基于差分进化算法对光伏电站有功/无功协调优化并网点电压的策略研究

何 林

（中冶赛迪电气技术有限公司，重庆 400010）

摘要：考虑到光伏电站出力具有随机性、波动性的特点，当其大规模并网后，将对电网的安全运行带来较大影响。因此，探讨了光伏电站有功对并网点电压和损耗的影响，利用光伏逆变器和 SVG 调节无功的能力，提出了一种基于光伏电站有功协调无功优化并网点电压的方法。建立以光伏电站内部电压偏差和有功损耗的多目标优化模型，利用模糊理论将多目标模型转化为单目标模型，并充分运用自适应差分进化算法对转化后的单目标模型进行优化求解。最后，通过算例仿真结果验证所提方法及模型的合理性。

关键词：光伏电站；无功电压控制；差分进化；控制策略

Based on differential evolution algorithm for a strategy study on the active coordination reactive power optimization of photovoltaic power plants and the grid voltage

HE Lin

（China Metallurgical CCID Electric Technology Co., Ltd.,Chongqing 400010, China)

Abstracts: Considering that the output of photovoltaic power plants has the characteristics of randomness and volatility, when it is connected to the grid on a large scale, it will have a greater impact on the safe operation of the power grid. Therefore, The influence of photovoltaic power station active on the voltage and loss of the grid connection point is discussed, and uses the ability of photovoltaic inverter and SVG to adjust reactive power, and proposes a method for optimizing the grid voltage based on the active power coordination of photovoltaic power station. A multi-objective optimization model based on the internal voltage deviation and active loss of photovoltaic power plant is established, the multi-objective model is converted into a single-objective model by fuzzy theory, and the adaptive differential evolution algorithm is fully used to optimize and solve the transformed single-objective model. Finally, the simulation results of the study are used to verify the rationality of the proposed method and model.

Key words: photovoltaic power station；reactive power and voltage control；differential evolution；control strategy

0 引言

随着光伏并网技术日益成熟，大型光伏电站建设投产将充分利用太阳能资源[1-4]。考虑到光伏电站出力存在的不确定性特点，将会给并网系统网络的无功分布、系统损耗以及并网点的电压质量带来很大的影响。因此，要求一定规

模的光伏电站自身具备一定的无功调控能力，促进接入电网和光伏电站处于安全运行水平之上。

对于大型光伏电站而言，若仅通过SVG实现系统的无功调控，其补偿能力可能无法完全覆盖光伏电站出力的波动值。考虑到光伏电站中众多逆变器具有很大的无功调控潜力，因此能提升光伏电站自身调控无功的能力。文献[5]给出光伏逆变器参与无功优化环节的调节效果，文中提出了四种控制策略，即恒定无功控制、恒功率因数控制、有功出力控制和并网点的电压控制。文献[6]提出一种基于大型光伏电站背景下的三层自适应无功控制策略。文献[7-8]以促进光伏电站内无功的分布优化为目标建立函数，并提出一种光伏站的无功-电压灵敏度的控制策略，以调节逆变器输出的无功，但该方法不涉及无功分布下的有功损耗。文献[9]重点考虑了SVG装置的无功调节能力，一定程度上能够调节光伏系统的无功优化水平，忽视了光伏逆变器本身的无功调控水平，且对降低光伏电站的损耗效果不明显，不利于降低光伏电站的综合运行成本。

综上所述，本文将光伏逆变器和SVG装置的无功调控能力进行统筹考虑，同时深入分析无功调控过程对光伏电站系统损耗的影响，提出了一种光伏电站的有功/无功协调控制方法，以改善并网点的电压运行水平，并降低光伏站内的功率损耗。最后，通过MATLAB建模仿真验证所提方法的有效性。

1 基于光伏电站有功/无功协调下的并网点电压分析

大型光伏电站宜选择单元化布置的方式，若干光伏发电单元以并联的形式组合而成，利用发电单元实现光能向电能的转化，并由升压变压器升压后汇入主干网。鉴于发电单元是通过多组光伏阵列有效组成，且各发电单元的物理距离相距较远，现有常用的模式先通过并联的方式接入集电线路，所有集电线路的总功率汇入至光伏电站的并网点。图1为大型光伏电站的简易拓扑图。其中，U_{PCC}表示主变压器T的高压侧电压；U表示电网侧的运行电压，在主变压器T的低压侧母线上，本文选择该处位置接入SVG无功补偿装置。

