

# 光伏电站参与电网主动调压的无功优化控制方法

王 贤<sup>1,2</sup>, 刘文颖<sup>1</sup>, 夏 鹏<sup>1</sup>, 聂雅楠<sup>1</sup>, 王维洲<sup>3</sup>

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 国网天津市电力公司建设分公司, 天津 300143;  
3. 国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:**随着光伏发电渗透率以及系统对电能质量要求的提高,常规电源电压调节能力不足,而光伏电站因具有一定的无功容量而具备主动参与电网调压的潜力。在分析光伏电站电压调节特性的基础上,提出光伏电站参与电网主动调压的控制方法;针对光伏电站有功出力与电网负荷大小之间的矛盾性,引入光伏电站负载率和区域电网负荷率的概念,进而确定光伏电站主动调压的控制原理及目标;在此基础上,建立自上而下的光伏电站双层无功优化模型,上层优化模型用于跟踪并网点电压控制目标,下层优化模型将上层优化结果在各组无功补偿单元之间进行优化分配,实现光伏电站参与电网主动调压的精细化控制。以某地区电网为例,验证了所提方法的有效性。

**关键词:**光伏电站;主动调压;无功优化;双层模型;精细化控制

**中图分类号:**TM 721;TM 615

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202006022

## 0 引言

为解决能源危机和环境问题,我国光伏(PV)发电产业取得了长足发展。据国家能源局统计,截至2019年9月,我国光伏发电新增装机容量15.99 GW,累计装机容量190.19 GW,累计装机容量居全球第一<sup>[1]</sup>。但随着光伏发电装机容量的增加,常规电源接入比例逐渐减小,显著削弱了电网动态调压能力<sup>[2]</sup>,因此,需挖掘光伏电站参与电网主动调压的潜力<sup>[3-4]</sup>。

研究光伏电站参与电网电压控制的问题,对于提高系统运行的经济性和稳定性、促进新能源持续健康发展具有重要意义。目前针对光伏电站电压控制的研究主要分为以下2个方面。

(1)以平抑并网点电压波动为目标的恒调压控制方法。该方面的研究主要集中于光伏电站层面,通过PI(Proportion Integration)跟踪控制法<sup>[5-6]</sup>、灵敏度分析法<sup>[5,7]</sup>、优化类算法<sup>[8]</sup>等方法对并网点电压进行控制,借维持并网点电压恒定达到辅助控制电网电压稳定的目的。文献[5]利用PI跟踪控制器自动获取维持并网点电压恒定所需的无功参考量,并通过灵敏度分析法实现站内无功的合理分配。文献[7]提出一种光伏电站3层无功控制策略,利用灵敏度分析法实现站内无功电压的精细化控制。文献

[6]舍弃基于灵敏度的无功分配方法,提出利用集电线路损耗进行无功优化分配的方法,但该方法受光伏电站拓扑结构的影响较大。文献[8]创造性提出一种双阶段无功优化控制方法,通过静态无功与动态无功的置换,提高电网应对电压波动的能力。以上方法在一定程度上提高了电网运行的稳定性,但是仅仅以维持并网点电压恒定为控制目标,在系统负荷峰谷时段或者光伏出力大幅度波动时段,对电网电压波动的辅助控制达不到显著效果。

(2)以抑制电压越限风险为目标的反馈控制方法。该方面研究以抑制并网点电压越限为目标,通过在线监测系统实时获取并网点电压,对超出电压控制区间的情况做出紧急控制<sup>[9-13]</sup>。文献[9]建立光伏并网引起并网点电压偏差的数学模型,推导出以电压偏差不越限为约束的光伏准入容量。文献[10]针对并网点低电压穿越问题,提出一种改进型全电压前馈控制策略,改善了低电压穿越期间的过电流和谐波问题。文献[11]针对高渗透率电网潮流逆向和电压越上限问题,提出一种针对光伏逆变器的电压控制策略,从源头上缓解了电压越限的危害。文献[12]提出一种考虑光伏出力和负荷不确定性的鲁棒区间电压控制法,给出光伏电站的最优出力区间和最优无功补偿方式。文献[13]将光伏电站并网问题划分为过电压抑制、欠电压抑制及网损和功率因数的优化模式,实现了多场景下光伏电站无功电压控制。这些方法解决了并网点电压越限问题,防止了电网电压的进一步恶化,但本质上仍是一种被动电压控制方法,不能充分发挥光伏电站无功调节能力。

根据国家标准规定<sup>[14]</sup>,光伏电站应该具备参与电网主动调压的能力。基于此,本文提出利用光伏电站参与电网主动调压的控制方法,针对光伏电站有功出力与电网负荷间的矛盾性,引入光伏电站负载

收稿日期:2020-01-06;修回日期:2020-04-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFE0208400);国家电网公司科技项目(SGGSKY00DJJS1900391);国网甘肃省电力公司科技项目(SGGSKY00DJJS1900211)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2018YFE0208400), the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China (SGGSKY00DJJS1900391) and the Science and Technology Program of State Grid Gansu Electric Power Company (SGGSKY00DJJS1900211)

