

## 基于无功功率和储能平衡的配网馈线电压控制

易浩民<sup>1</sup>, 夏向阳<sup>1</sup>, 李经野<sup>1</sup>, 王尚宁<sup>2</sup>, 李明德<sup>3</sup>, 刘代飞<sup>1</sup>, 王恺<sup>3</sup>, 黄海<sup>3</sup>, 汤赐<sup>1</sup>, 李正曦<sup>2</sup>

1. 长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙, 410114;
2. 青海省光伏发电并网技术重点实验室, 青海 西宁, 810008;
3. 国家输变电电器产品质量监督检测中心(筹), 湖南 衡阳, 430400)

**摘要:** 针对屋顶光伏发电系统接入低压配电馈线引起的配网电压不稳定问题, 在满足低压馈线的电压波动机理的前提下, 考虑配网线路容量和逆变器容量不变的特性, 提出一种无功、有功、储能三者相结合的控制方法, 以防止低压馈线电压失稳的现象发生。该策略首先利用光伏逆变器自身的剩余容量吸收无功功率, 在一定程度上改善配网馈线的电压分布, 然后运用有功控制得出每个光伏系统的功率输出。研究表明: 在过电压情况下, 可将多余功率通过光伏发电系统自身的蓄电池储能吸收, 于高负载需求或夜间电压跌落时将储能释放, 提高电网对新能源的消纳能力和新能源的输出功率; 新型无功、有功、储能三者协同的功率优化方案不仅具有使馈线电压平衡的能力, 而且具有更高的光伏利用效率, 适用于未来大规模光伏接入配网的环境。

**关键词:** 光伏发电系统; 电压平衡; 无功控制; 储能

中图分类号: TM247

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2017)11-2972-07

## Feeder voltage control in distribution network based on reactive power and energy storage balance

YI Haomin<sup>1</sup>, XIA Xiangyang<sup>1</sup>, LI Jingye<sup>1</sup>, WANG Shangning<sup>2</sup>, LI Minde<sup>3</sup>, LIU Daifei<sup>1</sup>,  
WANG Kai<sup>3</sup>, HUANG Hai<sup>3</sup>, TANG Ci<sup>1</sup>, LI Zhengxi<sup>2</sup>

1. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;
2. Qinghai Key Lab of PVGC Technology, Xining 810008, China;
3. National Products Quality Supervision Inspection Center on Power Transmission and Transformation Equipment, Hengyang 430400, China)

**Abstract:** Considering that roof photovoltaic power generation system can lead to voltage instability in distribution network, on the premise of voltage instability mechanism of low voltage feeder, invariant distribution line capacity and the inverter capacity characteristics were considered, and then a reactive power, active power and energy storage combined control method was proposed to prevent the occurrence of excessive voltage ripple's phenomenon in low voltage feeder. Firstly, the strategy utilized the residual capacity of the photovoltaic inverter itself to absorb the reactive power, which helped to improve feeder voltage distribution to a certain extent. Then the power output of each PV system was obtained by active power control. Under the condition of voltage limitation and the excess power could be absorbed

收稿日期: 2016-12-11; 修回日期: 2017-03-16

**基金项目(Foundation item):** 国家自然科学基金资助项目(51307009); 湖南省教育厅创新平台开放基金资助项目(16K004); 衡阳市科技计划重点项目(2015KG27); 可再生能源电力技术湖南省重点实验室基金资助项目(2016ZNDL006) (Project(51307009) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(16K004) supported by Education Department Innovation Platform of Hunan Province; Project(2015KG27) supported by Science and Technology of Hengyang City; Project(2016ZNDL006) supported by Key Laboratory of Renewable Energy Electric-Technology of Hunan Province)

通信作者: 夏向阳, 教授, 从事电力电子技术在电力系统中的应用研究; E-mail: xia\_xy@126.com

by the battery energy storage of the photovoltaic power generation system, and the stored energy was released in high load demand or voltage drop at night. The results show that this method can improve the power grid of new energy consumptive ability and enhance the new energy output power. The new power optimization scheme that reactive power, active power and energy storage cooperate not only has the ability of maintaining the low voltage feeder voltage within a limit, but also has higher PV efficiency and is suitable for future network environment of large-scale PV access distribution.

