

# 含光伏系统的变电站无功电压控制策略研究

马振亮<sup>1</sup> 刘君伟<sup>1</sup> 蒋敬轩<sup>2</sup>

(1. 浙江容大电力工程有限公司 2. 许昌许继软件技术有限公司)

**摘要：**常规变电站的无功电压控制主要通过调整电容器或电抗器投切、改变变压器变比来实现的，只能进行离散控制。光伏逆变器可以进行连续无功控制，常规变电站的无功电压控制策略没考虑光伏的无功控制问题。本文以传统变电站的九区图控制策略为参考，考虑光伏逆变器可以连续调节无功的特性，构建了含光伏发电系统的变电站无功电压优化控制策略。以某企业内部电网为例进行仿真分析，验证了该控制策略的有效性，可以保证并网接入点的电压和功率因数合格，同时可以减小并网电压波动，并降低网耗。

**关键词：**无功；电压；电容器；变比；网络损耗；光伏

2024.08.DQGY  
17

## 0 引言

当前我国在大力发展绿色低碳经济，积极稳妥推进碳达峰碳中和的政策，光伏等新能源发电容量在电网电源中的比例越来越高。新能源发电的接入改变了传统电网的结构，对电网的无功电压特性也产生很大的影响。大规模新能源发电基地通过集中式接入电网，新能源场站的无功电压控制策略通过协调控制场站内各类无功设备，协调不同无功电压调节措施的性能差异，对区域内的无功电压进行优化控制，可以实现新能源并网区域内无功电压均在合格范围内，保证并网区域的电压安全。光伏逆变器可以参与无功电压控制，在现有文献中，对大规模光伏发电并网无功电压控制问题进行了较多的研究。

文献 [1] 以逆变器和静止无功发生器 (SVG) 为研究对象，研究了一种光伏和 SVG 无功置换和协调控制

的方法。文献 [2] 提出一种考虑自注意力和时序记忆的多智能体深度强化学习控制策略，将无功电压控制问题建模为分布式部分可观测马尔可夫决策过程，该控制策略能够提取状态特征等信息。文献 [3] 研究了光伏电源参与配电网无功电压调节的控制策略，综合考虑光伏逆变器的 IGBT 结温限值整定原则。文献 [4] 提出了一种时间序列控制结构无功电压控制策略，减少了离散设备的动作次数。文献 [5] 将模型预测控制算法引入到无功电压控制算法中，并加入参数自适应环节，形成自适应模型预测算法。文献 [6] 考虑光伏逆变器输出无功和有功的关系，提出一种可以主动调整光伏出力的无功电压控制策略，实现各个光伏集群无功分配的协调控制。

在光伏等集中接入的新能源厂站，无功电压控制技术在研究上取得不少成果<sup>[7]</sup>，但涉及光伏等新能源发电接入常规变电站，对原有的无功电压控制策略产生的

影响，相关的研究较少。本文参考大规模新能源基地现有的无功电压控制技术和常规变电站的无功电压控制策略，考虑光伏发电系统的无功电压特性，构建一种含光伏发电系统的变电站无功电压优化控制策略。

### 1 典型变电站的九区图控制策略

对变电站进行无功电压控制，可以保证无功就地平衡，满足电压合格的要求。一般终端降压变电站高压侧潮流的功率因数作为电网企业的监测点，防止无功传输过多或无功倒送，提高该处的功率因数，可以减小无功的流动，实现经济性；而低压侧母线常常调压中枢点，保证负荷的电压正常，减小负荷电压的波动。九区图是一种典型的变电站无功电压的控制策略，其控制目标为实现变电站区域内无功平衡、功率因数并保证中枢母线的电压正常。图1为典型变电站的等效电路，该变电站的无功电压控制目标为降压变压器高压侧的无功功率  $Q$ （或  $\cos\varphi$ ，下文以无功功率  $Q$  为对象进行分析）和低压母线的电压  $U$ 。

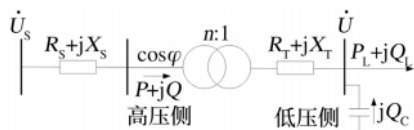


图1 典型变电站的等效电路

以变压器流过的无功功率  $Q$  和低压侧母线的电压  $U$  为坐标系，考虑无功负荷和电压的上下限约束条件，将无功  $Q$  和电压  $U$  的坐标平面分为不同的区块，形成不同的控制区域。如图2所示，根据实际无功  $Q$  和电压  $U$  在坐标系中的位置，构建控制策略，实现控制目标的合格。

