

# 基于高比例光伏接入低压系统的电压控制研究

杨重伟<sup>1</sup>, 梁旭<sup>2</sup>, 毛岚<sup>2</sup>

(1. 重庆电力高等专科学校 电力工程学院, 重庆 400053;

2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

**摘要:** 大规模高比例光伏发电接入低压配网系统后, 将极大可能引起系统潮流逆向, 导致系统各节点电压越限和系统损耗增加, 首先利用低压配网系统的线路参数和拓扑结构, 对低压配网系统中的电压-有功和电压-无功进行了灵敏度分析, 推导了分布式电源接入对配网系统节点电压的影响, 以此提出了含高比例光伏并网的低压配网系统无功裕度评价方法。为了降低光伏有功的削减量, 以网络无功充裕性为依据设计了就地的有功/无功综合控制策略, 并利用自适应算法优化不同节点间的控制参数。仿真结果表明, 所提的优化控制策略可利用逆变器的无功容量对系统节点电压进行调节, 有效降低了系统网损和光伏有功削减, 大限度地消除了配电网中分布式可再生能源波动对系统电压的影响。

**关键词:** 高比例光伏; 光伏逆变器; 电压越限; 无功充裕性; 自适应算法

**中图分类号:** TM71   **文献标识码:** A   **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22452

## Research on Voltage Control of Low Voltage System Based on High-proportion Photovoltaic Access

YANG Chongwei<sup>1</sup>, LIANG Xu<sup>2</sup>, MAO Lan<sup>2</sup>

(1. Power Engineering Institute, Chongqing Electric Power College, Chongqing 400053, China;

2. Department of Electrical Engineering and Applied Electronic Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** After a large-scale and high proportion of photovoltaic power generation is connected to the low-voltage distribution network system, it will most likely cause the system power flow reversal, resulting in the out of limit voltage of each node of the system and the increase of system loss. First, using the line parameters and topology of the low-voltage distribution network system, the sensitivity analysis of voltage-active power and voltage-reactive power in the grid system was carried out, and the influence of distributed power access on the node voltage of the distribution network system was derived. Based on this, a reactive power margin evaluation method applying to low-voltage distribution network system with a high proportion of photovoltaic grids was proposed. In order to reduce the amount of photo-voltaic active power reduction, an on-site active/reactive power integrated control strategy was designed based on the network's reactive power sufficiency, and an adaptive algorithm was used to optimize the control parameters between different nodes. The simulation results show that the proposed optimization control strategy can use the reactive power capacity of the inverter to adjust the system node voltage, effectively reduce the system network loss and photovoltaic active power reduction, and greatly eliminate the fluctuation of distributed renewable energy in the distribution network impact on system voltage.

**Key words:** high-proportion photo-voltaic; photo-voltaic inverter; voltage limit; reactive power sufficiency; adaptive algorithm

可再生电源接入配网系统是未来配网发展趋势<sup>[1-2]</sup>, 运用电量就地化平衡策略, 可减少电能远距离传输所需的投资和损耗。另外, 分布式可

再生能源接入配网系统将改变传统配网潮流辐射式流动模式。鉴于其功率随机性和波动性等固有特点, 高比例分布式可再生能源接入后,

往往易引起配网系统电压波动、闪变和越限等问题<sup>[3-4]</sup>,这样既限制了可再生能源的利用率,又增加了配网系统的运行风险。

已有众多学者对高比例分布式电源接入配网后引起的电压波动问题展开了深入研究。在可再生电源对配网节点电压的影响机理方面,主要对节点电压及分布进行分析。文献[5-6]基于节点压降的角度分析了单台光伏机组接入配网系统后对节点电压的影响,并结合配网多样化的负荷分布情况,推导了不出现过电压的光伏并网容量公式,依据结论可为可再生能源的规划运行提供参考价值。文献[7-8]探讨了配网系统中不同节点位置接入可再生能源后其电压的变化,并给出并网点最大接入的容量。文献[9-10]通过对可再生能源接入配网后的电压分布进行深入分析,针对可再生能源接入的容量、接入位置等因素探讨了其对配网节点电压的影响。在可再生能源接入系统后节点电压控制方面,文献[11]提出结合变压器有载调压的方式来调节由可再生能源接入引起的电压波动,但调节方式较为单一,且频繁通过变压器的分接头进行有载调压将极大影响变压器寿命。近年来,光伏逆变器的控制研究也取得了重大成果,用户亦逐步采用调节逆变器的方式推进光伏并网。与控制光伏有功的策略不同,该类文献的研究策略主要是控制逆变器输出无功来调节各配网节点的运行电压<sup>[2,12]</sup>。文献[13]充分探讨了低压配网系统的电压-无功下垂优化控制策略。文献[14]利用了电压-无功下垂优化曲线控制来实现节点电压的分段调节,以降低线路中的无功流动,从而降低系统网损。但仅通过光伏逆变器调节系统无功也有一定的缺陷,即在逆变器无功容量充足的条件下,未对节点的无功裕度的评价机制进行深入研究。另外,对逆变器无功调节能力不足的情况下就地有功/无功协调优化问题未进行综合研究。