**Key words:** PV system; voltage balance; reactive power control; energy storage

随着能源与电网结构的发展, 电网从传统城市电网或孤立电网为主的第 1 代电网跨越到以交直流互联输电的大电网为主的第 2 代电网, 并发展到目前以大型主干电网与局域网微网相结合的第 3 代电网。能源利用形式则相应地从传统的燃煤、油气、小水电等小机组发展到以化石、核电, 水电为主的大机组, 到现在骨干电源与清洁能源相结合的发电形式, 未来将会有越来越多的光伏等分布式能源接入主动配电网, 成为配电网发展的重要趋势<sup>[1-2]</sup>。我国通过行政手段再次明确要求完善新能源和分布式电源接入体系, 提出有序建设主动配电网、微电网, 鼓励应用分布式多能源互补、发电功率预测等方式, 提高分布式电源与配电网协调能力<sup>[3]</sup>。分布式电源如光伏接入配电网可以实现能量就地消纳, 避免了传统能源经过长距离输送的损耗。但由于其输出受外在环境影响大, 同时光伏发电系统包括许多电力电子开关器件, 引起诸如三相不平衡、谐波污染和电压不稳定等电能质量问题, 既给电网用户和电力部门造成了严重的经济损失, 又影响了电网的正常运行。在新能源高渗透率的电网中, 过电压是限制新能源并网的主要原因之一, 处于低负荷和光照充足情况下的配电网可能会出现功率的反向流动而导致馈线过电压<sup>[4-5]</sup>, 许多学者对此进行了有关分布式电源接入配网后对馈线电压的影响的研究。一方面, 通过增加设备和利用设备特性调压<sup>[6-10]</sup>; 另一方面, 从逆变器并网自身控制角度着手, 考虑不改变配电网的结构的情况下高效管理分布式能源接入配网对电压的影响<sup>[11-15]</sup>。此外, 随着建设坚强的智能电网的发展, 利用通讯等技术的分布式能源接入智能配电网可以促进整个配电系统更加安全、高效地运行。随着配电网节点和分布式能源增加, 利用控制与通信技术相结合的多学科领域交叉学习也吸引了许多学者的关注<sup>[16-19]</sup>。现有防止配网电压波动的方法均不同程度地存在功率消纳有限、设备成本增加的问题。为此, 本文作者主要针对光伏发电逆变器功率控制和自身储能进行研究, 在分析配网馈电压越限的机理上建立光伏发电配网的模型。考虑一种防止配网电压失稳方案, 即无功、有功, 储能三者相结合的控制方法。这种控

制策略先通过逆变器自身的剩余无功容量吸收无功功率, 在一定程度上改善了配网馈线的电压分布, 然后在满足低压馈线电压平衡的基础上运用有功控制光伏的输出功率。多余功率可通过光伏发电系统自身的蓄电池储能吸收, 在高负载需求或夜间电压不足时将储能释放, 与传统功率控制方案相比, 其功率利用方式与优化方法有较大差异, 且有利于配网对新能源的消纳, 同时可以为电网规划和调度运行提供指导。

## 1 光伏电压波动机理和无功控制的数学模型

放射式配电网单向分支的电路图如图 1 所示。图 1 中:  $V_j$  为节点  $j$  的电压( $j=0, \dots, n$ );  $P_j + iQ_j$  为线路上从  $j$  节点流向  $j+1$  节点的视在功率,  $j$  点的功率消耗由  $P'_j + iQ'_j = (P_j^c - P_j^g) + i(Q_j^c - Q_j^g)$  表示,  $i$  为虚数单位;  $R_j + iX_j$  为节点  $j$  与节点  $j+1$  之间的线路阻抗,  $R$  为线路电阻;  $X$  为线路电抗( $j=0, \dots, n$ )。假设每个节点的有功功率、无功功率消耗 ( $P_j^c, Q_j^c$ ) 和节点注入的有功功率  $P_j^g$  已知, 则可控变量为太阳能逆变器注入节点的无功功率  $Q_j^g$ 。每个节点的潮流计算公式如下:

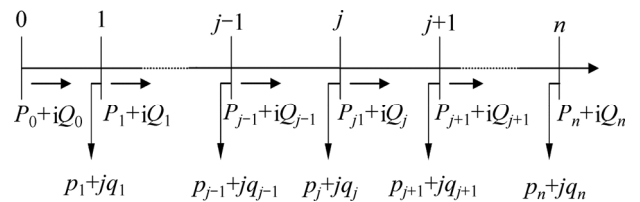


图 1 配电网分支功率流动电路

Fig. 1 Branch power flow circuit diagram of distribution network

$$P_{j+1} = P_j - R_j \frac{P_j^2 + Q_j^2}{V_j^2} - P_{j+1}^c + P_{j+1}^g \quad (1)$$

$$Q_{j+1} = Q_j - X_j \frac{P_j^2 + Q_j^2}{V_j^2} - P_{j+1}^c + P_{j+1}^g \quad (2)$$

$$V_{j+1}^2 = V_j^2 - 2(R_j P_j + X_j Q_j) + (R_j^2 + X_j^2) \frac{P_j^2 + Q_j^2}{V_j^2} \quad (3)$$

因为线路的损耗  $R_j(P_j^2 + Q_j^2)/V_j^2$  相对于线路上流动的功率  $P_j$  和  $Q_j$  很小, 且当线路电压在满足电压限定条件时, 可以假定  $(V_j - V_0)^2 \approx 0$ , 将以上公式化简为:

$$P_{j+1} = P_j - P_{j+1}^c + P_{j+1}^g \quad (4)$$

$$Q_{j+1} = Q_j - P_{j+1}^c + P_{j+1}^g \quad (5)$$

$$V_{j+1} = V_j - \frac{(R_j P_j + X_j Q_j)}{V_0} \quad (6)$$

通过对光伏发电系统并网时的配电网进行潮流分析可知: 光伏发电对配电网产生有功功率和无功率会增加线路电压的变化; 当光伏发电系统向电网输入过多的有功功率时, 可能导致线路过电压; 同理, 在夜间光伏无输出功率, 但存在高负载需求, 此时, 可能会引起馈线上电压降低。

基于以上机理分析, 借鉴逆变器可以利用自身剩余容量进行无功控制的思想<sup>[20]</sup>, 首先通过控制器获取配网馈线节点上的电压分布情况, 设定逆变器允许的功率因素为  $(-\cos \phi, \cos \phi)$ 。在光伏输出功率较高、电压越限时, 先采取所述逆变器无功控制调节配网馈线的电压分布。设定逆变器容量为  $S$ , 某一时刻逆变器的输出功率为  $P$ , 其中  $S$  为定值。逆变器能够发出的最大无功功率  $Q_{\max}$  满足

$$Q_{\max} = \min(\sqrt{S^2 - P^2}, P \tan \phi) \quad (7)$$

设定有功功率削减电压为  $u_c$ , 即配网馈线正常运行允许的最高电压。逆变器开始吸收无功功率的临界参考电压为  $u_{\text{ref}}$ , 由用户设定满足  $u_{\text{ref}} < u_c$ 。若逆变器容量足够, 则在规定的功率因素范围内可控制逆变器吸收无功功率, 降低并网点电压, 在可能存在无需有功削减情况下, 将电压稳定在  $u_c$  内。逆变器的无功控制如下式所示:

$$Q = \begin{cases} 0, & u < u_{\text{ref}} \\ kQ_{\max}, & u_{\text{ref}} < u < u_c \\ Q_{\max}, & u \geq u_c \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $Q$  为逆变器吸收的实际无功功率;  $u$  为实际并网点电压;  $u_{\text{ref}}$  为吸收无功的临界电压;  $u_c$  为有功功率削减电压;  $k$  为常数, 且  $0 < k < 1$ 。实际并网点电压  $u$  越大,  $k$  越接近于 1。

## 2 有功功率控制与储能优化控制策略

由于逆变器的无功控制有限, 无功吸收过多时反而会增加配网馈线和逆变器的损耗, 因此, 逆变器的

无功控制仅在允许的功率范围内在一定程度上改善配网的电压分布。当规模化光伏系统接入配网时, 若在白天日照强度过高时, 则配网馈线产生过电压, 在考虑无功控制不足并维持电压在馈线最大允许电压范围之内, 因此, 需利用相应的有功控制策略优化光伏输出。现有的光伏有功功率控制方法有很多, 如基于有功功率削减的下垂控制策略、基于有功预测的功率控制和灵敏度矩阵控制等。本文考虑一种有功功率控制与储能的优化控制策略, 即一种结合灵敏度矩阵分析与储能的功率优化控制策略来防止配网电压越限。灵敏度矩阵分析能够精确计算光伏优化功率, 并能够利用储能将多余功率吸收储存, 在光照较弱光伏输出功率低、配网电压不足时发出, 保证发出功率的合理消纳和利用。图 2 所示为含光伏发电系统的配电网结构示意图。