率和区域电网负荷率的概念,确定光伏电站主动调压控制原理及控制目标;在此基础上,建立自上而下的光伏电站双层无功优化模型,上层优化模型用于响应电网电压控制需求,下层优化模型将上层优化结果在各组光伏发电单元PVGU(PV Generation Unit)和SVG(Scalable Vector Graphics)间进行优化分配,实现光伏电站参与电网主动调压的精细化控制。最后,以某地区电网为例,验证所提方法的有效性。

## 1 光伏电站电压调节特性分析

以图1所示光伏电站及其接入系统模型为例,光伏电站内部包括 $n$ 回集电线路,每回集电线路并联 $m$ 组PVGU,集电线路母线处装有SVG,经10 kV/110 kV主变压器升压后接入远距离输电线路。图中, $U$ 为集群点电压; $U_{PCC}$ 为并网点电压; $U_{nm}$ 为第 $n$ 条馈线第 $m$ 个接入点电压; $R_g + jX_g$ 为远距离输电线路的阻抗; $R_{nm} + jX_{nm}$ 为第 $n$ 条馈线第 $m$ 段线路阻抗。

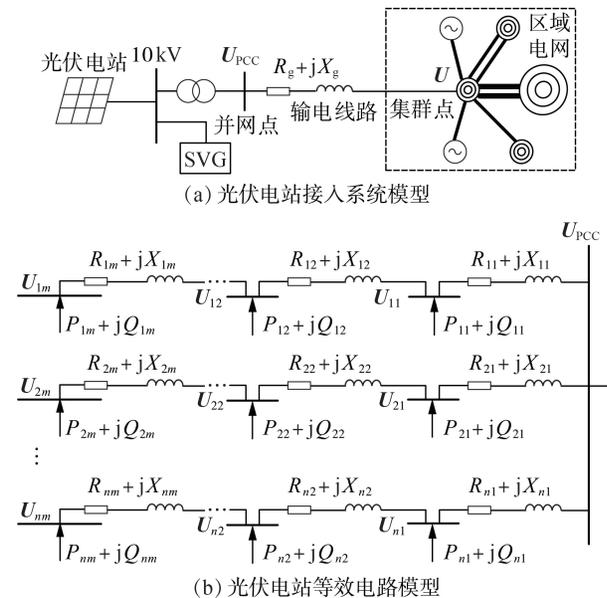


图1 光伏电站及其接入系统模型

Fig.1 Model of PV station and its access system

### 1.1 光伏电站并网点电压调节特性分析

将光伏电站等效为一个整体,由图1可知,光伏电站并网点电压和电网电压存在以下关系:

$$U = U_{PCC} - dU = U_{PCC} - \Delta U - j\delta U \quad (1)$$

其中, $dU$ 为输电线路上的电压降; $\Delta U$ 为横向电压降; $\delta U$ 为纵向电压降。

由于 $\delta U$ 较小,可忽略不计,整理得:

$$\begin{cases} U = U_{PCC} - (-AP_{PCC}^2 + BP_{PCC} + C)/U \\ A = (R_g^2 + X_g^2)/U^2 \\ B = R_g \\ C = -[(R_g^2 + X_g^2)Q_{PCC}]/U^2 + X_L Q_{PCC} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $U$ 、 $U_{PCC}$ 分别为集群点和并网点电压的模值;

$P_{PCC}$ 、 $Q_{PCC}$ 分别为光伏电站输出的有功、无功功率。

由式(2)知,电网电压 $U$ 受光伏电站输出功率和并网点电压 $U_{PCC}$ 的影响,在光伏电站无功裕度充足的情况下,通过调整其输出的无功功率 $Q_{PCC}$ 提高并网点电压 $U_{PCC}$ ,即可实现对电网电压 $U$ 的辅助控制。

### 1.2 光伏电站站内电压调节特性分析

研究光伏电站站内无功电压调节特性需要对每一组PVGU接入点的电压调节特性进行分析。取其中一回集电线路进行分析,忽略 $\delta U$ ,则第 $i$ 组PVGU接入点电压可以表示为:

$$\begin{cases} U_i = U_{i-1} + \frac{\sum_{k=i}^m P_k (-I_k^2 R_k) R_i + \sum_{k=i}^m Q_k (-I_k^2 X_k) X_i}{U_{i-1}} \\ U_0 = U'_{PCC} \end{cases} \quad (3)$$

$i = 1, 2, \dots, m$

其中, $U'_{PCC}$ 为光伏电站并网点低压侧电压; $P_k$ 、 $Q_k$ 分别为第 $k$ 组PVGU发出的有功、无功功率; $R_k + jX_k$ 为第 $k$ 组与第 $k-1$ 组PVGU间的线路阻抗; $I_k$ 为流过第 $k$ 段集电线路的电流; $U_i$ 为第 $i$ 组PVGU接入点电压。

由式(3)可知,当PVGU有功出力确定时,其接入点电压除了受并网点电压影响外,还与自身及其他PVGU的无功出力有关。因此,研究站内无功电压调节特性,对于改善光伏电站内部的电压分布、维持光伏电站安全稳定运行具有重要作用。