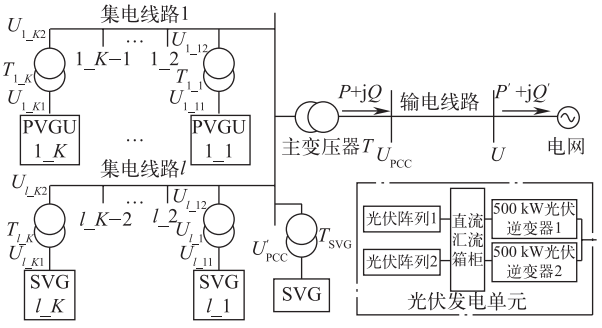

图 1 光伏电站的简易拓扑图

Fig. 1 Simple topology of photovoltaic power plant

1.1 光伏电站有功输出特性

结合文献[10]描述的光伏电站有功的输出特性曲线，所对应的光伏阵列的有功输出量化为

$$P_{PV}=U_{PV}I_{PV}=U_{PV}I_{SC}[1-C_1(e^{U_{PV}/C_2U_{OC}}-1)] \tag{1}$$

$$\bar{I_{SC}}=I_{SC}\frac{S}{S_{ref}}[1+0.002\,5(T-T_{ref})] \tag{2}$$

$$\bar{U}_{OC}=U_{OC}[1-0.002\,88(T-T_{ref})]\ln[e+0.5(S/S_{ref}-1)] \tag{3}$$

式中，U_{OC}为光伏阵列的开路电压；I_{SC}为光伏阵列的短路电流；T、T_{ref}分别为该地区的实际温度、参考温度；S为该地区的实际光照强度；S_{ref}为该地区的参考光照强度；C_1、C_2为常数值。

综合式（1）～式（3）解析关系和文献[11]所述内容，在光伏阵列开路、短路的基础上，将对应地区的温度和光照因素作为影响光伏电站有功输出的重要因子。

1.2 基于光伏电站有功输出的电压特性

为充分探讨光伏电站的有功输出对其并网点电压的影响，本文暂不计模型中输电线路对地支路和变压器励磁阻抗的影响。因此，将输电线路的阻抗参数视为引起输电线路首尾压差的重要原因，进而引起并网点运行电压的波动。

1.2.1 系统并网点的电压特性分析

以电网侧的运行电压U为参照基准，电网侧并网点的电压可表示为

$$\dot{U}_{\mathrm{PCC}}=\dot{U}+\mathrm{d}\dot{U}=(U+\Delta U)+\mathrm{j}\delta U \tag{4}$$

由于式（4）中电压的横向分量δU值很小，因此本文不计入该部分的影响，电网侧的并网点电压幅值近似为

$$U_{\mathrm{PCC}}\approx U+\Delta U=U+\frac{1}{U}[(P-\frac{P^2+Q^2}{U^2}R_{\mathrm{L}})R_{\mathrm{L}}+(Q-\frac{P^2+Q^2}{U^2}X_{\mathrm{L}})X_{\mathrm{L}}] \tag{5}$$

式中，U为电网电压；P为光伏电站的输出有功；Q为光伏电站的输出无功。

假设电网侧的电压U保持恒定，在已知输电线路参数的基础上，电网侧的并网电压与光伏电站的输出功率呈正相关。

当光伏电站输出的无功保持恒定值时，即设置Q为常数，式（5）简化为

$$U_{\mathrm{PCC}}=U+\frac{1}{U}(-AP^2+BP+C) \tag{6}$$

$$A=\frac{R_{\mathrm{L}}^2+X_{\mathrm{L}}^2}{U^2} \tag{7}$$

$$B=R_{\mathrm{L}} \tag{8}$$

$$C=-\frac{R_{\mathrm{L}}^2+X_{\mathrm{L}}^2}{U^2}Q^2+X_{\mathrm{L}}Q \tag{9}$$

由式（6）～式（9）可知，当光伏电站输出的无功保持恒定时，随着其输出的有功功率不断增大，电网侧的并网点电压呈现出先增后降的趋势[12]，则电网侧的并网点电压无法维持在合理运行范围内。