基于上述分析,针对目前光伏逆变器功率控制问题,通过探讨低压配网系统内有功/无功对电压的影响机理,提出了高比例光伏接入配网系统后的无功裕度评价方法,给出光伏逆变器有功/无功的就地电压控制策略。通过自适应粒子算法对电压控制参数进行优化调节,最后以IEEE9节点的配网系统进行优化仿真,验证所提方法的合理性。

## 1 分布式电源对配电网电压影响的机理分析

### 1.1 光伏并网结构分析

光伏发电实质是利用太阳能可转化为电能的光伏效应原理,其核心作用是通过光照去改变半导体内部结构的电荷分布,从而获得电动势和电流。光伏并网结构示意图如图1所示,其典型结构主要包含了光伏电池阵列、直流转换器、逆变器等器件,通过控制光伏直流母线电压实现有功调节<sup>[15]</sup>。光伏逆变器的无功调节功能数学量化关系<sup>[2]</sup>如下:

$$Q_{PV,max} = \pm \sqrt{S^2 - P_{PV}^2} \quad (1)$$

式中: $Q_{PV,max}$ 为光伏逆变器的最大无功输出; $P_{PV}$ 为光伏逆变器的有功输出; $S$ 为逆变器的有效容量,通常可高出逆变器额定有功容量的10%。

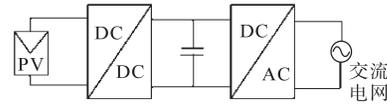


图1 光伏并网结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of photovoltaic grid-connected structure

### 1.2 电压-有功和电压-无功定量关系分析

对于光伏并网系统而言,其接入点通常为低压配电网节点处,系统每处节点上均接有用户负荷和光伏发电,各节点和每段线路的编号如图2所示。

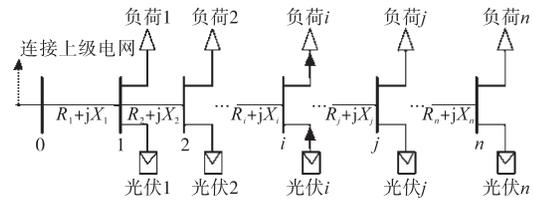


图2 含有n节点的低压配电网馈线

Fig.2 Low-voltage distribution feeder with n nodes

任意节点*i*注入的有功和无功净值分别为

$$\begin{cases} P_i = P_{load,i} - P_{PV,i} \\ Q_i = Q_{load,i} - Q_{PV,i} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{load,i}$ ,  $Q_{load,i}$ 分别为节点*i*的有功、无功负荷; $P_{PV,i}$ ,  $Q_{PV,i}$ 分别为逆变器*i*的注入有功、无功。

设 $U_i$ 为节点*i*的电压, $R_i + jX_i$ 为节点*i-1*和节点*i*之间的线路阻抗,则节点*i*和节点*i-1*之间的压差为

$$\Delta U_i = U_{i-1} - U_i = \frac{R_i P_{line,i} + X_i Q_{line,i}}{U_i} \quad (3)$$

其中

$$P_{line,i} = \sum_{k=i}^n P_k + \sum_{k=i+1}^n P_{loss,k} \quad (4)$$

$$Q_{\text{line},i} = \sum_{k=i}^n Q_k + \sum_{k=i+1}^n Q_{\text{loss},k} \quad (5)$$

式中: $P_{\text{line},i}, Q_{\text{line},i}$ 分别为节点*i*-1和节点*i*之间的线路有功和无功; $P_{\text{loss},k}, Q_{\text{loss},k}$ 分别为线路*l<sub>k</sub>*的有功、无功损耗。

由于配网系统的线路损耗在总传输功率中的占比较小,故将其忽略,采用如下简化结果:

$$P_{\text{line},i} \approx \sum_{k=i}^n P_k \quad (6)$$

$$Q_{\text{line},i} \approx \sum_{k=i}^n Q_k \quad (7)$$

因此,任意节点*i*的电压方程可表示为

$$U_i \approx U_0 - \sum_{j \in \Theta_{\text{CNO},i}} \frac{R_j \times P_{\text{line},j} + X_j \times Q_{\text{line},j}}{U_j} \quad (8)$$

式中: $\Theta_{\text{CNO},i}$ 为节点0~节点*i*的线路和节点的总集合; $U_j$ 为节点*j*的测量电压,若网络节点功率变化较小, $U_j$ 近似为常数。

为了分析节点*j*的有功变化对节点*i*的影响,采用灵敏度分析方法进行相关测算,具体结果如下式:

$$\frac{\partial U_i}{\partial P_j} = - \sum_{L \in \Theta_{\text{CNO},j}} \frac{R_L}{U_L} \frac{\partial}{\partial P_j} \sum_{k=L}^n P_k \quad (9)$$

对式(9)进行分析后可知:

$$\frac{\partial P_k}{\partial P_j} = \begin{cases} 1 & k=j \\ 0 & k \neq j \end{cases} \quad (10)$$