### 1.3 光伏电站无功电压调节对有功损耗的影响

研究光伏电站电压调节特性的同时还应考虑无功分布对有功损耗的影响,取其中一段集电线路进行分析,其有功损耗可以表示为:

$$\Delta P_{i, \text{loss}} = \frac{\left[ \sum_{k=i}^m (P_k - I_k^2 R_k) \right]^2 + \left[ \sum_{k=i}^m (Q_k - I_k^2 X_k) \right]^2}{U_i^2} R_i \quad (4)$$

光伏电站内部集电线路总的有功损耗为:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{N'} \Delta P_{i, \text{loss}} \quad (5)$$

其中, $N'$ 为光伏电站内部相邻PVGU之间集电线路总段数; $\Delta P_{i, \text{loss}}$ 为第 $i$ 段线路产生的有功损耗。

由式(4)知,光伏电站内部有功损耗与PVGU无功出力及集电线路阻抗有关。当PVGU无功出力 $Q_k$ 小于无功损耗 $I_k^2 X_k$ 时,处于无功缺额状态,且有功损耗随无功缺额量的增加而增加;当PVGU无功出力 $Q_k$ 大于无功损耗 $I_k^2 X_k$ 时,处于无功多发状态,且有功损耗随无功出力的增加而增加。因此,合理配置各组PVGU间的无功出力,对减小光伏电站内部有功损耗、维持光伏电站经济稳定运行具有重要作用。

## 2 光伏电站主动调压控制原理及特点

### 2.1 光伏电站主动调压控制原理

常规电源通常采用逆调压控制原理参与电网主

动调压,即在负荷高峰时段升高并网点电压,在负荷低谷时段降低并网点电压。

与常规电源电压控制原理不同,光伏电站有功出力的大小与电网负荷的变化不存在相关性<sup>[15]</sup>,具体分析详见附录。因此,光伏电站主动参与电网电压控制,需要同时考虑光伏出力大小和电网负荷大小2个因素。为此,本文引入光伏电站负载率 $\beta$ 和区域电网负荷率 $\eta$ 的概念。定义光伏电站负载率 $\beta$ 为当前时刻有功功率与额定功率之比:

$$\beta = P_{PV\Sigma} / P_{PV\max} \quad (6)$$

其中, $P_{PV\Sigma}$ 为光伏电站总的有功出力; $P_{PV\max}$ 为光伏电站的额定功率。

同理,定义区域电网负荷率 $\eta$ 为系统当前有功负荷与最大有功负荷之比:

$$\eta = P_{L\Sigma} / P_{L\max} \quad (7)$$

其中, $P_{L\Sigma}$ 为系统当前有功负荷; $P_{L\max}$ 为系统最大有功负荷。

根据国家标准规定<sup>[16-17]</sup>:通过110 kV电压等级并网的光伏电站应能控制并网点电压在标称电压的97%~107%,即并网点电压应控制在0.97~1.07 p.u.。因此,本文参考常规电源电压考核标准,对不同时段光伏电站电压控制目标做出定性分析如表1所示(表中并网点电压为标么值)。

表1 不同时段光伏电站并网点电压理想控制范围

Table 1 Ideal voltage control range of PV station in different periods

时段	光伏出力	电网负荷	无功需求	并网点电压
22:00至次日08:00	小	小	小	0.98~1.02
08:00—12:00	较小	大	较大	1.00~1.05
12:00—16:00	大	较大	大	1.02~1.06
16:00—22:00	较小	大	较大	1.00~1.05

在表1所示母线电压理想控制范围的基础上,本文进一步采用线性化方法,将光伏电站负载率 $\beta$ 和区域电网负荷率 $\eta$ 所对应的电压理想控制范围转换为电压理想控制目标 $U_{obj}$ ,其标么值形式为:

$$U_{obj} = \begin{cases} 0.98 & \eta \leq \eta_{\min}, \beta \leq \beta_{\min} \\ 0.98 + a \frac{\beta - \beta_{\min}}{\beta_{\max} - \beta_{\min}} + b \frac{\eta - \eta_{\min}}{\eta_{\max} - \eta_{\min}} & \eta_{\min} < \eta < \eta_{\max}, \beta_{\min} < \beta < \beta_{\max} \\ 1.06 & \eta \geq \eta_{\max}, \beta \geq \beta_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\beta_{\max}$ 、 $\beta_{\min}$ 分别为光伏多发和少发时段光伏电站的负载率阈值; $\eta_{\max}$ 、 $\eta_{\min}$ 分别为负荷高峰和低谷时段区域电网的负荷率阈值; $U_{obj}$ 为光伏电站并网点电压控制目标; $a$ 、 $b$ 为相应的权重系数,且 $a + b = 0.08$ 。