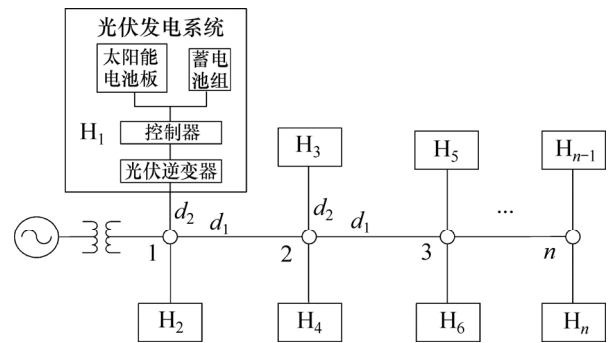


图 2 光伏发电系统配网结构示意图

Fig. 2 Distribution network structure of photovoltaic power generation system

图 2 中:  $d_1$  为光伏发电系统间的距离;  $d_2$  为光伏发电系统到线的距离;  $H_1, H_2, \dots, H_n$  为自带储能的光伏发电系统。馈线电压的灵敏度矩阵  $S_V$  为<sup>[21]</sup>

$$S_V = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & |V| \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & |V| \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & |V| \frac{\partial Q}{\partial V} \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{\Delta \delta}{dP} & \frac{\Delta \delta}{dQ} \\ \frac{\Delta V}{dP} & \frac{\Delta V}{dQ} \end{pmatrix} \quad (9)$$

式(9)中的矩阵表示有功功率与无功功率的变化对电压的相角以及幅值的影响, 其中矩阵中  $S_{V21}$  表示有功功率变化对电压幅值变化的影响率即  $\frac{\Delta V}{\Delta P}$ 。

计算每个光伏发电系统的功率优化值之后, 可以将多余的光伏输出功率送给每个光伏发电系统 H 自带的蓄电池储能中。蓄电池充放电如下式所示:

$$A = A_0 + i_t = A_0 + \frac{\int_{\tau_0}^{\tau_t} n i d t}{Q_N} \quad (10)$$

其中:  $A$  为蓄电池总的荷电量;  $A_0$  为初始荷电量;  $i_t$  为电池电量变化值, 充电状态时取正, 放电状态时取负;  $Q_N$  为额定容量;  $i$  为电流, 充电状态取正, 放电状态取负;  $n$  为充放电效率, 在实际中会随时变化, 为简化模型, 设定为 1。首先输入光伏系统的配网线路参数并初始化时间  $t_0$ , 然后设置无功功率的约束条件和灵敏度矩阵的计算参数及运行的时间  $t$ 。潮流计算后, 通过配网首端控制器获取配网的功率分布、电压分布和光伏发电系统的荷电状态。若节点电压发生越限, 则对该节点逆变器首先通过自身的无功功率优化该点的电压分布。当光伏功率输出过高、无功控制无法满足控制需求时, 启用有功和储能相结合的控制策略, 将多余功率送入光伏系统自带的蓄电池进行充电并输出  $t$  时刻配网功率分布和电压分布情况, 利用时间  $t_r$  约束进行系统循环控制, 整个控制系统的方案如图 3 所示。