当光伏电站按照有功/无功协调的策略进行控制时，光伏电站输出的有功变化所引起的并网点电压的偏差量会由相应的无功调控进行补偿，确保并网点电压U_{PCC}运行在合理范围内，促进光伏电站平稳运行。并网点电压和光伏输出的有功变化趋势如图2所示。

由图2可知，基于光伏电站的有功/无功协调控制策略，可大幅提高并网点的电压运行稳定性。

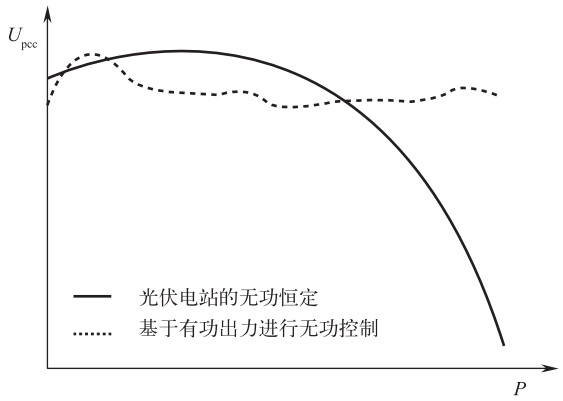

图2 光伏电站的*P-V*分布曲线

Fig. 2 *P-V* distribution curve of photovoltaic power station

1.2.2 光伏电站内的电压特性分析

由于光伏电站内各集电线路的设计结构基本相同，且为并联连接关系，故光伏电站内各集电线路的运行电压均相等。因此文中以第1回集电线路结构为例开展分析，不计入电压降的横向分量部分，光伏发电单元i的输出电压U_{1-i1}为

$$U_{1-i1}=U_{1-i2}+\frac{P_{1-i}R_t+Q_{1-i}X_t}{U_{1-i2}}\ (i=1,2,...,K) \tag{10}$$

式中，K为第1回集电线路上并联接入的发电单元数。

光伏发电单元i经主变压器升压后，相应的出口电压$U_{1\text{-}i2}$为

$$U_{1-i2}=U_{1-(i-1)2}+[\sum_{j=i}^{K}P_{1-j}R_{\mathrm{L}}+\sum_{j=i}^{K}Q_{1-j}X_{\mathrm{L}}]/U_{1-(i-1)2} \tag{11}$$

$$U_{1-12}=\bar{U}_{\mathrm{PCC}}+[\sum_{j=i}^{K}P_{1-j}R_{\mathrm{L}}+\sum_{j=i}^{K}Q_{1-j}X_{\mathrm{L}}]/\bar{U}_{\mathrm{PCC}}=U_{\mathrm{PCC}}+\frac{PR_{\mathrm{T}}+QX_{\mathrm{T}}}{U_{\mathrm{PCC}}}+[\sum_{j=i}^{K}P_{1-j}R_{\mathrm{L}}+\sum_{j=i}^{K}Q_{1-j}X_{\mathrm{L}}]/\bar{U}_{\mathrm{PCC}} \tag{12}$$

式中，P_{1-j}、Q_{1-j}分别为第1回集电线路上由第j组发电单元提供的有功、无功功率。

由式（11）、式（12）可知，保持电网侧的并网点电压U_{PCC}处于恒定值，发电单元i的出口电压和同第1回集电线路上各发电单元的输出功率也保持着紧密联系，每回集电线路的末端电压对应的偏差最大，易产生电压越限的情况。

对系统进行无功控制过程中，利用光伏电站

自身逆变器的调节功能可调整各发电单元的无功分布，改善光伏电站内的电压分布。

1.3 光伏电站无功调控对并网系统损耗的影响

光伏电站至并网点的总网损P_{loss}表示为

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{loss_T}} + P_{\text{loss_L}} + P_{\text{loss_t}} + P_{\text{loss_l}} \tag{13}$$