## 2.2 光伏电站主动调压控制特点

主动调压控制,即根据预测系统使光伏电站在电网电压降低前增加无功出力,升高并网点电压,在

电网电压升高前吸收过剩的无功,降低并网点电压,最终达到主动参与电网调压的目的。

以图1所示光伏电站为例进行分析。分别对光伏电站采取主动调压控制和恒调压控制,仿真可得并网点和上级集群点电压波动曲线如图2所示(图中电压均为标么值)。由图可见,当光伏电站采取恒调压控制时,在一定程度上减小了并网点电压的波动,但是对集群点的辅助调压作用并不显著。

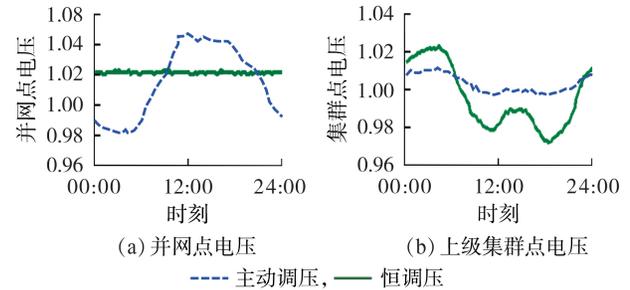


图2 并网点和集群点电压控制曲线

Fig.2 Voltage control curves of point of common coupling and cluster point

当光伏电站采取主动调压控制时,光伏少发和负荷低谷时段维持较低的并网点电压,避免了因为输电线路轻载而导致末端电压升高的情况;光伏多发和负荷高峰时段升高并网点电压,抵偿了输电线路重载时因功率流动而产生的电压降落,使得集群点电压基本能维持在额定电压附近,在电网动态调节能力不足时为系统提供一定的无功支撑。

## 3 光伏电站参与电网主动调压的无功优化控制方法

从图2可以看出,光伏出力多发时段和负荷高峰时段要求升高并网点电压,这就导致该情况下光伏电站无功需求量更大,光伏电站内部电压分布条件更加恶劣,严重时可能导致PVGU因接入点电压越限而脱网<sup>[18]</sup>。为了配合光伏电站参与电网主动调压,保证光伏电站运行的稳定性和经济性,本文建立光伏电站参与电网主动调压的双层无功优化模型。

### 3.1 光伏电站参与电网主动调压的双层无功优化模型

#### 3.1.1 上层无功优化模型

上层无功优化主要考虑光伏电站无功出力和并网点电压的关系,优化模型如下。

(1)目标函数。以光伏电站并网点电压偏差最小为目标,建立目标函数如下:

$$\min f_1 = |U_{PCC} - U_{PCC,obj}| \quad (9)$$

其中, $U_{PCC,obj}$ 为光伏电站主动调压控制模式下并网点电压控制目标。

(2)约束条件。光伏电站输出功率需要满足所

在区域电网的潮流方程约束:

$$\begin{cases} P_{\text{PCC}} = U_x \sum_{y=1}^{N_s} U_y (G_{xy} \cos \delta_{xy} + B_{xy} \sin \delta_{xy}) \\ Q_{\text{PCC}} = U_x \sum_{y=1}^{N_s} U_y (G_{xy} \sin \delta_{xy} - B_{xy} \cos \delta_{xy}) \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $U_x, U_y$  分别为第  $x, y$  个节点的电压值;  $G_{xy}, B_{xy}$  分别为节点  $x, y$  之间的电导和电纳;  $\delta_{xy}$  为节点  $x, y$  之间电压的相角差;  $N_s$  为光伏电站所在系统的节点数。

优化过程中, 控制变量  $Q_{\text{set}}$  和状态变量  $U_{\text{PCC}}$  还应满足一定的不等式约束条件, 具体如下:

$$\begin{cases} |Q_{\text{set}}| \leq \sum Q_{\text{PV}_{\text{max}}} + Q_{\text{SVG}_{\text{max}}} \\ U_{\text{PCC}_{\text{min}}} \leq U_{\text{PCC}} \leq U_{\text{PCC}_{\text{max}}} \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $Q_{\text{set}}$  为光伏电站实际发出的无功功率;  $\sum Q_{\text{PV}_{\text{max}}}$  为光伏电站内部 PVGU 总的感性无功容量;  $Q_{\text{SVG}_{\text{max}}}$  为 SVG 的感性无功容量;  $U_{\text{PCC}_{\text{max}}}, U_{\text{PCC}_{\text{min}}}$  分别为光伏电站并网点电压上、下限。

### 3.1.2 下层无功优化模型

下层无功优化将上层无功优化结果  $Q_{\text{set}}$  作为已知量下发执行, 通过优化各组 PVGU 和 SVG 的无功出力, 一方面, 使光伏电站内部的电压分布更加合理, 另一方面, 尽可能减小光伏电站内部的有功损耗。具体优化模型如下。

(1) 目标函数。

a. 以站内各组 PVGU 接入点电压均方差最小为目标, 建立目标函数如下:

$$\min f_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( U_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \right)^2} \quad (12)$$

其中,  $N$  为光伏电站内部 PVGU 组数。

b. 以站内集电线路有功损耗最小为目标, 建立目标函数如下:

$$\min f_2 = P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^N \Delta P_{i, \text{loss}} \quad (13)$$