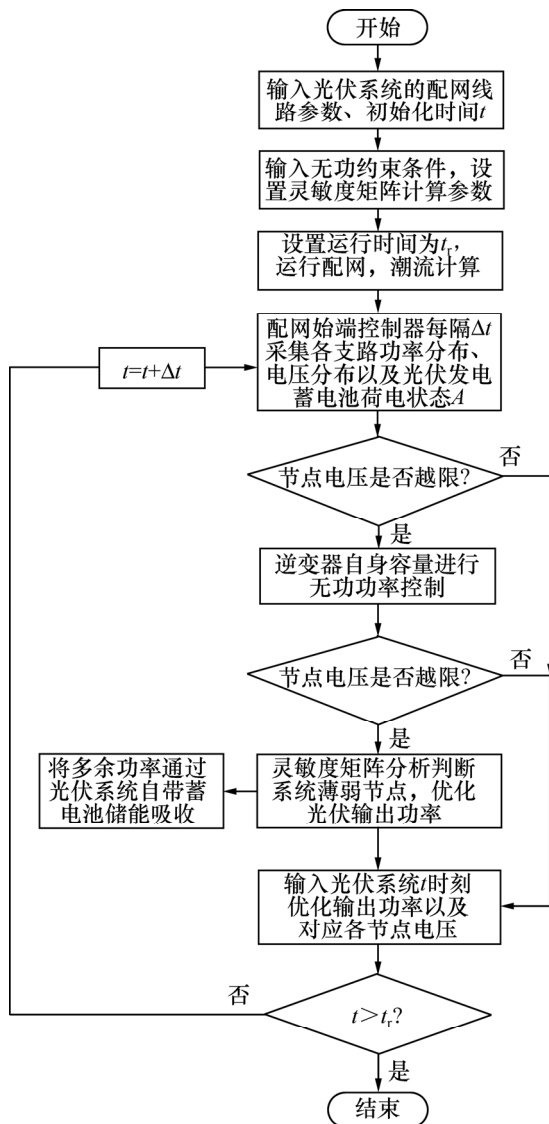


图 3 控制系统方案流程

Fig. 3 Flow chart of control system program

### 3 仿真分析

#### 3.1 算例仿真实验

采用逆变器自身无功控制和有功储能相结合的方法对算例进行仿真实验。以图 2 所示模型为算例模型进行分析。假设配网有 6 个节点, 即  $n=6$ 。相邻节点间距离  $d_1=20$  m, 用户与配电路间距离  $d_2=100$  m, 配网馈线电压等级设为 380 V。正常工作电压为 396 V, 极限工作电压为 402 V。配网中共有 12 处接入光伏发电系统  $H_1, H_2, \dots, H_{12}$ , 每个光伏发电系统逆变器容量相同, 整个光伏系统的极限功率为 72 kW。设置相应配网参数如表 1 所示。

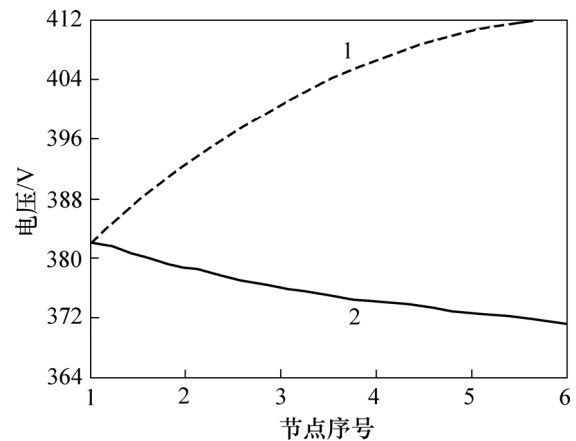
表 1 配网基本参数

Table 1 Basic parameters of distribution network

线路	电阻 $R/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	电感 $L/(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	电容 $C/(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$
支线路	0.602	0.232	0.062
主线路	0.365	0.268	0.067

图 4 所示为光照强度高时有无光伏发电系统配网馈线的电压分布。从图 4 可以看出: 当光照较强烈时, 拥有光伏发电系统的配网电压将会越限, 且沿着馈线始端至终端节点电压越来越高, 节点 5 和 6 发生电压越限现象; 当无光伏发电系统接入配网时, 馈线电压从始端至终端节点依次降低。

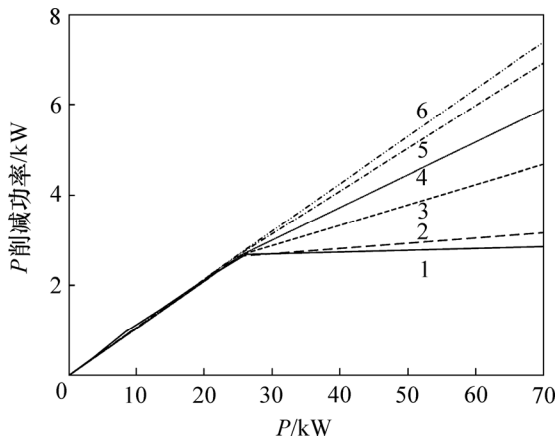
图 5 所示为采用传统有功功率削减方法功率削减结果。从图 5 可以看出: 随着配网整个光伏发电系统



1—光伏接入配网电压分布; 2—光伏未接入配网电压分布。

图 4 有无光伏接入配网馈线电压分布

Fig. 4 Feeder voltage distribution diagram with or without photovoltaic access distribution network