则式(9)可化简为

$$s_{ij}^{U-P} = \frac{\partial U_i}{\partial P_j} = - \sum_{L \in (\Theta_{\text{CNO},i} \cap \Theta_{\text{CNO},j})} (R_L/U_L) \quad (11)$$

式中: $s_{ij}^{U-P}$ 为节点*i*对节点*j*的电压-有功灵敏度; $\Theta_{\text{CNO},i} \cap \Theta_{\text{CNO},j}$ 为节点0~节点*i*和节点0~节点*j*路径上的线路及节点的交集。

类似地,节点*i*对节点*j*的电压-无功灵敏度如下:

$$s_{ij}^{U-Q} = \frac{\partial U_i}{\partial Q_j} = - \sum_{L \in (\Theta_{\text{CNO},i} \cap \Theta_{\text{CNO},j})} (X_L/U_L) \quad (12)$$

综合式(11)、式(12),低压配网中任意节点*i*的电压变化和系统各节点的功率变化关系表示为

$$\Delta U_i = \sum_{j=1}^n s_{ij}^{U-P} \times \Delta P_j + \sum_{j=1}^n s_{ij}^{U-Q} \times \Delta Q_j \quad (13)$$

## 2 光伏逆变器无功综合优化策略

### 2.1 优化思路

结合式(13)可知,当系统各节点注入有功/无功后,其变化将引起对应节点和关联节点的电压

发生相应变化。因此,在光伏发电的控制策略上,可选择通过调节逆变器的有功/无功来调节节点的并网电压。而在*R>X*系统网络中,可以通过削减光伏有功出力来抑制并网节点的越限电压,但调节逆变器的输出无功可控制并网点电压的经济性。结合负荷随时间段分布情况的差异性,逆变器的无功控制也做相应调整。因此,本文在光伏逆变器的无功控制策略上进行相应的设计:在系统无功充足的情况下,仅通过调节逆变器的输出无功来控制并网点的电压;在系统无功不足的情况下,优先通过调节逆变器的无功来控制并网节点的电压,仅当逆变器可调的无功容量达到阈值后,采用削减光伏输出有功的方式。在此基础上采取削减光伏有功来进一步促进逆变器释放无功容量,从而有利于并网节点的电压控制。

### 2.2 无功裕度评价指标

光伏并入低压配网节点处,考虑到相应线路参数、负荷分布、光伏并网容量和逆变器容量等差异,造成不同的系统方式下所获得的控制效果也不尽相同。因此,有必要根据线路参数、结构和并网设备等相关数据制定出无功裕度评价指标。高比例光伏机组接入配网系统后,其夜间功率将从网络首端向末端节点传递,馈线电压将在系统末端节点最低;白天期间,光伏输出功率将严重过剩,其功率将从光伏并网点传至系统首端,馈线电压将在末节点最高。由此看出,配网系统末端节点易出现电压越限的情况<sup>[8]</sup>。因此,需对馈线末端节点的电压进行有效控制。

为了避免馈线节点电压越限的风险,此时各节点按照光伏逆变器最大容量消纳无功,并给出相应评价指标,评价系数如下:

$$\delta = \frac{U_{n,\text{max}} - U_{\text{th}}}{|\sum_{j=1}^n s_{nj}^{U-Q} \times \sqrt{S_j^2 - (P_{\text{PV},j}^{\text{ra}})^2}|} \quad (14)$$

式中: $\delta$ 为评价系数; $U_{n,\text{max}}$ 为节点*n*的历史最高电压; $U_{\text{th}}$ 为并网点的电压上限,设为1.07(标么值); $S_j$ 为节点*j*并入的逆变器容量; $P_{\text{PV},j}^{\text{ra}}$ 为节点*j*对应并网光伏的额定功率。

式(14)分子表示网络节点*n*对应的最大电压越限值,分母部分表示所有逆变器集合带给网络末端节点的电压变量。若 $\delta > 1$ ,则系统中的逆变器所提供的无功容量无法完全消除系统各节点的过电压;反之,若 $\delta \leq 1$ ,则可完全消除系统各节点的过电压。欠压风险的无功裕度评价方法相似。

### 2.3 基于光伏逆变器的综合优化策略

#### 2.3.1 无功调节量充裕的情况

对于光伏逆变器无功容量调节充裕的情况下,采取的节点电压控制策略如图3所示。 $U_{cr,i}$ 为并网节点电压, $Q_{PV}$ 为光伏逆变器的输出无功; $U_{cr,i}^{1+}$ , $U_{cr,i}^{1-}$ 分别为并网节点电压升降时无功输出的阈值参数。当并网节点电压高于 $U_{cr,i}^{1+}$ 时,逆变器将从系统吸收无功来抑制节点过压风险;当并网节点电压低于 $U_{cr,i}^{1-}$ 时,逆变器将向系统注入无功来防止节点低电压风险。此外,系统无功过多流动将会引起网损增加,即在系统节点没有明显越限的前提下,逆变器不向系统输出无功。 $U_{cr,i}^{2+}$ , $U_{cr,i}^{2-}$ 分别为系统节点过/欠压风险下的电压阈值参数。 $Q_{PV}^{OV}$ , $Q_{PV}^{UV}$ 分别为系统节点过/欠压风险下对应的无功输出值。