(2) 约束条件。

优化过程中, 控制变量  $Q_{\text{PVi}}, Q_{\text{SVG}}$  和状态变量  $U_i$  还应满足一定的约束条件, 具体如下。

a. 等式约束:

$$\sum_{i=1}^N Q_{\text{PVi}} + Q_{\text{SVG}} = Q_{\text{set}} \quad (14)$$

b. 不等式约束:

$$\begin{cases} Q_{\text{PVi}_{\text{min}}}(P_{\text{PVi}}) \leq Q_{\text{PVi}} \leq Q_{\text{PVi}_{\text{max}}}(P_{\text{PVi}}) \\ Q_{\text{SVG}_{\text{min}}} \leq Q_{\text{SVG}} \leq Q_{\text{SVG}_{\text{max}}} \\ U_{i_{\text{min}}} \leq U_i \leq U_{i_{\text{max}}} \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $P_{\text{PVi}}, Q_{\text{PVi}}$  分别为第  $i$  组 PVGU 的有功出力和无功出力, 其无功极限  $Q_{\text{PVi}_{\text{max}}}, Q_{\text{PVi}_{\text{min}}}$  受其有功出力的限制;  $Q_{\text{SVG}}$  为 SVG 的无功出力, 其无功极限  $Q_{\text{SVG}_{\text{max}}},$

$Q_{\text{SVG}_{\text{min}}}$  受其无功容量限制;  $U_{i_{\text{max}}}, U_{i_{\text{min}}}$  分别为第  $i$  组 PVGU 接入点电压上、下限。

### 3.2 模型求解

由式(12)和式(13)可知, 下层无功优化模型本质上是多目标优化模型。

为此, 本文引入基于非支配排序的改进多目标遗传算法(NSGA-II), 通过 NSGA-II 求解可以得到一组 Pareto 最优解集。

在实际过程中, 决策者必须从一组 Pareto 最优解集中选出最优折中解<sup>[19-20]</sup>。本文采用模糊隶属度函数来分别表示每个 Pareto 解中各个目标函数对应的满意度, 通过满意度比较找出最优折中解。

对于最小化目标函数, 定义模糊隶属度函数为:

$$\mu_t = \begin{cases} 1 & f_t \leq f_{t_{\text{min}}} \\ 1 - \frac{f_t - f_{t_{\text{min}}}}{f_{t_{\text{max}}} - f_{t_{\text{min}}}} & f_{t_{\text{min}}} < f_t < f_{t_{\text{max}}} \\ 0 & f_t \geq f_{t_{\text{max}}} \end{cases} \quad (16)$$

其中,  $f_t$  为第  $t$  个目标函数值;  $f_{t_{\text{max}}}$  和  $f_{t_{\text{min}}}$  分别为该目标函数值的上、下限。

当  $\mu_t = 0$  时表示对该目标函数值完全不满意, 当  $\mu_t = 1$  时表示对该目标函数值完全满意。对于 Pareto 最优解集中的每个解, 根据式(17)求解其标准化满意度值, 其中满意度值最大的解即为最优折中解。

$$\mu = \frac{1}{w} \sum_{i=1}^w \mu_i \quad (17)$$

其中,  $\mu$  为标准化满意度值;  $w$  为待优化目标函数的个数。

### 3.3 光伏电站参与电网主动调压的无功优化控制方法

综合以上分析, 得到光伏电站参与电网主动调压的无功优化控制方法, 具体步骤如下:

(1) 输入光伏电站电路参数、调节性能信息、待优化时段有功出力预测值以及电网负荷预测值;

(2) 根据待优化时段光伏出力的预测值和电网负荷的预测值, 结合式(6)、(7), 计算光伏电站负载率  $\beta$  和区域电网负荷率  $\eta$ ;

(3) 将求得的  $\beta$  和  $\eta$  代入式(8), 得到光伏电站主动调压控制模式下并网点电压的控制目标  $U_{\text{PCC}_{\text{obj}}}$ ;

(4) 根据式(2), 结合待优化时段电网和光伏电站的预测信息, 建立光伏电站参与电网主动调压的上层无功优化模型, 如式(9)—(11)所示;

(5) 根据式(3)—(5), 结合待优化时段光伏电站的预测信息, 建立光伏电站参与电网主动调压的下层无功优化模型, 如式(12)—(15)所示;

(6) 采用遗传算法(GA)求解上层优化模型, 得到待优化时段光伏电站的无功出力参考值  $Q_{\text{set}}$ ;

(7) 采用 NSGA-II 求解下层优化模型, 得到一组

Pareto 最优解集, 结合式(16)、(17), 利用模糊隶属度函数从中选出最优折中解, 即为待优化时段光伏电站内部各组 PVGU 和 SVG 的无功出力方案。

## 4 算例分析

### 4.1 算例描述

本文选取 2018 年甘肃省嘉酒地区电网运行数据进行仿真分析。

为了验证本文所提光伏电站无功优化控制方法的安全性和经济性, 选取嘉酒地区某 50 MW 光伏电站进行分析, 光伏电站拓扑结构见图 3, 包括 50 组额定容量为 1 MW 的 PVGU, 每组 PVGU 由 2 组 500 kW 的光伏逆变器并联而成, 经 0.29 kV / 10 kV 双分裂绕组变压器升压后接入 10 kV 集电线路。集电线路母线处装有 SVG, 经 10 kV / 110 kV 主变压器升压后, 经 50 km 远距离输电线路送出。

