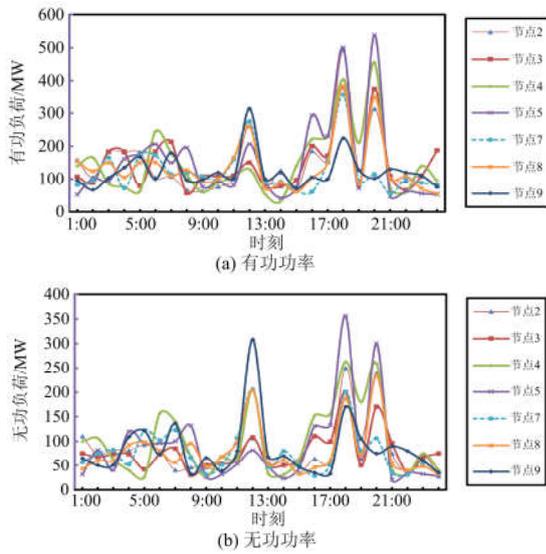


图 4 负荷功率曲线

Fig. 4 Power curve of load

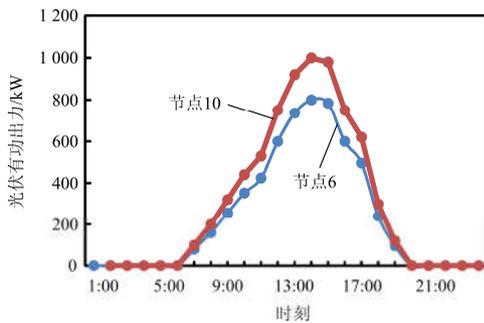


图 5 光伏出力曲线

Fig. 5 Power output curve of PV

方案 1: DPPG 不配置储能, 光伏按照日前计划输出方案。

使用 Matpower 对算例中的配电网进行潮流计算, 得到各个节点的电压分布, 为了研究 DPPG 接入对配电网电压的影响, 选取节点 2、3、5、6、9、10 关键节点, 方案 1 中关键节点的电压变化曲线如图 6 所示。算例仿真结果为电压的标幺值, 10 kV 配电网的电压安全为 0.93~1.07 p.u., 电压曲线中使用“▲”标记配电网中电压越上限的节点。

节点 6 和节点 10 处于光伏接入点, 其电压由于 DPPG 自由输出的间歇性和随机性而不断波动变化, 电压变化相对于其他节点更加剧烈, 节点 6 的电压在 13 点和 14 点都出现了越上限的情况, 13 点和 14 点的光伏输出在一天之内基本达到了最大值。由图 6 可知, DPPG 没有配置储能, 光伏的功率因数设定为 1.0 运行的情况下, 配电网的各个节点的电压波动范围较大, 甚至局部节点会在某时刻出现电压越限的现象。

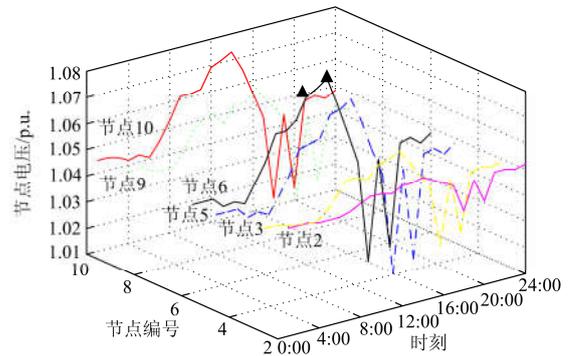


图 6 方案 1 电压曲线

Fig. 6 Voltage curves in case 1

方案 2: DPPG 并网点配置储能, 采用基于 QV 节点的光储有功控制计划方案<sup>[19]</sup>。

此方案储能的输出功率受控于并网点电压, 通过储能的有功输出与光伏出力配合, 维持并网点电压恒定。设定节点 6 和节点 10 的光伏并网点电压为 1.050。则节点 6( $Q=0, V=1.050$ )、节点 10( $Q=0, V=1.050$ )为 QV 节点, 采用基于 QV 节点的潮流计算方法分析方案 2 对含 DPPG 的配电网电压的控制效果。

