

低压光伏集群无功运行模式优化

王文宾¹, 石磊磊², 贾清泉², 李会彬¹, 李征¹, 陈岩¹, 谷莹¹

(1. 国网河北省电力有限公司邢台供电分公司, 河北 邢台 054001;

2. 燕山大学电力电子节能与传动控制河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:配电网中存在大量低压接入的分布式小容量光伏电源,其规模庞大且实时通信条件有限,在线调节的经济性和可操作性没有保障,因此难以有效利用这些无功资源进行配电网辅助调节。在此背景下,为发挥低压光伏无功调节潜力,提出一种按集群进行模式预设、在线自律运行的低压光伏参与中压电网无功运行模式优化策略。首先,以配变台区为无功集群单元进行平台化管理,以补偿馈线无功需求为目标进行日前无功匹配优化;其次,设计5种集群无功运行模式,构建日前预测运行场景并依据场景特征建立综合考虑馈线无功平衡度最优和集群间无功流动最小为目标的集群无功运行模式及参数优化模型,运用改进粒子群算法进行优化求解,使集群在各时段的运行模式组合方案能够最佳匹配馈线的无功需求并抑制无功不合理流动。最后,算例验证了该方法的有效性。

关键词:配电网;分布式光伏;集群管控;无功运行模式

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.01.013 中图分类号:TM761 文章编号:1673-9140(2021)01-0117-10

Study on reactive power operation mode optimization of low voltage photovoltaic cluster

WANG Wenbin¹, SHI Leilei², JIA Qingquan², LI Huibin¹, LI Zheng¹, CHEN Yan¹, GU Ying¹

(1. Xingtai Power Supply Company, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Xingtai 054001, China; 2. Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: There are a large number of low-voltage distributed small-capacity photovoltaic power supply in the distribution network. Due to its large scale and limited real-time communication, its economy and operability of online adjustment can not be guaranteed. It is difficult to effectively use these reactive resources for auxiliary adjustment of the distribution network. Under the background, this paper proposes a low-voltage photovoltaic participating in the reactive power operation mode optimization strategy of medium-voltage grids based on cluster mode presets and online autonomous operation to make full use of the potential of low-voltage distributed PVs (LVDPVs). Firstly, LVDPVs linked with the same transformer are assigned to a cluster and managed by a terminal platform. Secondly, the day-ahead reactive power mode optimization is carried out aiming at compensating load reactive power demand within a feeder. Then, five cluster reactive power operation modes are designed and the day-ahead prediction operation scenario is constructed. In addition, a cluster reactive power operation mode and parameter optimization model is established considering the optimal feeder reactive power balance and the minimum reactive power flow between clusters based on the scene characteristics. The improved particle swarm optimization algorithm is employed to solve the problem. Finally, examples verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: distribution network; distributed photovoltaic; cluster management and control; reactive power operation mode

收稿日期:2019-05-15;修回日期:2019-09-02

基金项目:国家自然科学基金(51877186);国网河北省电力有限公司科技项目(KJ2018-003)

通信作者:贾清泉(1970-),男,博士,教授,主要从事分布式电源与微电网、电能质量监测与控制研究;E-mail:jiaqingquan@sina.com

传统单电源辐射状配电网通过无功补偿、分接头调节及限制负荷功率因数等手段可以较好地控制电网电压水平,但分布式光伏的接入从有功和无功两方面影响电网潮流,且其出力不确定性和波动性强,导致配电网电压控制的复杂性加大。随着分布式光伏在中、低压配电网中渗透率与接入密度的大幅提高,电压控制问题成为高渗透率配电网的突出矛盾之一^[1-3]。光伏并网逆变器具有双向无功调节能力,可参与电网调压。接入 10 kV 及以上电压等级的光伏基本都配置了较完善的监控设施和通信功能,调度系统可根据电网需要在线调控其无功输出。另外,低压配电网还接有大量分布式小容量光伏(low voltage distributed photovoltaic, LVDPV)。LVDPV 处于用户端,通信条件差,很难由电网公司在线直接调度。由于 LVDPV 单体容量小、数量庞大,在线通信和调度决策既不现实也不经济。这些原因导致 LVDPV 处于离线或半离线状态,不能有效参与电网互动,发挥电网调节作用。LVDPV 逆变器在多数运行情况下均具有剩余容量,可用于无功输出,是一种优质无功资源。如何经济合理地利用 LVDPV 的无功调节能力进行配电网辅助调节,是值得研究的课题。

目前关于分布式电源参与配电网调压主要采取分布式控制、分散自治控制和集中控制 3 种策略。文献[4]采用分布式控制策略,通过对本地分布式电源智能控制器进行通信联络,使电网中分布式电源独立运行又相互配合,形成分布式网络调节控制系统。但本地智能控制器间配合要求极为复杂,且理论和应用技术尚不完善。分散自治控制策略依据本地测量信息使分布式电源及其他无功设备进行自治控制。文献[5-7]提出以公共连接点电压为控制依据的分布式电源有功—无功协调工作模式。文献[8-9]提出通过光伏有功出力的削减来防止电压越限的调压策略。分散自治控制的优点是无需进行实时通信,调节准确快速,但其未考虑到调节个体的相互影响,且全局电压调节效果不理想。集中控制策略通过控制中心对全网信息收集与分析,统一配置最优调节方案来优化控制全网电压,调压效果好,且技术应用较成熟。文献[10-11]提出分布式电源与电容器、变压器相互配合的无功优化策略。文献