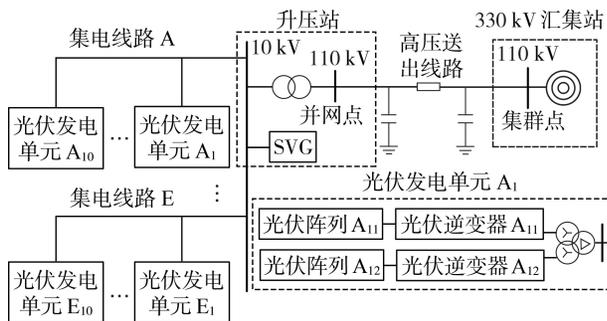


图3 光伏电站拓扑结构图

Fig.3 Topology of PV station

### 4.2 仿真计算与分析

根据该地区实际电网的负荷信息, 计算得到负荷高峰、低谷时段电网负荷率分别为  $\eta_{\max} = 0.85$ 、 $\eta_{\min} = 0.56$ 。根据光伏电站满发、退出运行方式下的运行情况, 得到光伏电站的负载率为  $\beta_{\max} = 0.9$ 、 $\beta_{\min} = 0$ 。

由前述分析可知, 光伏出力多发时段光伏电站无功需求量较大, 而此时光伏电站对应的无功容量较小, 调压难度最大。如果光伏电站在该条件下满足参与电网主动调压的控制需求, 则光伏电站在任何情况下都具备参与电网主动调压的能力。因此, 本文选择理想晴天对光伏电站进行仿真分析。

取典型时刻光伏电站及电网的运行情况进行分析, 选取原则参考表 1。将相应时刻光伏电站出力信息和电网负荷信息代入式(6)和式(7), 求得光伏电站负载率  $\beta$  和区域电网负荷率  $\eta$ 。将  $\beta$  和  $\eta$  代入式(8), 求得并网点电压控制目标  $U_{obj}$ 。

分别以 04:00、10:00、14:00、18:00 这 4 个时刻电网的状态作为基本状态进行优化计算, 优化算法选用 GA, 种群大小为 100, 最大迭代次数为 50。经优化求解, 得到上层无功电压优化控制结果见表 2。

为了验证本文所提光伏电站站内无功优化控制

表2 上层无功优化控制结果

Table 2 Reactive power control results of upper layer

运行时刻	$\beta$	$\eta$	电压目标 / kV	$Q_{set}$ / Mvar
04:00	0	0.585	108.18	-4.88
10:00	0.369	0.780	112.94	16.86
14:00	0.885	0.697	114.21	21.10
18:00	0.219	0.839	113.10	20.50

注: 无功出力正值为感性, 负值为容性。

效果, 取 14:00 时运行数据作为基础数据, 在光伏电站参与电网主动调压控制的基础上进行仿真分析。14:00 时光伏电站运行数据如表 3 所示。

表3 14:00 时光伏电站运行数据

Table 3 Operational data of PV station at 14:00

参数	数值
光伏电站有功出力 / MW	44.25
PVGU 有功出力 / kW	885
并网点 10 kV 侧电压 / kV	1.038
光伏电站无功需求 / Mvar	21.1
PVGU 无功容量 / kvar	570
SVG 无功容量 / Mvar	10

为简化计算, 取其中一回集电线路进行分析。按照本文所提光伏电站下层无功优化模型进行建模, 并采用 NSGA-II 进行求解, 种群大小设置为 100, 最优个体系数为 0.3, 最大迭代次数为 200, 经计算得到一组分布均匀的 Pareto 最优解, 如图 4 所示。

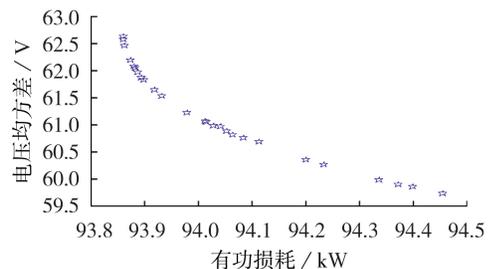


图4 Pareto最优解分布

Fig.4 Distribution of Pareto optimal solution

分别以光伏电站内部电压均方差最小和有功损耗最小为目标搜索极端解, 并根据式(16)和式(17)构建模糊隶属度函数, 从 Pareto 最优解集中选出最优折中解, 如表 4 所示。

表4 Pareto最优解集中的极端值和最优解

Table 4 Extreme value and optimal solution in Pareto optimal solution set

优化目标	电压均方差 / V	有功损耗 / W
电压均方差最小	59.72	94 457
有功损耗最小	62.61	93 861
最优折中解	60.74	94 067