方案 2 中对储能输出功率进行限制, 其最大输出功率为光伏最大输出功率的 0.7 倍<sup>[19]</sup>, 储能逆变器的容量与储能的最大输出功率相同。当使用基于 QV 节点的潮流计算结果显示储能输出有功越最大输出限制时, 将光储并网点由 QV 节点向 PQ 节点进行转换, 此时储能按照最大功率输出。在方案 2 的控制策略下, 关键节点的电压变化和光储出力分别如图 7 和图 8 所示。

对比方案 1, 方案 2 关键节点的电压变化显然比方案 1 平缓, 并且均不会出现电压越限的情况。由于方案 2 采用基于 QV 节点的光储有功控制计划方案, 使得光储并网点电压得到直接的约束与控制, 相当于系统出现了多个电压相对恒值点, 因此可以

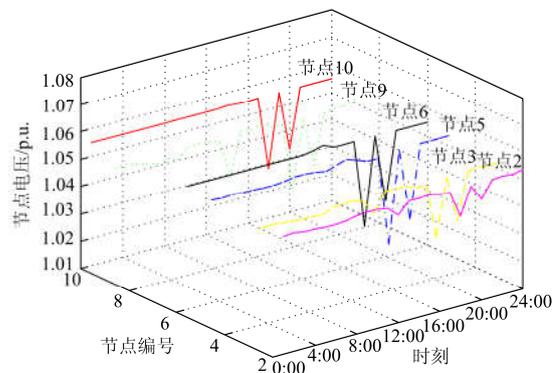


图 7 方案 2 电压曲线

Fig. 7 Voltage curves in case 2

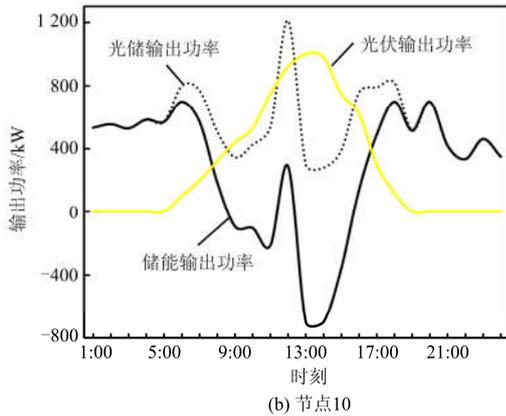
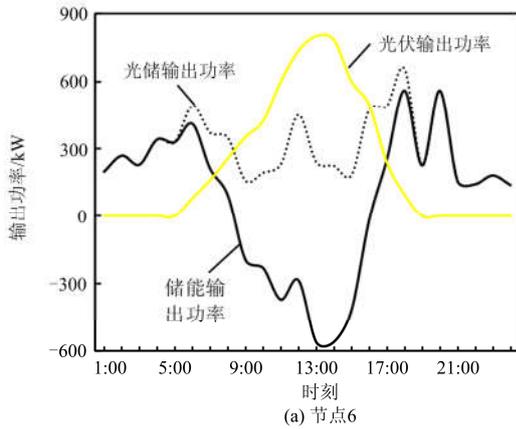


图 8 方案 2 光储出力功率曲线  
Fig. 8 Power curves of PV/ES in case 2

有效提高各个节点的电压质量。但是由于光伏并网节点的储能配置具有最大输出功率约束，当 QV 节点向 PQ 节点进行转化时，电压不能控制在恒定值，亦会产生较大的电压波动，缺少对光伏逆变器无功调压能力的挖掘和利用，对储能容量也有一定的影响。

方案 3: 基于最优潮流的光储有功输出限制模式。

此方案以全网有功功率网络损耗为目标，将光伏并网节点的储能有功和逆变器无功作为控制变量，对配电网进行最优潮流计算。储能的输出功率和储能逆变器的容量配置与方案 2 一致。在方案 3 的控制策略下，关键节点的电压变化和光储系统出力分别如图 9 和图 10 所示。