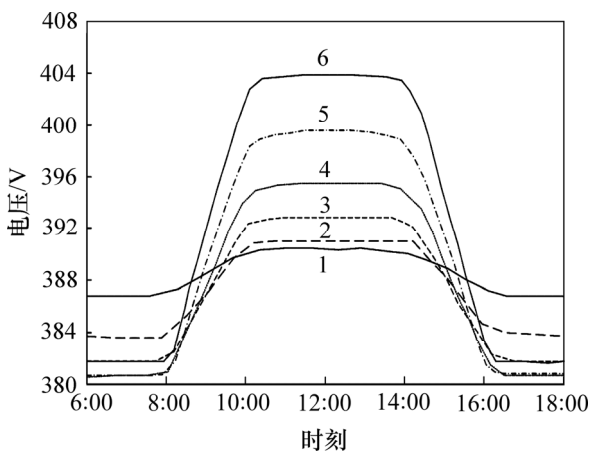


逆变器: 1—H<sub>1</sub>/H<sub>2</sub>; 2—H<sub>3</sub>/H<sub>4</sub>; 3—H<sub>5</sub>/H<sub>6</sub>; 4—H<sub>7</sub>/H<sub>8</sub>;  
5—H<sub>9</sub>/H<sub>10</sub>; 6—H<sub>11</sub>/H<sub>12</sub>。

图 5 采用传统功率优化机制后光伏发电系统输出功率  
Fig. 5 Output power of photovoltaic power generation system adopted traditional power optimize strategy

输出功率增加,传统的下垂控制策略不得不削减过多的功率来维持配网电压稳定;馈线节点越靠近末端,光伏发电系统削减的功率越大,功率损失情况较严重。

采用传统下垂功率削减策略后所得配网馈线电压分布如图 6 所示。从图 6 可见:在 1 d 的 6:00—18:00,整个配网馈线上电压控制在最大允许电压以内,但这种情况是以消耗较多有功功率为前提。



逆变器: 1—H<sub>1</sub>/H<sub>2</sub>; 2—H<sub>3</sub>/H<sub>4</sub>; 3—H<sub>5</sub>/H<sub>6</sub>; 4—H<sub>7</sub>/H<sub>8</sub>;  
5—H<sub>9</sub>/H<sub>10</sub>; 6—H<sub>11</sub>/H<sub>12</sub>。

图 6 采用传统功率优化情况下 1 d 中馈线电压变化  
Fig. 6 Feeder voltage variation diagram with traditional power optimization in one day

### 3.2 采用无功与有功储能结合的优化策略

为了防止馈线过电压,需要对光伏发电系统输出

的有功功率进行适当优化。在含有大量太阳能发电单元的配电网系统中,配网线路电压有升高的趋势<sup>[4-5]</sup>。由以上分析也可见:图 2 中,只要保证 H<sub>11</sub> 与 H<sub>12</sub> 之间馈线不出现过电压现象,则此配网系统便能够保证各光伏发电单元馈线电压不会发生过电压现象。图 7 所示为逆变器 H<sub>11</sub>/H<sub>12</sub> 通过自带的蓄电池储能吸收的功率,呈现两头低、中间大的趋势,这是由于中午整个光伏发电系统输出功率高,逆变器自身的无功控制不能防止电压的产生,需通过灵敏度矩阵精确分析各个光伏发电系统的输出功率优化值,并将其存储至自带的储能设备中,于光伏输出功率低时将储能释放,以维持馈线上整个电压稳定。

光伏发电系统逆变器 H<sub>11</sub>/H<sub>12</sub> 通过自身剩余容量进行无功控制,所得结果见图 8。从图 8 可见:由于中午光照强输出高,逆变器吸收的无功功率也较高。图 9 所示为采用无功/有功/储能相结合的控制策略下白天整个配网馈线电压的分布情况。对比图 9 与图 6

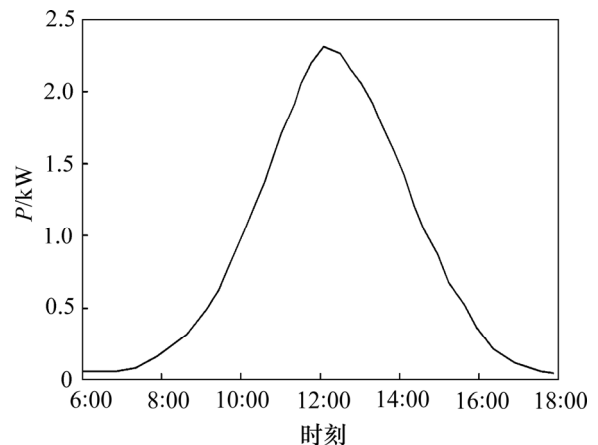


图 7 H<sub>11</sub>/H<sub>12</sub> 蓄电池储能吸收的有功功率  
Fig. 7 Active power of H<sub>11</sub>/H<sub>12</sub> battery energy storage