为验证本文所提方法的有效性, 另取等无功裕度分配方法进行仿真计算, 并对电压控制效果及站内降损效果进行比较分析。

方法1:采用本文所提方法,以站内电压均方差最小和有功网损最小为优化目标,将优化结果作为各组PVGU和SVG的无功出力方案。

方法2:采用等无功裕度分配原则,按照各组PVGU和SVG的无功裕度进行等比例分配。

2种控制方法下,单条集电电路上各组PVGU的无功出力如表5所示。

表5 2种控制方法下PVGU无功出力  
Table 5 Reactive power output of PVGU under two control methods

PVGU 编号	无功出力 / kvar		PVGU 编号	无功出力 / kvar	
	方法1	方法2		方法1	方法2
1	434.83	312.40	6	237.96	312.40
2	412.48	312.40	7	231.55	312.40
3	325.47	312.40	8	188.65	312.40
4	299.37	312.40	9	43.58	312.40
5	285.76	312.40	10	-239.66	312.40

在方法1和方法2中,SVG的优化分配结果分别为10 Mvar和5.48 Mvar,将2种控制方法下各组PVGU和SVG的无功出力下发执行,得到集电线路有功损耗分别为470.34 kW和508.65 kW,单条集电电路上PVGU接入点电压变化情况如图5所示。

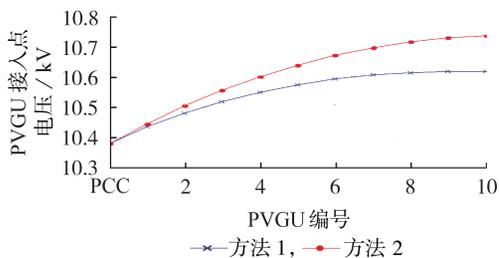


图5 集电线路电压变化情况

Fig.5 Voltage change of collection line

由以上分析可知,相比于等无功裕度分配法,采用本文方法后,光伏电站内部各节点电压均方差显著减小,最大节点电压偏差减小118 V,集电线路有功损耗降低7.53%。这说明本文方法能够很好地配合光伏电站参与电网主动调压,实现光伏电站无功电压的精细化控制,对于提高电网动态无功调节能力以及光伏电站运行的稳定性和经济性具有重要意义。

## 5 结论

本文针对常规电源动态无功调节能力不足的问题,提出利用光伏电站参与电网主动调压的无功优化控制方法,建立光伏电站双层无功优化控制模型,通过算例分析得到如下结论。

(1)提出光伏电站参与电网主动调压的控制方法,借鉴常规电源电压控制原理,引入光伏电站负载率和区域电网负荷率的概念,在此基础上,进一步采用线性化方法,得到主动调压控制模式下并网电

压的控制目标。仿真算例表明,当光伏电站采用主动调压控制时,能够减小集群点电压波动,在电网动态调节能力不足时为系统提供一定的无功支撑。

(2)建立光伏电站参与电网主动调压的双层无功优化控制模型:上层无功优化模型确定主动调压控制模式下光伏电站的无功需求;下层无功优化模型将上层无功优化结果下发至各PVGU和SVG执行,通过优化求解,达到站内电压均方差最小和有功损耗最小的目标,实现光伏电站无功电压精细化控制。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 国家能源局. 2019年上半年光伏发电建设运行情况[EB/OL]. [2019-11-05]. [http://www.nea.gov.cn/2019-11/05/c\\_138527620.htm](http://www.nea.gov.cn/2019-11/05/c_138527620.htm).
- [2] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904,2205.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
- [3] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.  
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [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]. 电力自动化设备,2013,33(2):26-32,39.  
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32, 39.
- [5] 周林,邵念彬. 大型光伏电站无功电压控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):116-122,128.  
ZHOU Lin, SHAO Nianbin. Reactive-power and voltage control for large-scale grid-connected photovoltaic plants [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 116-122, 128.
- [6] 杨明,周林,杜潇,等. 大型光伏电站并网逆变器无功与电压控制策略[J]. 电机与控制学报,2016,20(10):70-81.  
YANG Ming, ZHOU Lin, DU Xiao, et al. Reactive power and voltage control in the large photovoltaic power plants [J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(10): 70-81.
- [7] 周林,任伟,廖波,等. 并网型光伏电站无功电压控制[J]. 电工技术学报,2015,30(20):168-175.  
ZHOU Lin, REN Wei, LIAO Bo, et al. Reactive power and voltage control for grid-connected PV power plants [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 168-175.
- [8] 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.  
LIU Shuang, ZHANG Jianzhou, WANG Hanlin, et al. Two-stage reactive power and voltage coordinated control strategy for photovoltaic power station considering multiple reactive power sources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 120-125, 168.
- [9] 王璟,蒋小亮,杨卓,等. 光伏集中并网电压约束下的准入容量与电压波动的评估方法[J]. 电网技术,2015,39(9):2450-2457.  
WANG Jing, JIANG Xiaoliang, YANG Zhuo, et al. Penetration capacity under voltage constraint and evaluation methodology