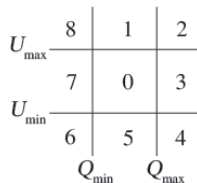


图2 九区图

当增加无功电源补偿容量时，流过变压器的无功负荷变小，母线电压也会升高；当减小无功补偿容量时，流过变压器的无功负荷增大，母线电压也会降低。同样，改变变压器的分接头主要改变电压的幅值大小，电压的改变也会影响负荷消耗的无功。当变压器的变比减小时，变压器低压侧母线电压会升高，负荷消耗的无功增大；当变压器的变比增大时，变压器低压侧母线电压会降低，负荷消耗的无功减小。据此，可得变电站无功电压调整的思路：当电压不合格时，首先调节变压器的变比，若变比档位达到最高档或最低档，则调节无功补偿容量；当无功不合格时，首先调节无功补偿容量，若无功补偿的容量用尽或全部切除，则调节变压器的变比；当无功和电压均不合格时，优先调节变压器的变比，使电压合格，再调节无功补偿容量，使无功负荷合格。不同区域对应的调节措施如表1所示。

表1 不同区域的调节措施

区域	优先调节对象
区域0	不动作
区域1、2	变压器分接头
区域3、4	电容器组
区域5、6	变压器分接头
区域7、8	电容器组

在调整过程中，若变压器的分接头到达最高档或最低档，控制目标仍不满足要求，再投切电容器组；同样，若电容器已全部投切，控制目标仍不满足要求，再调节变压器分接头。

### 2 光伏接入系统的无功电压控制模型

#### 2.1 无功电压控制手段

大规模新能源厂站中无功电压控制的设备主要包括并联电容器、并联电抗器、变压器分接头、静止无功补偿器、静止无功发生器、光伏逆变器等<sup>[10]</sup>。其中并联电容器、并联电抗器为成组安装的，只能进行整

组投切控制，变压器分接头也是按照机械切换进行固定匝数调整，均为离散变量，控制反应时间均较长。静止无功补偿器、静止无功发生器和光伏逆变器均是通过电力电子器件进行控制的，调节精度较高，动作时间快，可以实现无功电压的连续调节。考虑无功设备的控制性能差异，可以形成大规模新能源厂站无功设备之间的协调优化控制，离散设备进行粗调，连续设备进行细调，可完成无功电压的优化控制目标。

常规变电站中无功电压控制策略只有变压器分接头的控制和电容器投切量的控制，只能进行离散调节，属于粗略控制，无论是变压器的分接头还是电容器的投切，控制目标也只是将无功和电压调整到合适的区域。当光伏发电系统接入常规变电站后，光伏逆变器可以发出一定的无功功率<sup>[11]</sup>，参与无功电压控制的协调控制，属于连续调节，电容器和光伏逆变器按“离散变量优先动作，连续变量精细调节”原则分配。因此考虑光伏逆变器可以连续发出无功的特性，当离散变量调节无功和电压调整到合适的区域，连续变量的光伏逆变器再动作，进行优化无功电压控制，减小网络的有功功率损耗，使目标电压波动更小。

## 2.2 目标函数

电力系统的无功电压优化模型，一般选择网络损耗、电压偏移、离散设备的动作次数等最小作为目标函数，分别表征了电力系统运行的经济性、电压质量和安全三个方面<sup>[10]</sup>。网络损耗最小可以优化网的无功流动，减小无功流动产生的有功损耗，体现在经济性方面。监测考核点的无功或功率因数、中枢点的电压偏移等可以用于反映电压质量。分时间段控制厂站内无功设备投入，减小离散设备（特别是电容器组容易频繁投切易造成开关触头故障）的动作次数，提高设备的机械寿命，可以保障设备的运行安全。本文的无功电压控制的最优目标选取电压偏差和网络有功功率损耗综合最小，离散设备的动作次数作为约束限制。

### (1) 电压偏差

电压合格可以保证负荷的电压质量，提高系统的电压安全，以变电站低压母线的实际电压与电压目标值的偏差平方和最小为目标：

$$f_1 = (U - U_{\text{ref}})^2 \quad (1)$$

式中， $U$  和  $U_{\text{ref}}$  分别为变电站低压母线的实际电压与控制参考值。

### (2) 网络有功功率损耗

光伏接入区域电网的有功功率损耗可表示为：

$$f_2 = P_{\text{loss}} = \sum_{k=1}^{N_k} G_{k(i,j)} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos(\theta_i - \theta_j)) \quad (2)$$