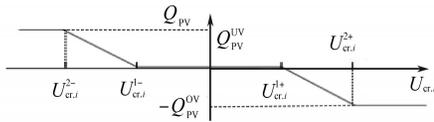


图3 无功充裕时的控制曲线

Fig.3 Control curve when reactive power is abundant

#### 2.3.2 无功调节量不充裕的情况

对于光伏逆变器无功容量调节不充裕的情况下,为了确保控制系统的经济性,优先利用逆变器参与无功调节。如果逆变器的无功容量到极限后,系统节点依然存在过电压的风险,则应考虑削减光伏有功出力,有利于降低系统末端节点的电压,可促进逆变器释放更多无功调节容量。具体控制曲线如图4所示。

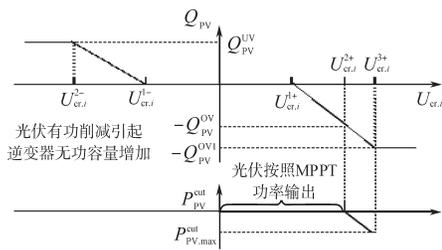


图4 无功不足时的控制曲线

Fig.4 Control curve when reactive power is insufficient

图4中, $P_{PV}^{cut}$ 为削减的光伏有功出力。当逆变器面临无功调节容量短缺时(此时电压为 $U_{cr,i}^{2+}$ ,逆变器的输出无功为 $Q_{PV}^{OV}$ ),应削减光伏有功出力。同时,进一步释放逆变器无功容量对系统末节点电压进行优化控制,这样可减小光伏有功削减量,保持光伏有功出力和逆变器无功调节处于动态优化平衡的状态。 $U_{cr,i}^{3+}$ 为光伏最大有功削减量下对应的电压值,此时逆变器可调的无功容量相应增加到 $Q_{PV}^{OV1}$ 。

## 3 光伏逆变器有功/无功策略优化模型

### 3.1 目标模型

结合第2节所述的光伏逆变器有功/无功优化控制思路,为进一步提高逆变器的无功调节能力,还应对控制器参数进行协调设计如下两方面:

1)综合系统节点的电压-有功和电压-无功数值关系对边界参数进行相关设计,对逆变器在极限条件下实现并网节点上的最大削减无功和有功进行量化,确保节点电压在运行许可范围;

2)基于上述分析,结合系统网损和光伏削减功率建立优化模型,利用粒子自适应算法可对不同并网节点上的逆变器无功进行优化,尽量减少线路因无功流动产生的损耗,提高系统运行的经济性。涉及的参数可在逆变器安装前进行优化配置。

为保证系统网损和光伏有功削减量最小,优化模型如下:

$$F = \min \left[ \sum_{t=1}^T \rho_b(t) \times P_{loss}(t) + \sum_{j=1}^n \rho_q(t) \times P_{PV,i}^{cut}(t) \right] \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} -Q_{PV,i}^{av}(t) \leq Q_{PV,i}(t) \leq +Q_{PV,i}^{av}(t) \\ U_{cr,i}^{1+} \leq L_i^{1+} \\ U_{cr,i}^{1-} \geq L_i^{1-} \\ U_{cr,i}^{2+} < L_i^{2+} \end{cases} \quad \text{无功不充足情况} \quad (16)$$

其中

$$\begin{aligned} Q_{PV,i}^{av}(t) &= \sqrt{S^2 - P_{PV,i}^2(t)} \\ L_i^{1-} &= U_{cr,i}^{2-} - s_{ij}^{U-Q} \cdot Q_{PV,i}^{UV} \\ L_i^{1+} &= U_{cr,i}^{2+} + s_{ij}^{U-Q} \cdot Q_{PV,i}^{UV} \\ L_i^{2+} &= U_{cr,i}^{3+} + s_{ij}^{U-Q} \cdot (Q_{PV,i}^{OV1} - Q_{PV,i}^{OV}) + s_{ij}^{U-Q} \cdot P_{PV,i,max}^{cut} \end{aligned}$$

式中: $\rho_b(t)$ , $\rho_q(t)$ 分别为电力公司在时段 $t$ 的购电价格和对光伏发电削减功率的赔偿价格; $Q_{PV,i}^{av}(t)$ 为时段 $t$ 内节点 $i$ 逆变器的可调容量; $P_{PV,i}(t)$ 为时段 $t$ 节点 $i$ 的光伏上网功率; $L_i^{1+}$ , $L_i^{1-}$ , $L_i^{2+}$ 为限制系数。

### 3.2 优化算法

通常粒子群算法在应用过程中,权重参数 $\omega$ 值是根据迭代次数的增加而线性变化的。在一些复杂非线性优化问题中,利用线性权值对寻优速度进行调整易造成种群陷入局部最优<sup>[16-18]</sup>。权值参数 $\omega$ 的设置与算法迭代次数有关,这样缺乏合理性。基于此,算法采用动态自适应权重策略优化光伏并网点的电压控制问题。总体策略如下:在算法迭代中,根据粒子个体目标值和迭代