将方案 2 和方案 3 的关键节点电压曲线进行对比可以发现，方案 3 各关键节点的电压变化明显比方案 2 平缓，并且不会出现电压急剧变化的情况。方案 2 和方案 3 均不会出现电压越限的情况。由于方案 3 将光伏逆变器当作一个控制变量，相对于方案 2 多了一个控制变量，因此可以有效抑制节点电压的波动。

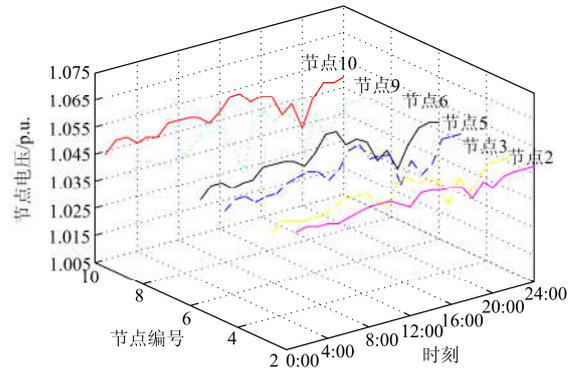


图 9 方案 3 电压曲线

Fig. 9 Voltage curves in case 3

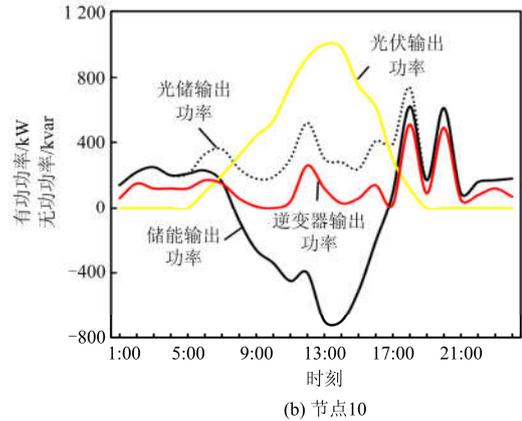
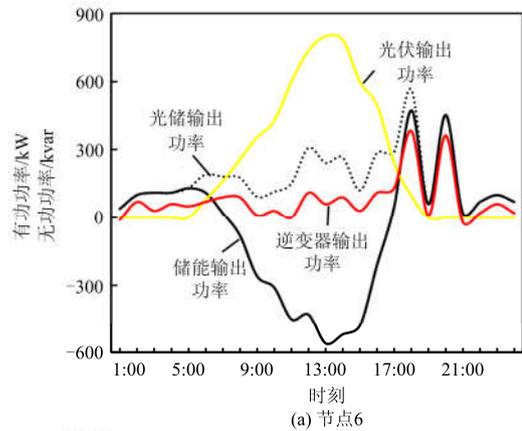


图 10 方案 3 光储系统输出功率曲线

Fig. 10 Power curves of PV/ES/inverter in case 3

方案 4: 基于 PQ-QV-PV 节点的光储输出功率主动控制策略。

此方案即本文提出的主动控制策略，该方案将方案 2 和方案 3 进行有效结合，通过将光储并网节点的节点类型依靠该节点电压的波动依次在 PQ 节点、QV 节点和 PV 节点之间进行转化，使得逆变器的无功输出、储能的有功输出与光伏出力进行配合，维持并网节点的电压稳定。设定节点 6 和节点 10 的光