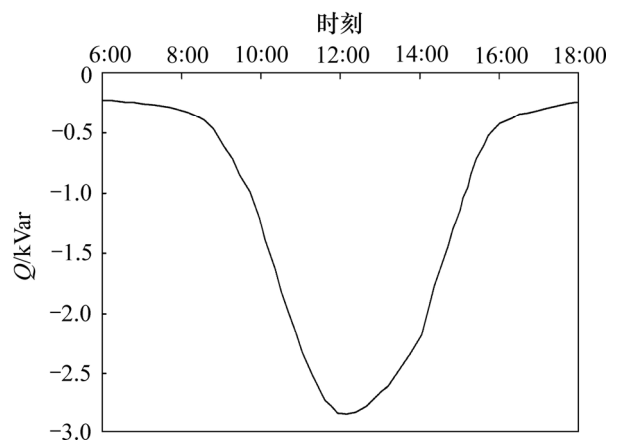
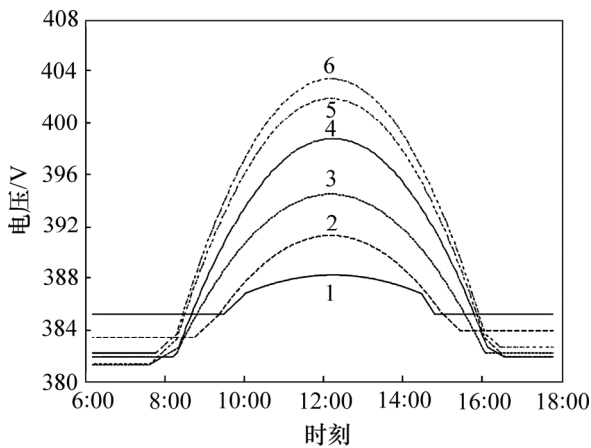


图 8 H<sub>11</sub>/H<sub>12</sub> 逆变器无功功率控制  
Fig. 8 Reactive power control chart of H<sub>11</sub>/H<sub>12</sub> inverter



逆变器: 1—H<sub>1</sub>/H<sub>2</sub>; 2—H<sub>3</sub>/H<sub>4</sub>; 3—H<sub>5</sub>/H<sub>6</sub>; 4—H<sub>7</sub>/H<sub>8</sub>;  
5—H<sub>9</sub>/H<sub>10</sub>; 6—H<sub>11</sub>/H<sub>12</sub>。

图 9 采用新型功率优化情况下 1 d 中馈线电压变化

Fig. 9 Feeder voltage variation diagram with new strategy of power optimization in one day

可见: 在同样满足电压不越限的前提下, 光伏发电系统输出的功率更大, 保证了新能源的合理消纳利用。

## 4 结论

1) 当光伏发电向配网注入过多的有功功率时, 会导致低压馈线过电压。

2) 采用优化光伏并网功率来解决馈线电压波动, 先利用逆变器自身的无功控制在一定程度上优化配网电压分布, 然后通过有功储能的优化控制策略合理优化光伏输出功率。

3) 将所提出的控制系统运用于实际仿真, 仿真结果验证了本文该控制系统的可行性和适用性。

### 参考文献:

[1] HIDALGO R, ABBEY C, JOOS G. A review of active distribution networks enabling technologies[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis, USA, 2010: 78-83.

[2] 陈旭, 张勇军, 黄向敏. 主动配电网背景下无功电压控制方法综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 143-151.

CHEN Xu, ZHANG Yongjun, HUANG Xiangmin. Review of reactive power and voltage control method in the background of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 143-151.

[3] 马钊, 安婷, 尚宇炜. 国内外配电前沿技术动态及发展[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1552-1567.

MA Zhao, AN Ting, SHANG Yuwei. State of the art and development trends of power distribution technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1552-1567.

[4] 董伟杰, 白晓明, 朱宁辉, 等. 间歇式电源并网环境下电能质量问题研究[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1265-1271.