种群的最优值的距离设置权重系数 $\omega$ 。在算法迭代后期,为了让算法搜索区域更加精细化,应降低粒子的权重系数。为此,本文算法引入两个动态指标,即进化因子 $l_i$ 和多样性因子 $t_g$ 。

进化因子 $l_i$ 主要将粒子状态和对应的惯性权重进行关联,从而寻出个体最优和种群最优的距离,并对权重系数进行动态调整,其表达式如下:

$$l_i = \frac{\min(F_{i,k}, F_{gbest,k})}{\max(F_{i,k}, F_{gbest,k})} \quad (17)$$

式中: $F_{gbest,k}$ 为第 $k$ 代全局最优目标值; $F_{i,k}$ 为第 $k$ 代第 $i$ 个粒子的目标适应度。

由式(17)可知,每完成一次迭代计算,粒子个体 $i$ 的最优值就越接近全局最优值,即 $l_i$ 越趋近于1。而粒子迭代计算越往后,粒子的多样性越低,可结合粒子适应度 $F_{i,k}$ 的标准差 $\sigma$ 计算出对应的多样性因子:

$$\bar{F}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{i,k} \quad (18)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_{i,k} - \bar{F}_k)^2} \quad (19)$$

$$t_g = \frac{1}{1 + \sigma} \quad (20)$$

式中: $N$ 为种群数。

因此,结合进化因子和多样性因子,对粒子 $i$ 的权重系数 $\omega_i$ 进行计算:

$$\omega_i = 1 - l_i \omega_1 + t_g \omega_{t_g} \quad (21)$$

其中, $\omega_1, \omega_{t_g}$ 的取值范围分别设定为 $[0.4, 0.6]$ 和 $[0.05, 0.2]$ 。

即使本文对算法的权重系数 $\omega_i$ 做了针对性改进,算法依旧出现粒子“靠拢”现象<sup>[19-20]</sup>,使得算法陷入局部最优解。为此,本文设置一个多样性初始指标 $t_{g0}$ 。当 $t_g \geq t_{g0}$ 时,粒子的多样性较低,因此本文引入小生境优化种群策略<sup>[21]</sup>来提高粒子选择的多样性,有助于粒子跳出局部最优解。

小生境优化策略主要用于种群交叉、变异操作后,其子代种群和父代种群择优组成新的种群,然后利用选择、排挤等操作方式筛选出适应度较好的部分参与下轮迭代。这样能充分发挥种群多样性,有利于粒子个体跳出局部最优解,具体步骤如下:

1)对优化种群进行选择、交叉、变异操作;

2)将遗传的子代 $M$ 个最优个体和父代的 $N$ 个最优个体重组,计算出新种群中个体间的海明距离<sup>[21]</sup>:

$$\|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{i=1}^d (x_{ii} - x_{ji})^2} \quad (22)$$

其中

$$i = 1, 2, \dots, M + N - 1$$

$$j = i + 1$$

式中: $d$ 为 $x_i$ 和 $x_j$ 对应维数。

若 $\|x_i - x_j\| < D$ ( $D$ 为设定门槛值时),用下式对两者中适应度较低的进行惩罚:

$$F_{\min}(x_i, x_j) = Peanlty \quad (23)$$

3)对新种群个体适应度值排序,择优选择出 $N$ 个个体作为下轮迭代的父代种群。

### 3.3 自适应优化算法流程

所提自适应优化算法的流程如下:

1)按照无功控制策略的阈值约束范围初始化分配种群粒子的初始位置和初始速度。

2)计算出粒子个体的最优值和全局最优值,获得粒子最优位置 $p_{best,i}$ 和本轮迭代的全局最优位置 $g_{best}$ 。

3)根据式(18)~式(20)综合计算出种群粒子的进化因子和多样性因子,并更新每个粒子的权重系数 $\omega_i$ ,当 $t_g < t_{gref}$ 时,执行步骤5);反之,按次序执行。

4)结合小生境择优策略选出个体适应度值最好的 $N$ 个粒子,并将该群体作为下轮执行算法优化的父代种群。

5)算法终止条件,若超过算法最大迭代次数或种群粒子适应度在允许误差 $\varepsilon_0$ 内,则算法结束,否则,继续执行步骤2)。

## 4 算例仿真

本文的仿真算例选取一条220 V的低压单相配电网络进行优化分析,网络结构如图5所示。

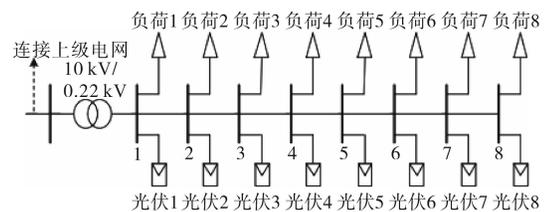


图5 8节点的低压配电馈线

Fig.5 8-node low-voltage distribution feeder

该系统包含了一台配电变压器和一条低压馈线,该馈线共8个并网节点,每个节点接入1户光伏发电用户,线路类型选为架空线路。其中: $R_0=0.65 \Omega/km, X_0=0.65 \Omega/km$ ,相邻节点间的间距为63 m。本文采用的自适应粒子群算法所设定的