伏并网点电压为[1.047, 1.053]。采用方案 4 的主动控制策略后, 关键节点的电压变化和光储系统出力分别如图 11 和图 12 所示。

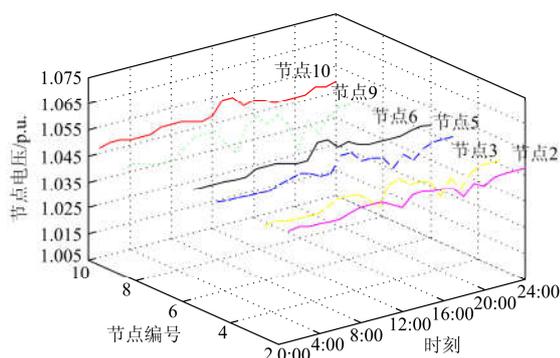
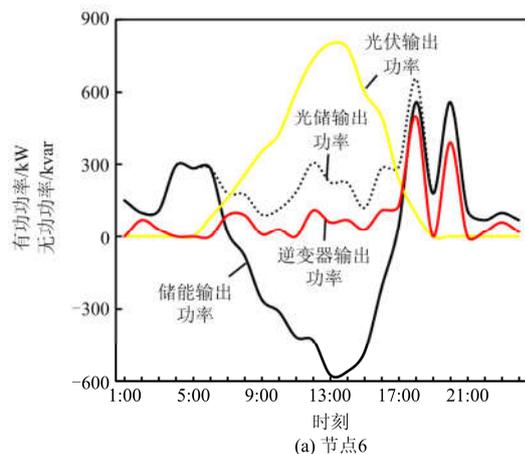
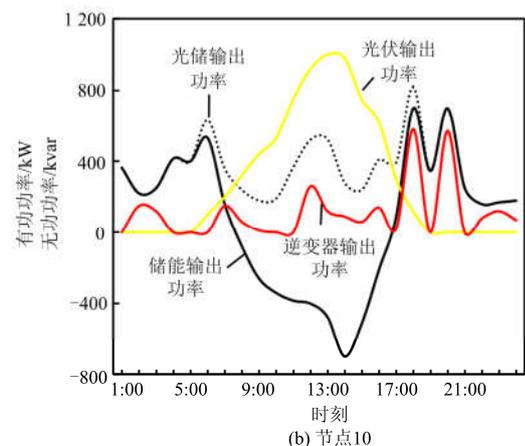


图 11 方案 4 电压曲线

Fig. 11 Voltage curves in case 4



(a) 节点6



(b) 节点10

图 12 方案 4 光储系统输出功率曲线

Fig. 12 Power curves of PV/ES/inverter in case 4

方案 4 配置储能的最大功率限值和储能与方案 2 和方案 3 一致, 但对比方案 2、3、4 的电压波动曲线图, 方案 4 关键节点的电压质量比方案 2、3 更加优质, 且不会出现越限的情况。方案 2、3、4

都需要充裕的储能来对光伏并网点电压进行调控。将储能电池的荷电状态限制范围设定为 10%~90% 以避免储能过度充放电。以储能初始荷电状态为 0.5, 按照式(10)计算储能的最低容量, 在储能充放电功率限制的情况下, 对方案 2、3、4 所需的储能容量  $S_{ES}$  和有功网损进行比较, 如表 1 所示。对比方案 2, 方案 4 的有功网损比方案 2 少 104.929 kW, 储能容量比其少 10.061 MW·h; 对比方案 3, 方案 4 的有功网损比方案 3 多了 17.311 kW, 但所需的储能容量比其少 1.952 MW·h。对比图 11 和图 9, 方案 4 的光伏并网点电压波动范围是方案 3 的 3/10。

$$0.1S_{ES} \leq \sum_{h=0}^{23} P_{Sr}^h \leq 0.9S_{ES} \quad (10)$$

文献[24]比较三种储能设备铅酸电池(LAB), 锂离子电池(LIB)和钠硫电池(SSB)的全年净现值为基础, 本文选取在电力需求侧方更具经济性的钠硫储能进行综合年费用成本对比, 结果表明, 方案 4 的综合年费用比方案 3 的少了 47.053 万元。光储系统的综合年费用  $C$  计算公式如式(11)所示。

$$\begin{cases} C = \frac{P_{\Sigma} T E_p}{\tau} + C_{ES} \\ C_{ES} = \frac{C_{ess} f_{ES} t}{N_{es}} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $T$  是年利用小时数 3 000 h;  $\tau$  是单天时间常数 24 h;  $E_p$  是电价 0.6 元/(kW·h);  $C_{ess}$  是储能容量成本, 钠硫电池的  $C_{ess}$  为 2 980 元/(kW·h);  $f_{ES}$  是光储系统的储能容量;  $N_{es}$  为钠硫电池的总循环次数 4500 次;  $t$  是循环常数 365。