DONG Weijie, BAI Xiaoming, ZHU Ninghui, et al. Discussion on the power quality under grid-connection of intermittent power sources[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1265-1271.

[5] 郑超, 林俊杰, 赵健, 等. 规模化光伏并网系统暂态功率特性及电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1059-1071.

ZHENG Chao, LIN Junjie, ZHAO Jian, et al. Transient power characteristic of scaled photovoltaic grid-connected system and its voltage control[J]. Proceeding of the CSEE, 2015, 35(5): 1059-1071.

[6] 燕跃豪, 鲍薇, 李光辉, 等. 基于混合储能的可调度型分布式电源控制策略[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2014, 41(2): 28-35.

YAN Yuehao, BAO Wei, LI Guanghui, et al. Control strategy of dispatchable distributed generation based on hybrid energy storage[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2014, 41(2): 28-35.

[7] 王云玲, 曾杰, 张步涵, 等. 基于超级电容器储能系统的动态电压调节器[J]. 电网技术, 2007, 31(8): 58-62.

WANG Yunling, ZENG Jie, ZHANG Buhan, et al. Dynamic voltage conditioner based on ultracapacitor energy storage system[J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 58-62.

[8] 许晓艳, 黄越辉, 刘纯, 等. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 140-146.

XU Xiaoyan, HUANG Yuehui, LIU Chun, et al. Influence of distributed photovoltaic generation on voltage in distribution network and solution of voltage beyond limits[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 140-146.

[9] CHEN C S, LIN C H, HSIEH W L, et al. Enhancement of PV penetration with DSTATCOM in Taipower distribution system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(2): 1560-1567.

[10] 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(10): 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(10): 6-11.

[11] 夏向阳, 唐伟, 冉成科, 等. 基于 DSP 控制的单相光伏并网逆变器设计[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(3): 52-56.

XIA Xiangyang, TANG Wei, RAN Chengke, et al. Design of single phase photovoltaic grid-connected inverter based on DSP control[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,

- 2011, 26(3): 52-56.
- [12] 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.
- [13] 林涛, 翟学, 吴俊鹏, 等. 考虑低电压穿越特性的光伏电站准入容量研究[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(3): 11-16.  
LIN Tao, ZHAI Xue, WU Junpeng, et al. Study on access capacity of photovoltaic power station considering low voltage traverse characteristics[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(3): 11-16.
- [14] TONKOSKI R, LUIZ A, LOPES C, et al. Coordinated active power curtailment of grid connected pv inverters for overvoltage prevention[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(2): 139-147.
- [15] 王成山, 王守相, 郭力. 我国智能配电技术展望[J]. 南方电网技术, 2010, 4(1): 18-22.  
WANG Chengshan, WANG Shouxiang, GUO Li. Prospect over the techniques of smart distribution network in China[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(1): 18-22.
- [16] 张东寅, 林涛, 许汉平, 等. 考虑电网脆弱性的电网发电计划优化[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(2): 10-16.  
ZHANG Dongyin, LIN Tao, XU Hanping, et al. Optimization of power grid power generation plan considering power network vulnerability[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(2): 10-16.
- [17] 许晓燕, 黄跃辉, 刘纯, 等. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限解决方案[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 140-146.  
XU Xiaoyan, HUANG Yuehui, LIU Chun, et al. Influence of distributed photovoltaic generation on voltage in distribution network and solution of voltage beyond limits[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 140-146.
- [18] JAHANGIRI P, ALIPRANTIS D C. Distributed volt/var control by PV inverters[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(3): 3429-3439.
- [19] JIANG Ying, LI Jianguo, PAN Sanbo, et al. Research on the Comparison analyses of three-phase discrete and integrated LC filters in three-phase PV inverter[J]. International Journal of Photoenergy, 2013, 20(11): 768-774.
- [20] 史朝晖, 李忠, 钟志刚, 等. 光储微电网运行模式无缝切换方法研究[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(2): 31-36.  
SHI Zhaohui, LI Zhong, ZHONG Zhigang, et al. The research on the seamless switch of operation mode of light-storage micro-grid[J]. Journal of Power Science and Technology, 2016, 31(2): 31-36.
- [21] REBER S, HURRLE A, EYER A, et al. Crystalline silicon thin film solar cell recent results at Fraunhofer ISE[J]. Solar Energy, 2004, 77(6): 865-875.

(编辑 陈灿华)