[12-13]通过协调优化配电网中可控有功、无功资源来调节电压。以上 3 种控制策略由于受通信和本地求解速度的限制,在一些情况下难以实现完全在线实时优化控制,部分文献提出了日前优化与在线修正相结合的多时间尺度优化控制策略。文献[14]针对分布式电源接入配电网可能引起电压越限问题,建立了配电网长时间尺度综合无功优化模型。文献[15-16]以电网各项数据为依据,建立含光伏主动配电网日前优化模型及优化方案。

上述文献提出的分布式光伏调压策略依据接入点电压采取本地独立自治控制方式、分布式控制方式、采取在线集中控制方式。本地控制策略依据接入点电压进行调节,由于 LVDPV 接入密度大、耦合度高,本地控制方式很容易引起调节振荡。分布式控制以及集中控制策略需要完善的实时通信,对于 LVDPV 不具备可行性。该文利用平台化配变终端管理平台区光伏资源,针对 LVDPV 提出一种按集群进行模式预设并对集群无功运行模式进行优化组合,从而使其在线自律运行的无功调节优化策略。以各配变台区为终端平台,以同一台区接入的 LVDPV 为集群,进行集群管控。设计了 5 种集群无功运行模式并依据馈线无功负荷需求曲线建立无功模式优化配置目标函数,对馈线各集群在不同时段的无功运行模式和参数进行优化配置,使集群提供的总无功曲线尽量接近馈线的无功需求曲线。同时,为抑制集群间无功的大范围流动,建立了无功电流网损最小的目标函数,给出了问题的求解策略并进行了算例分析。

1 光伏集群无功管控方式和运行模式设计

1.1 LVDPV 集群及其管控方案

由于接入低压电网的 LVDPV 数量多、单体作用小,宜采用集群管控方式。该文将同一台区低压侧接入的所有 LVDPV 设定为一个集群,同一集群的 LVDPV 在同一时段按相同无功运行模式配置,从而保证集群内光伏电源能够统一步调运行,避免交互干扰。该文给出的 LVDPV 无功运行模式,认为其模式信息已固化到逆变器控制器中,运行中只

需通过简约指令设定次日各时段运行模式和参数整定值,即可使 LVDPV 各集群按预定模式工作。LVDPV 接入低压电网的集群管控方式如图 1 所示。

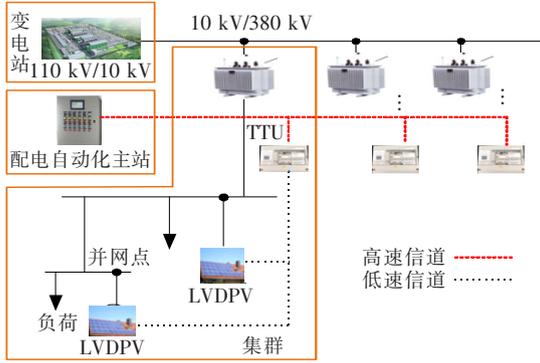


图 1 分布式光伏集群管控方案

Figure 1 Management and control scheme of distributed photovoltaic cluster

配变终端平台(TTU)一方面通过高速信道与配电自动化主站通信,进行配电自动化各种信息交互;另一方面与分散在台区低压侧的 LVDPV 进行低速通信,感知即插即用 LVDPV 的状态参量并向集群发布管控信息。按该文思路管理 LVDPV,只需通信系统对光伏控制器下发命令进行模式调取并设置参数即可完成光伏配置,通信负担非常小。

1.2 光伏集群无功运行模式设计

光伏并网逆变器拓扑结构决定其不仅能输出有功功率,还可以输出连续可调的感性或容性无功功率。由于昼夜规律及光照条件非理想化,LVDPV 在很多情况下存在较大的闲置剩余容量,这些剩余容量可以作为无功辅助服务资源参与电网互动。因为 LVDPV 有功出力和剩余容量具有时变性,所以应根据剩余容量状况及电网无功需求情况在不同时段选择不同的无功运行模式。该文认为 LVDPV 参与电网无功互动属于一种定制式无功供应,需按设定模式产生可预知的无功,避免给配电网运行带来不确定性。因此,逆变器剩余容量的预估应留有余量,保障无功供应不受有功出力变化的影响。

该文根据配电网馈线无功运行各种场景特性,基于集群无功运行模式易表征、无功输出可确定、便于组合拼接、尽可能贴近无功需求曲线、能够适应光伏有功运行特点的设计目标,设计了 5 种低压光伏