各方案的性能比较见表 2。

表 2 方案的性能比较

Table 2 Performance comparison of cases				
方案序号	节点 6 储能容量/MW·h	节点 10 储能容量/MW·h	有功网损/kW	综合年费用/万元
2	5.201	16.035	184.768	514.683
3	6.925	6.175	62.528	317.111
4	5.190	5.958	79.839	270.058

从以上分析可以看出, 基于 PQ-QV-PV 节点的光储输出功率主动控制方法能够更好地处理光伏并网引起的电压越限问题, 改善潮流分布并具有削峰填谷的作用。另外, 在兼顾运行方式合理的情况下, 还能减少所需的储能容量, 减少储能电池和部分电压调节设备的投资并降低因电压调节设备动作而产生的调节代价。采用基于 PQ-QV-PV 节点的光储联合输出功率主动控制方法的同时兼顾了经济性与安全性, 更好地体现了配置储能的意义。

## 5 结论

本文提出了基于 PQ-QV-PV 节点的光储输出功率主动控制方法, 通过将光伏并网点的节点类型在 PQ-QV-PV 节点之间依次进行转换, 并通过调节储能和光伏逆变器来提高电压质量。主要结论如下:

1) 基于 PQ-QV-PV 节点的光储输出功率主动控制方法能够提高配电网的电压质量, 并有效提高了储能配置的合理性。

2) 提出的并网点电压控制策略能够依靠电压变化主动进行节点转化以此控制储能和逆变器出力, 该策略的储能容量配置更加合理, 产生较少的网络有功损耗, 具有更好的综合经济性。

下一步将储能和光伏逆变器的调节代价同时考虑并建立基于 PQ-QV-PV 节点的光储输出功率主动控制方法的精确数学模型。

### 参考文献

- [1] FAN Jiyuan, BORLASE S. The evolution of distribution[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2009, 7(2): 63-68.
- [2] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.  
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.
- [3] 黄弘扬, 王波, 黄晓明, 等. 基于双馈风电机组的分布式动态无功支撑系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 140-147.  
HUANG Hongyang, WANG Bo, HUANG Xiaoming, et al. Distributed dynamic reactive power support system based on doubly fed induction generator[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 140-147.
- [4] LYONS P F, WADE N S, JIANG T, et al. Design and analysis of electrical energy storage demonstration projects on UK distribution networks[J]. Applied Energy, 2015, 137(1): 667-691.
- [5] 张曦, 张宁, 龙飞, 等. 分布式电源接入配网对其静态电压稳定性影响多角度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 120-125.  
ZHANG Xi, ZHANG Ning, LONG Fei, et al. Research of the impacts on static voltage stability of distribution networks with distributed generation from different aspects[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 120-125.
- [6] 李清然, 张建成. 含分布式光伏电源的配电网电压越限解决方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 117-123.  
LI Qingran, ZHANG Jiancheng. Solutions of voltage beyond limits in distribution network with distributed photovoltaic generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 117-123.
- [7] 陶维青, 鲁胜清, 杨刚, 等. 低压配网中光伏发电系统调压策略[J]. 可再生能源, 2015, 33(9): 1323-1328.  
TAO Weiqing, LU Shengqing, YANG Gang, et al. A voltage regulation strategy of PV system in low-voltage networks[J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(9): 1323-1328.
- [8] 王颖, 文福拴, 赵波, 等. 高密度分布式光伏接入下电压越限问题的分析与对策[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1200-1206.  
WANG Ying, WEN Fushuan, ZHAO Bo, et al. Analysis and countermeasures of voltage violation problems caused by high-density distributed photovoltaics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1200-1206.
- [9] 黄欣科, 王环, 王一波, 等. 光伏发电系统并网点电压升高调整原理及策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 112-117.  
HUANG Xinke, WANG Huan, WANG Yibo, et al. Principle and strategies of voltage rise regulation for grid-connected photovoltaic generation system at point of common coupling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 112-117.
- [10] 王永杰, 吴文传, 张伯明, 等. 有功无功协调的主动配电网鲁棒电压控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 29-34.  
WANG Yongjie, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Active and reactive power coordinated robust optimization for active distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 29-34.
- [11] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于有功一无功协调优化的主动配电网过电压预防控制方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 184-191.  
LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Overvoltage preventive control method based on active and reactive power coordinated optimization in active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 184-191.
- [12] 夏向阳, 易浩民, 邱欣, 等. 双重功率优化控制的规模化光伏并网电压越限研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5164-5171.  
XIA Xiangyang, YI Haomin, QIU Xin, et al. Research on