参数如下:种群数  $N$  为 200,迭代次数设为 200,允许误差  $\varepsilon_0$  为  $10^{-3}$ ,多样性初始指标  $t_{d0}$  设为 0.5。

考虑到低压配电网系统的各用户相距的地理位置较近,因此,各用户光伏发电出力情况近似一致。图 6 是 24 h 内光伏发电的输出功率分布,每户光伏发电设备的额定功率设为 5 kW,图中反映出光伏发电出力充足但出现明显波动,增加了节点电压越限的运行风险。图 7 是系统 24 h 内的负荷曲线。

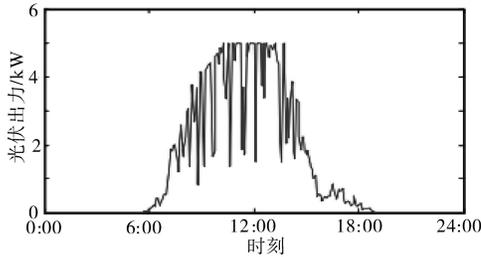


图 6 24 h 内光伏出力分布

Fig.6 Photovoltaic output distribution within 24 h

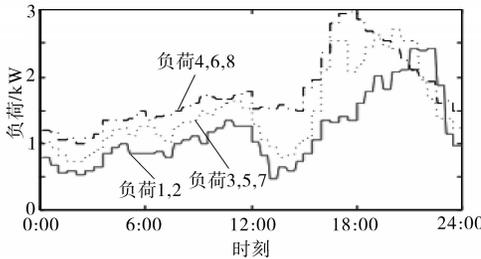


图 7 24 h 内负荷分布

Fig.7 Load distribution within 24 h

图 8 反映了在无容量充裕的前提下 3 种控制策略的优化效果。策略 1(传统控制策略)不对网络节点电压进行优化控制,策略 2 对网络末端节点采用电压-无功控制方法;策略 3(综合控制策略)对网络末端节点采用电压-有功/电压-无功综合控制方法。

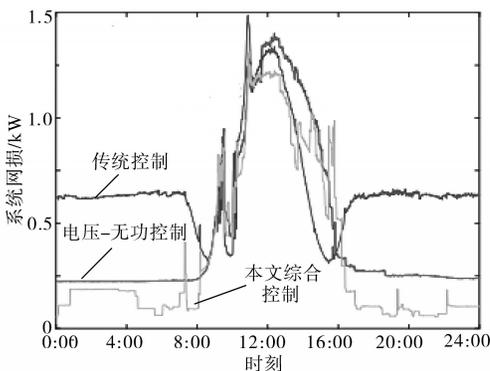


图 8 不同控制策略下的系统网损

Fig.8 System network loss under different control strategies

由图 8 可知,在中午时段光伏资源充足时,系统以外送电为主,在三种电压控制策略下系统网

络损耗均较大,且相差较小。而在其余时段内,系统网损相差较大。24 h 内系统总网络损耗分别为 14.65 kW·h, 10.82 kW·h 和 9.35 kW·h。相比前两种方法,本文的控制方法减少系统网损分别为 56.68% 和 15.40%,所提出的电压控制方法可以有效提高系统经济运行效率。

#### 4.1 无功充裕时控制结果分析

针对系统无功充裕的情况,结合不同时段下的负荷分配和光照强度,含高比例光伏并网的低压配电网节点在 24 h 内会出现电压明显波动的现象,控制效果如图 9~图 11 所示。