式中， $N_k$  为系统支路数； $G_{k(i,j)}$  为支路的电导。

光伏接入的变电站无功电压协调控制的主要目标是该变电站低压母线的电压偏移最小和光伏接入区域电网有功功率损耗最小，因此，计及光伏接入区域电网的电压质量和经济运行，构造目标函数为：

$$\min F = a_1 f_1 + a_2 f_2 \quad (3)$$

式中， $a_1$ 、 $a_2$  分别为  $f_1$ 、 $f_2$  在目标函数中的权重系数，且  $a_1 + a_2 = 1$ 。

## 2.3 约束条件

### (1) 潮流方程约束

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + jB_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - jB_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (4)$$

式中， $P_i$  和  $Q_i$  分别为节点  $i$  注入的有功功率、无功功率； $U_j$  分别为节点  $j$  的电压幅值； $\delta_{ij}$  为节点  $i$  与  $j$  之间的相角差； $G_{ij} + jB_{ij}$  为节点  $i$  与  $j$  之间的互导纳； $G_{ii} + jB_{ii}$  为节点  $i$  的自导纳。

### (2) 控制变量的约束条件

控制变量为变电站的静止电容器、光伏逆变器、变压器的变比。

$$Q_{Cmin} \leq Q_C \leq Q_{Cmax} \quad (5)$$

式中,  $Q_{Cmin}$ 、 $Q_C$ 、 $Q_{Cmax}$  分别为电容器和光伏逆变器发出的无功功率下限、实际值、上限。

$$n_{min} \leq n \leq n_{max} \quad (6)$$

式中,  $n_{min}$ 、 $n$ 、 $n_{max}$  分别为变压器分接头位置的下限、实际值、上限。

$$N_{min} \leq N \leq N_{max} \quad (7)$$

式中,  $N_{min}$ 、 $N$ 、 $N_{max}$  分别为离散设备(电容器、变压器分接头)动作次数的下限、实际值、上限。

### (3) 状态变量的约束条件

状态变量为电力系统各节点电压的幅值和相位, 光伏接入电网内各节点电压幅值必须满足电压安全性约束, 具体如下:

$$U_{imin} \leq U_i \leq U_{imax} \quad (8)$$

式中,  $U_{imin}$ 、 $U_i$ 、 $U_{imax}$  分别为区域电网节点  $i$  的电压幅值下限、实际值、上限。

光伏接入电网内各节点电压相位必须满足稳定运行的约束, 具体如下:

$$\delta_{ijmin} \leq \delta_{ij} \leq \delta_{ijmax} \quad (9)$$

式中,  $\delta_{ijmin}$ 、 $\delta_{ij}$ 、 $\delta_{ijmax}$  分别为区域电网节点  $i$  与  $j$  的电压相位下限、实际值、上限。

### (4) 控制目标的约束

光伏接入的电站需要控制电压和无功(即功率因数)合格, 控制目标为:

$$U_{min} \leq U \leq U_{max}, Q_{min} \leq Q \leq Q_{max} \quad (10)$$

式中,  $U_{min}$ 、 $U_{max}$ 、 $Q_{min}$ 、 $Q_{max}$  分别为控制目标的电压和无功功率上下限值。

## 3 无功电压控制策略

### (1) 越限控制方式

当光伏接入的变电站电压或无功功率不满足要求, 即  $Q \notin (Q_{min}, Q_{max})$ 、 $U \notin (U_{min}, U_{max})$ , 出现电压或无功越限时, 无功电压控制策略进行越限控制方式。在

控制过程中, 首先应判断越限目标所在的区域, 根据所在区域的控制策略, 调整电容器组的投切或变压器的分接头动作, 使电压或无功调整到合格区域, 电压或无功得到恢复。

### (2) 优化控制方式

当光伏接入的电站电压或无功功率都满足要求, 处于正常运行区, 即  $Q \in (Q_{min}, Q_{max})$  且  $U \in (U_{min}, U_{max})$ , 电压和无功均没有发生越限, 光伏接入的电站无功电压控制系统运行于电压优化控制模式。光伏逆变器执行优化控制程序下发的无功调整指令, 通过调整光伏逆变器的输出无功功率, 使得目标电压偏移最小和网络的有功功率损耗最小。