- dual power optimal control for scaled photovoltaic grid-connected voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5164-5171.
- [13] YAO Liangzhong, YANG Bo, CUI Hongfen, et al. Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems[J]. CSEE Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(4): 519-528.
- [14] XU X, BISHOP M, OIKARINEN D G, et al. Application and modeling of battery energy storage in power systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2016, 2(3): 82-90.
- [15] 徐志成, 赵波, 丁明, 等. 基于电压灵敏度的配电网光伏消纳能力随机场景模拟及逆变器控制参数优化整定[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1578-1587.
- XU Zhicheng, ZHAO Bo, DING Ming, et al. Photovoltaic hosting capacity evaluation of distribution networks and inverter parameters optimization based on node voltage sensitivity[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1578-1587.
- [16] 赵波, 包侃侃, 徐志成, 等. 考虑需求侧响应的光储并网型微电网优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5465-5474.
- ZHAO Bo, BAO Kankan, XU Zhicheng, et al. Optimal sizing for grid-connected PV-and-storage microgrid considering demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5465-5474.
- [17] 兰国军, 栗文义, 尹凯, 等. 并网运行风/光/储微电网容量配置双目标优化[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(3): 18-23.
- LAN Guojun, LI Wenyi, YIN Kai, et al. Bi-objective optimization of capacity configuration based on grid-connected wind/photovoltaic/storage microgrid[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(3): 18-23.
- [18] 朱革兰, 刘泽槐, 刘文泽, 等. 抑制光伏并网电压扰动的配电网储能配置方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(8): 49-54, 61.
- ZHU Gelan, LIU Zehuai, LIU Wenzhe, et al. Energy storage configuration to suppress voltage fluctuation in distribution networks with photovoltaic power[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(8): 49-54, 61.
- [19] 刘泽槐, 翟世涛, 张勇军, 等. 基于扩展 QV 节点潮流的光储联合日前计划[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3435-3441.
- LIU Zehuai, ZHAI Shitao, ZHANG Yongjun, et al. A joint day-ahead scheduling for photovoltaic-storage systems based on extended QV bus-type power flow[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3435-3441.
- [20] 王艳玲, 韩学山, 周晓峰. 含分布式电源的主从联合系统扩展连续潮流计算[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 93-100.
- WANG Yanling, HAN Xueshan, ZHOU Xiaofeng. Expanded continuous power flow calculation of master-slave joint power system with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 93-100.
- [21] ALAM M J E, MUTTAQI K M, SUTANTO D. Mitigation of rooftop solar PV impacts and evening peak support by managing available capacity of distributed energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3874-3884.
- [22] CHEN Shuheng, WANG Xiongfei, SU Chi, et al. An improved power flow method based on extended chain-table storage structure for distribution network with PV nodes[C] // IEEE International Conference on Energy, May 13-16, 2014, Cavtat, Croatia: 892-896.
- [23] DABRA V, PALIWAL K K, SHARMA P, et al. Optimization of photovoltaic power system: a comparative study[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 29-39. DOI: 10.1186/s41601-017-0036-2.
- [24] 熊雄, 叶林, 杨仁刚. 电力需求侧规模储能容量优化和经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 42-48.
- XIONG Xiong, YE Lin, YANG Rengang. Optimal allocation and economic benefits analysis of energy storage system on power demand side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 42-48.

收稿日期: 2017-05-15; 修回日期: 2017-07-12

作者简介:

翟建伟(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析与控制, 分布式能源并网研究; E-mail: 1515017780@qq.com

张勇军(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统无功规划与电压控制、主动配电网的规划与运行控制等;

刘斯亮(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析与控制, 分布式能源并网研究。

(编辑 姜新丽)