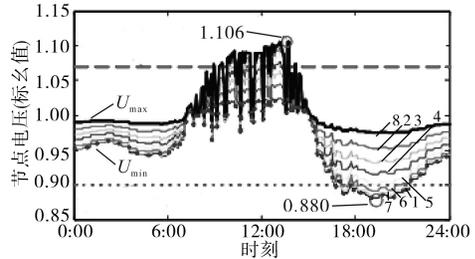


图 9 传统控制效果

Fig.9 Traditional control effect

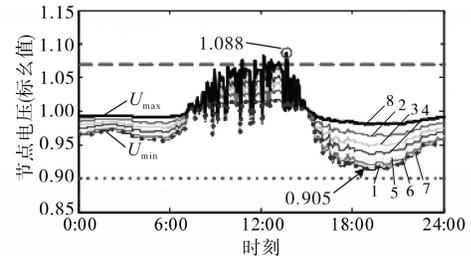


图 10 电压-无功控制效果

Fig.10 Voltage-reactive power control effect

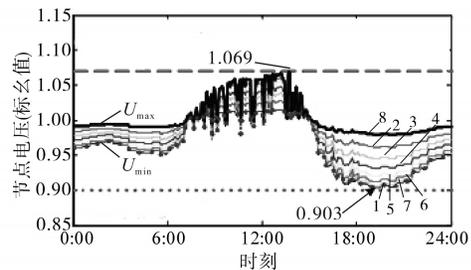


图 11 综合控制效果

Fig.11 Comprehensive control effect

由图 9~图 11 可知,光伏并网下的配网系统仅靠自身的调节能力,无法获得对并网节点电压具有很好控制水平的能力,在光伏系统的逆变器无功调节充裕的前提下仍出现电压越限的情况,节点的最大电压高达 1.106(标么值),如图 9 所示。采用传统的电压-无功控制策略的基础上,调节逆变器无功输出,将网络节点电压控制在合理范围内,但最大电压依然高达 1.08(标么值),如图 10 所示。图 11 为采用电压-有功和电压-无

功的综合控制策略时的控制效果,将网络节点电压控制在合理范围内,采用综合控制策略后,在节点电压下限控制上能够取得更好的控制效果。

#### 4.2 无功不充裕时控制结果分析

针对光伏系统无功调节能力不足的情况,应考虑下调光伏有功出力来抑制并网节点电压超限。电压-无功和综合控制方案下的节点电压控制结果分别如图12、图13所示。

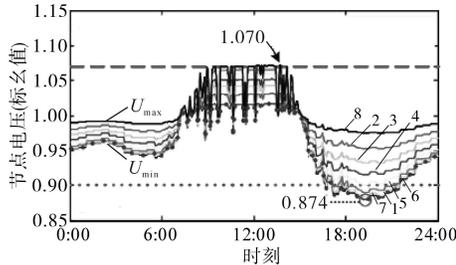


图12 电压-无功控制效果

Fig.12 Voltage-reactive power control effect

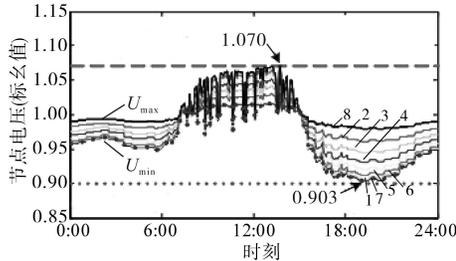


图13 综合控制效果

Fig.13 Comprehensive control effect

图12采用下调光伏有功出力的策略,可有效控制并网节点的电压超限情况,但考虑夜间光伏机组无法提供有功输出,不能通过调节有功来控制并网节点电压。因此,对于节点电压越下限的情况无法有效控制。

图13是采用有功-无功综合控制策略,网络节点电压可通过参数优化,促进逆变器释放出更大无功调节容量,从而有效控制最低电压在0.90(标么值)以上。

#### 4.3 无功充裕/不足情况下系统网络损耗对比

针对系统无功充裕/不足的情况下,结合本文三种控制策略,开展24h内系统网络的损耗分析,具体结果见表1。

表1 不同控制策略下的系统网损

Tab.1 System network loss under different control strategies

优化方法	无功充足		无功不足	
	网损/(kW·h)	光伏削减/kW	网损/(kW·h)	光伏削减/kW
传统控制	14.65	0	20.65	0.00
电压-无功控制	10.82	0	19.52	0.02
综合控制	9.35	0	16.30	16.95

从表1可知,无功充裕的情况下,采用传统控

制方法系统的网损为14.65 kW·h;采用电压-无功控制方法系统的网损为10.82 kW·h;采用综合控制方法系统的网损为9.35 kW·h,综合控制会保证系统更加充盈的无功状态,有效降低系统损耗,但均不涉及光伏有功的限制。无功不足的情况下,采用综合控制方法能在较低的逆变器容量水平下有效依赖削减光伏有功量(16.95 kW),更能确保电压控制的有效性,有效降低网损电量,提高系统运行经济水平。

## 5 结论

通过对低压配网系统中的有功/无功的电压作用机理进行详细分析,推导出了光伏任意并网节点的电压-有功灵敏度和电压-无功灵敏度的量化关系。在此基础上,结合配网系统无功的充裕情况,给出了光伏有功-无功的综合控制方法。

同时,结合低压配网系统通信覆盖较弱的现状,本文提出高比例光伏逆变器有功/无功就地电压综合控制策略。采用光伏逆变器进行无功调节与光伏机组进行有功调节相结合的控制方法,可提高逆变器容量利用率,有效保证低压配网系统节点电压合理控制。通过仿真结果表明,在相同的无功容量条件下,所提方案能够取得更好的控制效率和利用效率。

#### 参考文献

- [1] Demirok E, González P C, Frederiksen K H B, et al. Local reactive power control methods for overvoltage prevention of distributed solar inverters in low-voltage grids[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2011, 1(2): 174-182.
- [2] Bletterie B, Kadam S, Bolgarny R, et al. Voltage control with PV inverters in low voltage networks-in depth analysis of different concepts and parameterization criteria[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 177-185.
- [3] 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 highdensity distributed photovoltaics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1200-1206.
- [4] Olivier F, Aristidou P, Ernst D, et al. Active management of lowvoltage networks for mitigating overvoltages due to photovoltaic units[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 926-936.
- [5] 李振坤,鲍新雨,邵宇鹰,等. 考虑多种调压措施的分布式光伏消纳能力研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8):