- of voltage fluctuation caused by centralized grid connection of photovoltaic power[J]. Power System Technology, 2015, 39(9):2450-2457.
- [10] 顾浩瀚,蔡旭,李征. 基于改进型电网电压前馈的光伏电站低电压穿越控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7):13-19, 31. GU Haohan, CAI Xu, LI Zheng. LVRT control strategy based on improved grid-voltage feed-forward for photovoltaic station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7):13-19, 31.
- [11] 高鹏程,王蕾,李立生,等. 基于光伏逆变器调节的配电网电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4):190-196. GAO Pengcheng, WANG Lei, LI Lisheng, et al. Voltage control strategy based on adjustment of PV inverters in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4):190-196.
- [12] 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.
- [13] 蔡永翔,唐巍,张璐,等. 基于光伏逆变器无功调节的低压配电网多模式电压控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13):133-141. CAI Yongxiang, TANG Wei, ZHANG Lu, et al. Multi-mode voltage control in low distribution networks based on reactive power regulation of photovoltaic inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13):133-141.
- [14] 中国国家标准委员会. 分布式电源并网技术要求:GB/T 33593—2017[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.
- [15] QU L N, GE L M, ZHU L Z, et al. Research on multi-time scale modelling of photovoltaic power plant[C]//International Conference on Renewable Power Generation(RPG 2015). Beijing, China; Institution of Engineering and Technology, 2015:1-5.
- [16] 中国国家标准委员会. 光伏电站无功补偿技术规范:GB/T 29321—2012[S]. 北京:中国标准出版社, 2013.
- [17] 中国国家标准委员会. 光伏电站接入电力系统技术规定:GB/T 19964—2012[S]. 北京:中国标准出版社, 2013.
- [18] 杜潇,周林,郭珂,等. 大型光伏电站静态电压稳定性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(12):3427-3434. DU Xiao, ZHOU Lin, GUO Ke, et al. Static voltage stability analysis of large-scale photovoltaic plants[J]. Power System Technology, 2015, 39(12):3427-3434.
- [19] 刘文颖,文晶,谢昶,等. 考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5):1079-1088. LIU Wenyong, WEN Jing, XIE Chang, et al. Multi-objective optimal method considering wind power accommodation based on source-load coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5):1079-1088.
- [20] 夏鹏,刘文颖,朱丹丹,等. 基于模型预测控制的多时间尺度无功电压优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3):64-70. XIA Peng, LIU Wenyong, ZHU Dandan, et al. Multi-time scale optimal control method of reactive power and voltage based on model predictive control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3):64-70.

#### 作者简介:



王 贤

王 贤(1993—),男,河北邯郸人,硕士研究生,研究方向为新能源电力系统优化调度(E-mail:wangxian0909@163.com);

刘文颖(1955—),女,北京人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统分析与控制、新能源电力系统特性与多能互补等(E-mail:liuwenyings@sina.com)。

(编辑 王锦秀)

## Reactive power optimization control method for PV station participating in active voltage regulation of power grid

WANG Xian<sup>1,2</sup>, LIU Wenyong<sup>1</sup>, XIA Peng<sup>1</sup>, NIE Yanan<sup>1</sup>, WANG Weizhou<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Construction Branch of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300143, China;

3. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** With the increase of PV(Photovoltaic) power generation permeability and requirement of system to power quality, the voltage regulation ability of conventional power source is insufficient, while PV station has the potential of active participating in voltage regulation of power grid because it has a certain reactive power capacity. Based on the analysis of voltage regulation characteristics of PV station, a control method of PV station participating in active voltage regulation of power grid is proposed. Aiming at the contradiction between active power output of PV station and the load of power grid, the concepts of load rate of PV station and the load rate of regional power grid are introduced, and the control principle and objective of active voltage regulation with PV station are determined. On this basis, a top-down bi-level reactive power optimization model of PV station is established, the optimization model of upper layer is used to track the voltage control target at the point of common coupling, and the optimization model of lower layer optimally allocates the optimization results of upper layer among each group of reactive power compensation unit, which realizes accuracy control of PV station participating in active voltage regulation of power grid. A regional power grid is taken as an example to verify the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** PV station; active voltage regulation; reactive power optimization; bi-level model; accuracy control

## 附录:

图 A1 给出了某晴日 (00:00—24:00) 光伏电站有功出力曲线和电网负荷曲线。

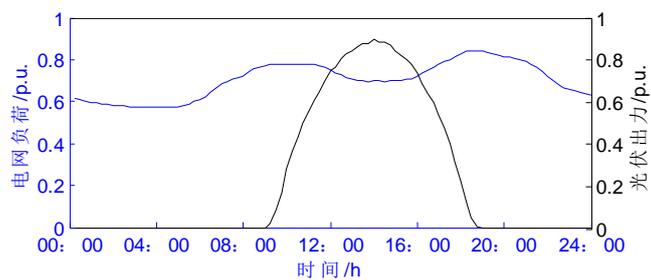


图 A1 光伏出力曲线和电网负荷曲线

Fig.A1 Curves of PV output and grid load

由图 A1 可以看出, 负荷高峰时段主要出现在 08:00—12:00、16:00—22:00; 光电多发时段主要出现在 12:00—16:00。