其中

$$P_{\text{loss_T}} + P_{\text{loss_L}} = \frac{P^2 + Q^2}{U_{\text{PCC}}^2}(R_{\text{T}} + R_{\text{L}}) \tag{14}$$

$$P_{\text{loss_t}} + P_{\text{loss_l}} = (\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{K}\frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_{ij}^2}R_{\text{t}} + \frac{Q_{\text{SVG}}^2}{U_{\text{PCC}}^2}R_{\text{SVG,t}}) + \sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{K}[(\sum_{m=j}^{K}P_{i-m})^2 + (\sum_{m=j}^{K}Q_{i-m})^2]/U_{ij}^2R_{\text{l}} \tag{15}$$

式中，$P_{\text{loss_T}}$+$P_{\text{loss_L}}$为并网主变压器和高压输电线路上的总损耗；$P_{\text{loss_t}}$+$P_{\text{loss_l}}$为发电单元上的升压变压器和集电线路上的总损耗；R_{T}为并网主变压器的电阻值；R_{L}为高压输电线路的电阻值；R_{t}为集电线路的电阻值；R_{l}为升压变压器的电阻值；$R_{\text{SVG,t}}$为SVG装置的电阻值；P_{ij}为集电线路i的第j组单元的输出有功，Q_{ij}为集电线路i的第j组单元的输出无功；Q_{SVG}为SVG设备的调节无功；U_{ij}为第i回集电线路上第j组发电单元的出口电压。

假定电网侧的并网点电压可维持在合理运行范围内，在光伏电站输出的有功P、无功Q也维持恒定的基础上，由式（14）可知，并网主变压器和输电线路上的网损也是恒定值。故对式（15）进行深入分析，制定出以下三种无功调控方案，减小站内系统的网损。

1）方案一：采取SVG和光伏逆变器进行调控。

2）方案二：仅采取SVG参与调控。

3）方案三：仅采取光伏逆变器进行调控。

选择方案一参与控制时，各集电线路末端至并网点的网络中获得更均匀的无功分布，从而在升压变压器和集电线路中损耗最小；方案二由SVG设备进行无功优化控制后，其有功损耗低于方案三，说明采用SVC无功的调节能力要强于光伏逆变器。采用上述三种无功控制方案的站内有功损耗结果如图3所示。

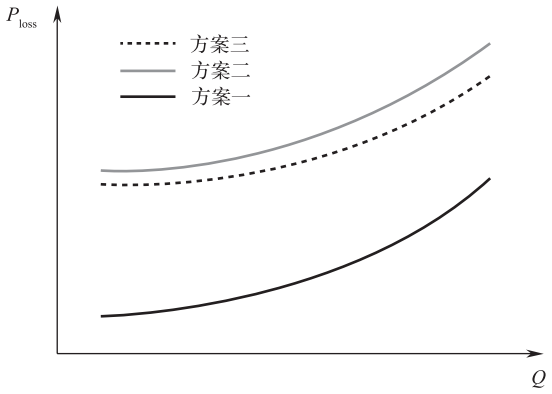

图 3 三种无功调控方案对应的有功损耗

Fig. 3 Effective consumption for 3 types of unsuccessful withdrawal plans

由图3可知，采用方案一的调控方法，站内网络损耗最小，因此利用SVG和光伏逆变器协调控制，有利于光伏电站的经济运行。

2 基于光伏电站有功/无功协调优化策略

2.1 基于光伏电站有功/无功协调优化模型

（1）以站内电压偏差最小为目标的控制模型

$$\min F_1 = \min \Delta U = \min\left\{\left|U_{\text{PCC}} - U_{\text{PCC_ref}}\right| + \sum_{i=1}^{N}\left|U_i - U_{i_\text{ref}}\right|\right\} \tag{16}$$

通过对光伏发电单元和SVG装置的输出无功进行协调优化，以此调控并网点的运行电压，并以最小压差建立优化目标。

（2）建立站内系统网损最小的控制模型

$$\min F_2 = \min P_{\text{loss}} \tag{17}$$

（3）约束条件

1）约束1：潮流约束

$$P_m - U_m\sum_{n=1}^{M}U_n(G_{mn}\cos\delta_{mn} + B_{mn}\sin\delta_{mn}) = 0 \tag{18}$$

$$Q_m - U_m\sum_{n=1}^{M}U_n(G_{mn}\sin\delta_{mn} + B_{mn}\cos\delta_{mn}) = 0 \tag{19}$$