- 10-16.  
Li Zhenkun, Bao Xinyu, Shao Yuying, *et al.* Studying accommodation ability of distributed photovoltaic considering various voltage regulation measures[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(8): 10-16.
- [6] 蔡永翔,唐巍,徐鸥洋,等. 含高比例户用光伏的低压配电网电压控制研究综述[J]. *电网技术*, 2018, 42(1): 220-229.  
Cai Yongxiang, Tang Wei, Xu Ouyang, *et al.* Review of voltage control research in LV distribution network with high proportion of residential PVs[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(1): 220-229.
- [7] Ghosh S, Rahman S, Pipattanasomporn M. Distribution voltage regulation through active power curtailment with PV inverters and solar generation forecasts[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 8(1): 13-22.
- [8] Weckx S, Driesen J. Optimal local reactive power control by PV inverters[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(4): 1624-1633.
- [9] 罗继东,黄汉英,王宪磊,等. 光伏电源多接入点对配电网电压分布的影响[J]. *电力电子技术*, 2017, 51(5): 40-43.  
Luo Jidong, Huang Hanying, Wang Xianlei, *et al.* Influence of multiple access points of photovoltaic power supply on distribution network voltage distribution[J]. *Power Electronics*, 2017, 51(5): 40-43.
- [10] 李宏基,郑伟,刘成功,等. 分布式可再生能源接入对配电网电压分布的影响分析[J]. *机电工程技术*, 2018, 47(4): 146-148.  
Li Hongji, Zheng Wei, Liu Chenggong, *et al.* Influence of voltage distribution of distributed renewable energy access on distribution network[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2018, 47(4): 146-148.
- [11] Stetz T, Marten F, Braun M. Improved low voltage grid-integration of photovoltaic systems in Germany[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, 4(2): 534-542.
- [12] Samadi A, Eriksson R, Soder L, *et al.* Coordinated active power-dependent voltage regulation in distribution grids with PV systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29(3): 1454-1464.
- [13] 吴晓飞,戴晖,黄晓剑,等. 挖掘光伏无功能力的配电网无功电压协调控制策略[J]. *电力建设*, 2019, 40(5): 78-89.  
Wu Xiaofei, Dai Hui, Huang Xiaojian, *et al.* Coordinated voltage control strategy of distribution network considering PV's reactive power[J]. *Electric Power Construction*, 2019, 40(5): 78-89.
- [14] 蔡游明,李征,蔡旭. 计及控制时间窗内功率波动的风电场群无功电压分层优化控制[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(6): 1240-1250.  
Cai Youming, Li Zheng, Cai Xu. Voltage hierarchical optimal control of a wind farm cluster in account of voltage fluctuation in control time window[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(6): 1240-1250.
- [15] Gagrca O, Nguyen P H, Kling W L, *et al.* Microinverter curtailment strategy for increasing photovoltaic penetration in low-voltage networks[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, 6(2): 369-379.
- [16] 张海宁,姬丽雯,许长清,等. 基于改进粒子群算法的多路光伏MPPT控制[J]. *电力电子技术*, 2017, 51(5): 39-41.  
Zhang Haining, Ji Liwen, Xu Changqing, *et al.* Control of PV multiple MPPT based on improved PSO[J]. *Power Electronics*, 2017, 51(5): 39-41.
- [17] 卞晶,胡博,谷万江,等. 基于模型设计的孤岛微源逆变器快速开发[J]. *电力电子技术*, 2018, 52(3): 4-7.  
Bian Jing, Hu Bo, Gu Wanjiang, *et al.* Rapid development of island-type micro-source inverter based on the model design method[J]. *Power Electronics*, 2018, 52(3): 4-7.
- [18] 刘斌,姜因,井元伟. 基于模拟退火算法的电力系统输电阻塞成本控制[J]. *控制与决策*, 2010, 25(8): 1184-1188.  
Liu Bin, Jiang Nan, Jing Yuanwei. Cost control of transmission congestion management in electricity systems based on simulated annealing algorithm[J]. *Control and Decision*, 2010, 25(8): 1184-1188.
- [19] Gong Y J, Li J J, Zhou Y, *et al.* Genetic learning particle swarm optimization[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 46(10): 2277-2290.
- [20] 杨文光,严哲,隋丽丽. 基于自适应模拟退火的改进混合粒子群算法[J]. *华北科技学院学报*, 2015, 12(2): 100-103.  
Yang Wenguang, Yan Zhe, Sui Lili. Improved hybrid particle swarm algorithm based on simulated annealing[J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2015, 12(2): 100-103.
- [21] 马松涛. 复杂优化问题中小生境粒子群优化算法的改进及研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2013.  
Ma Songtao. Novel niching particle swarm optimization algorithms for complex optimization problems[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013.

收稿日期:2020-09-21

修改稿日期:2020-11-02