### (3) 控制流程

如图 3 所示, 由监控点采集到的电压和无功信息, 判断电压和无功是否越界。如果越界, 采用越界控制方式。如果不越界, 则进行优化控制方式。

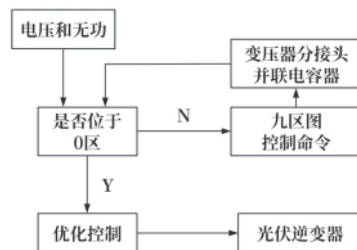


图 3 电压无功控制策略

## 4 简单光伏接入系统的仿真

某企业采用 110kV 降压变电站供电, 低压侧含有光伏发电系统, 如图 4 所示, 企业用电负荷已等效, 该企业光伏发电系统通过四段汇流母线接入主变低压母线, 四组无功补偿装置均为电容器组, 无功电压控制目标实现企业内部无功功率平衡, 可以减少电网向企业的无功功率传输, 保证 10kV 母线负荷电压满足要求, 本文设定的目标函数为低压母线电压偏移和该网络损耗综合最小, 权重系数  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别取 0.6、0.4。

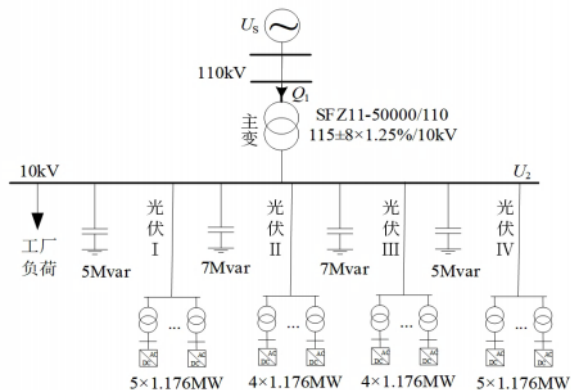


图4 光伏发电系统等效电路

针对该含光伏系统的局部电力网络，考虑以下三种情况，进行仿真分析。

- 1) 无任何补偿装置，电容器和光伏逆变器均不参与无功补偿控制。
- 2) 只有电容器进行投切控制，光伏逆变器不进行无功补偿控制。
- 3) 电容器和光伏逆变器同时参与无功补偿控制。

企业内部原始负荷和光伏出力特性如图5所示，光伏出力改变了企业的负荷曲线，考虑光伏特性后的综合负荷曲线在白天时最大负荷变小了，同时最大负荷出现的时间也变化了。

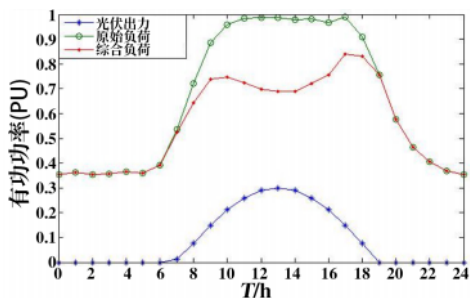


图5 负荷曲线

如图6所示，在没有任何无功补偿时，电压幅值较低，仅有电容器补偿，光伏不参与无功控制时，电压虽然合格，但是波动较大，当光伏参与优化控制时，电压最平稳。

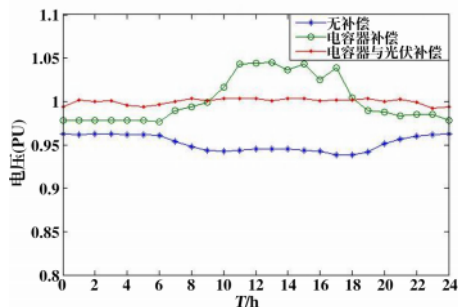


图6 不同控制模式的电压曲线

如图7所示，在没有任何无功补偿时，电网侧向企业传输的感性无功最多，功率因数也是最低的；在仅有电容器补偿和光伏参与优化控制时，减少了感性无功的流动，变压器高压侧的功率因数均符合要求，两种情况的功率因数时高时低，因为电容器可能过补偿，光伏逆变器吸收部分无功，可以看出光伏参与优化控制对功率因数的影响不明显。