式中，M为光伏电站内的节点数，且满足m、$n \in M$；P_m、Q_m分别为注入各节点上的有功和无功功率；U_m、U_n分别为各节点上的运行电压；

G_{mn}为m、n节点间的互电导；B_{mn}为m、n节点间的互电纳；δ_{mn}为m、n节点间的角差。

2）约束2：变量约束

$$\begin{cases} Q_{i\min} \leqslant Q_i \leqslant Q_{i\max} \\ Q_{\mathrm{SVGmin}} \leqslant Q_{\mathrm{SVG}} \leqslant Q_{\mathrm{SVGmax}} \end{cases} \tag{20}$$

（4）模型处理

结合文献[13]所述原理，可将文中的多目标模型转化为单目标模型。根据模糊理论，将两个不同量纲的目标函数按照下式隶属度函数统一处理，然后进行加权。

$$u_{F_i(x)} = \begin{cases} 0 & F_i(x) \geqslant F_{i\min} \\ \dfrac{F_{i\max} - F_i(x)}{F_{i\max} - F_{i\min}} & F_{i\min} < F_i(x) < F_{i\max} \\ 1 & F_i(x) \leqslant F_{i\max} \end{cases} \tag{21}$$

式中，$F_i(x)$为第i个优化目标，其中x为控制变量；$F_{i\max}$、$F_{i\min}$结合需求设置。

当$u_{\mathrm{Fi}(x)}$=0时，表示某优化结果不满足第i个优化目标；当$u_{\mathrm{Fi}(x)}$=1时，表示某优化结果满足第i个优化目标。两个目标的隶属度函数值不存在同时为1或0的情况，通过合理设置权重值优化出一个最优折衷解，可将单目标函数转化为

$$\min F = \min\left\{\lambda u_{F_1} + (1-\lambda) u_{F_2}\right\} \tag{22}$$

式中，λ为权重系数，且满足$\lambda \in [0, 1]$。

2.2 模型求解

差分进化算法[14]作为群体性的自适应优化算法，凭借着其结构简单、收敛性好和鲁棒性强等特点，在应对高维度问题时，该算法具有很快的收敛速度，且优化结果较为精确，可广泛适用于电网计算。因此，本文利用自适应差分进化算法对建立的优化目标进行离线求解，算法的具体流程图如图4所示。