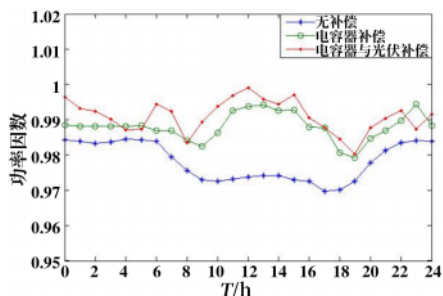


图7 不同控制模式的功率因数

如图8所示，在没有任何无功补偿时，电力网络需要传输较多的无功，网络的有功功率损耗也最大；仅有电容器补偿，网络损耗明显下降；当光伏参与优化控制时，网络损耗比只有电容器时的情况更小，因为优化控制目标设置了网络损耗最小作为目标函数。

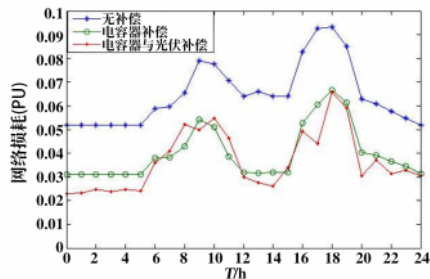


图8 不同控制模式的网络损耗

### 5 结束语

在常规变电站电压无功控制中，无功电压的控制措施仅有电容器和变压器的分接头两种离散的控制手段，当光伏接入变电站后，考虑光伏逆变器可以连续调节无功，可以实现无功电压的优化控制。本文在传统九区图无功电压控制策略的基础上，构造了考虑光伏逆变器无功特性的优化控制策略，设置电压偏移和网络有功损耗的优化控制目标，通过光伏接入的某企业变电站进行仿真分析，该控制策略可以保证电压稳定和功率因数合格，并减小了电压波动，同时可以降低网络有功损耗。

### 参考文献

- [1] 邱文俊, 李玉齐, 支晓晨, 等. 光伏电站逆变器与静止无功发生器进行无功电压控制策略研究与应用 [J]. 湖南电力, 2023, 43 (6): 138-143.
- [2] 刘硕, 冯斌, 郭创新, 等. 考虑自注意力和时序记忆的深度学习配电网无功电压控制策略 [J/OL]. 中国电机工程学报:1-13[2024-03-20].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107-tm.20231007.1822.004.html>.
- [3] 张波, 高远, 李铁成, 等. 计及 IGBT 结温约束的光伏高渗透配电网无功电压优化控制策略 [J]. 电工技术学报, 2024, 39 (5): 1313-1326.
- [4] 陈志华, 柯强, 胡经纬, 等. 含分布式光伏的有源配电网无功电压控制策略研究 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43 (2): 16-24.
- [5] 李德鑫, 王佳蕊, 张家郡, 等. 基于自适应模型预测算法的光伏并网逆变器无功电压控制策略研究 [J]. 可再生能源, 2021, 39 (8): 1087-1093.
- [6] 俞智鹏, 汤奕, 戴剑丰, 等. 基于有功自适应调整的光伏电站无功电压控制策略 [J]. 电网技术, 2020, 44 (5): 1900-1907.
- [7] 顾泰宇, 孙丝萝, 田野, 等. 高比例分布式光伏并网无功电压控制方法综述 [J]. 东北电力技术, 2023, 44 (3): 1-5, 26.
- [8] 严玉廷, 苏适, 杨洋, 等. 基于九区图的风电场电压无功控制分析 [J]. 云南电力技术, 2016, 44 (4): 102-106.
- [9] 侯雪. 基于多区图的变电站电压无功综合调控策略研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- [10] 孙亚璐. 酒泉地区大规模风电无功电压控制策略研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
- [11] 吴博, 金岗, 冯竹建, 等. 光伏逆变器参与电网无功电压控制策略 [J]. 电力与能源, 2022, 43 (5): 429-433.
- [12] 刘中原, 王维庆, 王海云, 等. 并网型光伏系统无功电压稳定性控制策略研究 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38 (6): 130-137.
- [13] 唐一铭, 顾文, 蒋琛, 等. 大型并网光伏电站无功电压控制策略与现场试验 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39 (5): 142-148.
- [14] 刘双, 张建周, 王汉林, 等. 考虑多无功源的光伏电站两阶段无功电压协调控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41 (11): 120-125, 168.
- [15] 张智光, 倪秋龙, 廖培, 等. 计及新能源消纳的地区电网无功电压优化控制策略 [J]. 浙江电力, 2023, 42 (1): 46-53.

(收稿日期: 2024-03-12)