2.3 基于光伏电站有功出力的无功优化控制策略

基于光伏电站有功协调无功优化策略的具体操作如下：

1）获取光伏逆变器和SVG的参数、光伏电站的有功P^*和电调下达的并网点控制电压U^*_{PCC}。

2）建立基于光伏电站有功协调无功优化的控制模型。

3）采用自适应差分进化算法求解。

4）获得光伏逆变器、SVG的无功补偿量，优化出最小的电压偏差及有功损耗。

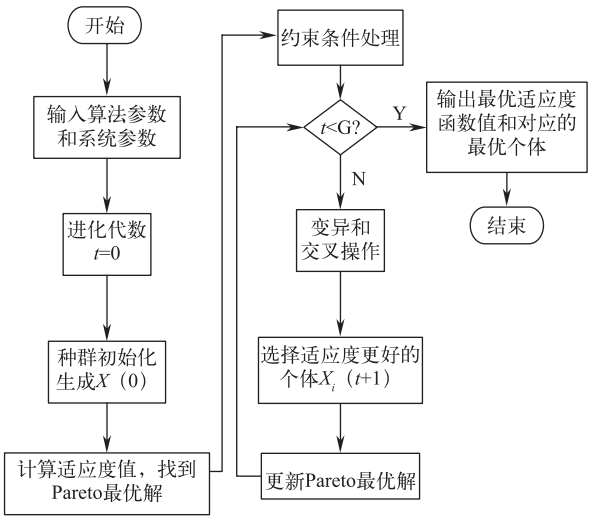

图 4 自适应差分进化算法求解流程

Fig. 4 Adaptive differential evolution algorithm solution process

3 算例分析

以某地区投运的光伏电站开展仿真分析，结合MATLAB软件的仿真模型建模。该站的装机容量为40 MW，建设投运的集电线路有4回，每回并联接入的发电单元有10组，每组的容量设置为1 MW，且经0.29 kV/10 kV升压变压器升压后接入相应的集电线路；每回集电线路上各发电单元的间距平均为1.2 km；并网侧的主变压器电压比为121 kV/10.5 kV；并网线路长度设置为40 km；对于SVG装置而言，其容量范围为－4～6 Mvar。文中的算法参数见下表。

表 算法参数设置表

Tab. Arithmetic reference setting table

项目	参数设置
最大迭代次数	200
缩放因子 /s	0.7
交叉概率 /CR	0.5
初始权重 / λ	0.5

案例中的仿真数据来源该站夏季某日的有功曲线，如图5所示，仿真时间范围设置在9:00—18:00，采集时间间隔设为15 min。

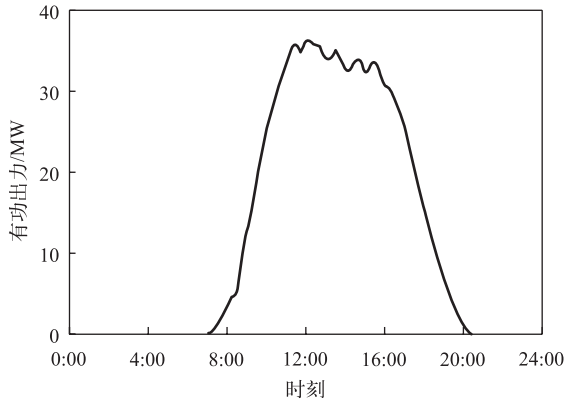

图 5　夏季某日该光伏站的有功曲线

Fig. 5 Active power curve of the PV station on a certain day in summer

3.1　并网点电压分析

为充分说明本文提出的无功优化方案的合理性，重点对图3中的前两种方案进行分析，其仿真结果对比如图6所示。

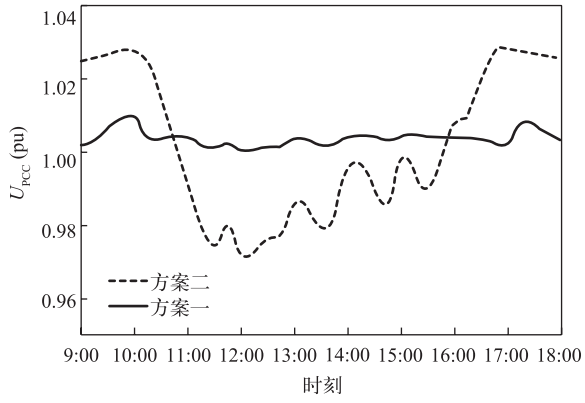

图 6　不同控制方案下并网点电压对比

Fig. 6 Comparison of grid-connected point voltages under different control schemes

由图6可知，方案一下的并网点的电压波动性更小，可维持并网点电压稳定，控制效果优于方案二。原因在于光伏逆变器和SVG联合调节无功比单独依靠SVG的调节能力更强，协调性更好，其运行电压的波动减小3%左右。另外，设置系统在1 s时发生三相短路，1.1 s故障切除，发生短路期间电压急剧下降。方案一下电压下降至0.4（pu），方案二电压下降至0.24（pu），原因在于方案一除了SVG的无功补偿外，还依靠光伏逆变器本身的无功调节能力。

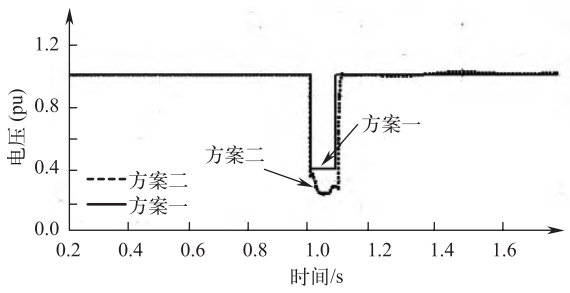

图 7　故障时并网点电压变化

Fig. 7 Grid-connected point voltage change during fault

3.2　光伏电站有功损耗分析

两种无功控制方案下光伏电站的有功损耗对比如图8所示。

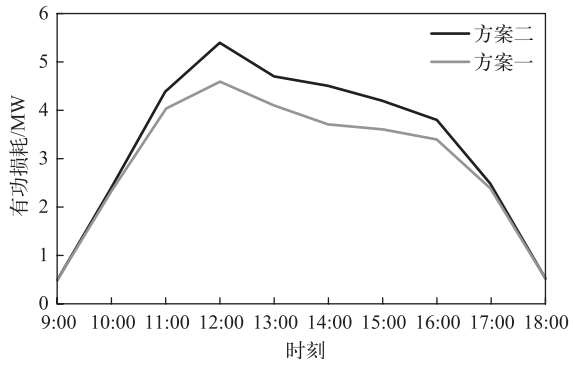

图 8　光伏电站的有功损耗对比

Fig. 8 Comparison of active power loss of photovoltaic power plants

由图8可知，由于光照强度较低时段，光伏发电的有功较小，两种方案下站内有功损耗均较小且接近；在光照强度较高时段，当光伏电站有功出力较大时，相比于方案二，方案一的有功损耗降低，说明采用SVG和逆变器联合调节无功的效果要强于SVG，促进光伏电站保持经济运行的状态。

4　结束语

考虑到光伏电站输出的有功波动特性，将引起电网侧并网点的运行电压水平存在较大的不稳定性，同时也将增加系统网损。因此，基于有功/无功协调控制的理念，本文提出了光伏电站的有功/无功的协调优化策略，并建立了以并网点电压偏差和系统网损最小化的多目标优化模型。

本文采用自适应差分进化算法对优化模型进行相应求解。通过仿真结果，验证了本文所提策略和模型的有效性。本文方法既能有助于并网点电压处于稳定运行的状态，又能改善站内电压合理分布，同时有利于降低站内系统损耗，减少光伏运行成本，提升光伏电站保持经济运行的水平。

参考文献

[1] 高本锋，姚磊，李忍，等．大规模光伏电站并网的振荡模式分析[J]．电力自动化设备，2017，37(8)：123-130．

[2] 梁钢，曹继雷，孙传帅，等．基于可再生能源可信容量的电网运行模拟仿真软件实现[J]．电气应用，2019，38(7)：60-67．

[3] 陈维荣，王璇，李奇，等．光伏电站接入轨道交通牵引供电系统发展现状综述[J]．电网技术，2019(10)：3663-3670．

[4] 韩平平，林子豪，夏雨，等．大型光伏电站等值建模综述[J]．电力系统及其自动化学报，2019，31(4)：48-55．

[5] Erhan Demirok，Pablo Casado Gonzalez′，Kenn H B Frederiksen，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．

[6] 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．

[7] 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．

[8] 白雅静．大型并网光伏电站AGC/AVC多模式自动控制系统设计与实现[J]．电气应用，2021，40(10)：78-86．

[9] 王多，陈良耳，陈仕彬，等．大型光伏电站无功优化协调控制策略[J]．沈阳工业大学学报，2018，40(4)：368-374．

[10] 谢宁，罗安，陈燕东，等．大型光伏电站动态建模及谐波特性分析[J]．中国电机工程学报，2013，33(36)：10-17．

[11] 赵亮，黎嘉明，艾小猛，等．光伏出力随机性分量的提取和统计特性分析[J]．电力系统自动化，2017，41(1)：48-56．

[12] 魏敏，刘锋，王红伟，等．光伏发电并网系统对配电网电压稳定性影响分析[J]．自动化与仪器仪表，2019(5)：149-152．

[13] 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(5)：1079-1088．

[14] 周艳平，蔡素．一种自适应差分进化算法及应用[J]．计算机技术与发展，2019，29(7)：119-123．

作者简介

何林（1986—），女，硕士，工程师，主要从事企业/园区智能配电网、智能微电网、风光储一体化项目、变电二次等相关工作。

（收稿日期：2022-10-08）