集群运行模式。对光伏集群无功运行模式按时段进行配置,时段用 T 表示。 P_{DPV} 、 Q_{DPV} 、 S_{DPV} 和 $S_{\text{DPV}}^{\text{R}}$ 分别表示单一集群输出的有功功率、无功功率、视在功率和剩余容量; $P(t)$ 表示光伏集群按 MPPT 方式可产生的时变有功功率。5 种集群无功运行模式分别用 $M_1 \sim M_5$ 表示。

1.2.1 零无功模式 M_1

当配电网中部分光伏集群的无功输出可以满足需求时,则其他集群无需参与电网无功调节,可设定为零无功模式,此种模式下逆变器仅按最大功率跟踪输出有功,不输出无功。 M_1 的输出特性为

$$\begin{cases} P_{\text{DPV}} = P(t), \\ Q_{\text{DPV}} = 0, \end{cases} \quad t \in (T, T+1) \quad (1)$$

1.2.2 定无功模式 M_2

当光照稳定且馈线无功需求波动小时可采用定无功模式。该模式下光伏集群输出有功稳定,其剩余容量可认为恒定,此时通过控制光伏集群逆变器输出稳定有功功率,从而使其无功输出恒定。该模式的输出特性为

$$\begin{cases} P_{\text{DPV}} = P(t), \\ Q_{\text{DPV}} = \lambda, \end{cases} \quad t \in (T, T+1) \quad (2)$$

式中 无功输出量 Q_{DPV} 为设定值 λ 。

定无功模式的实际无功输出值须小于相应时段剩余容量最小值,无功定值应满足如下约束

$$\lambda \leq \min S_{\text{DPV}}^{\text{R}}(t), \quad t \in (T, T+1) \quad (3)$$

1.2.3 无功递增/减模式 M_3

当馈线无功需求随负荷曲线较稳定地上升/下降且光伏集群剩余容量充足时,一些集群宜采用无功递增/减模式。该模式下光伏集群无功输出在保证有功输出的前提下不能超出逆变器剩余容量边界,通过控制调节无功输出斜率从而保证其无功输出按递增/减变化。 M_3 的输出特性为

$$\begin{cases} P_{\text{DPV}} = P(t), \\ Q_{\text{DPV}} = Q_f + at, \end{cases} \quad t \in (T, T+1) \quad (4)$$

式中 Q_f 为递增/减输出的初值; a 为递增/减的斜率。递增/减模式可跨越正负无功象限。

递增/减模式的无功输出不能超出逆变器容量限制,其斜率应具有限定值,具体如下:

$$0 \leq a \leq \frac{\sqrt{S_{\text{DPV}}^2 - P_{\text{DPV}}^2}}{\Delta t} \quad (5)$$

1.2.4 恒比例无功模式 M_4

定无功模式在集群有功输出波动较大时易出现剩余容量不能有效利用而无功不能满足需求的情况,为此设计恒比例无功模式。恒比例无功模式适用于光伏有功输出波动较大且馈线无功需求波动较大情况。该模式下在满足光伏集群有功输出前提下,通过控制光伏集群逆变器剩余容量按恒定比例输出,从而使其对馈线无功按比例进行补偿。具体为

$$\begin{cases} P_{\text{DPV}} = \bar{P}(t), \\ Q_{\text{DPV}} = \mu S_{\text{DPV}}^{\text{R}}(t), \end{cases} \quad t \in (T, T+1) \quad (6)$$

式中 μ 为无功比例系数。由于无功输出与有功输出存在耦合关系,恒比例无功模式下有功输出波动较大,有功波动将影响到无功输出的稳定性,上述情况下需对有功做平滑滤波处理,处理后的有功用 $\bar{P}(t)$ 表示。

恒比例无功模式的无功调节能力由 μ 决定,其无功输出不能超出逆变器容量限制,因此 μ 具有如下约束

$$0 \leq \mu \leq \frac{Q_{\text{DPV}}}{\sqrt{S_{\text{DPV}}^2 - P_{\text{DPV}}^2}} \quad (7)$$

1.2.5 恒功率因数模式 M_5

当并网节点因 LVDPV 输出有功与无功差值过大而导致功率因数越限时,采用功率因数控制无功输出模式可保证并网节点功率因数稳定。当有功输出确定时,功率因数越小,无功输出越少^[17]。此种模式通过调节控制光伏逆变器功率因数角,使无功跟随有功进行输出,保证节点功率因数稳定。此种模式下有功输出波动较大,仍需对有功进行平滑滤波处理,具体表达式为

$$\begin{cases} P_{\text{DPV}} = \bar{P}(t), \\ Q_{\text{DPV}} = P_{\text{DPV}} \tan \varphi, \end{cases} \quad t \in (T, T+1) \quad (8)$$

式中 φ 为设定的功率因数角。

由上述 5 种光伏集群无功运行模式的定义可知,当定无功模式输出的无功功率值为 0、恒比例无功模式比例系数为 0 以及恒功率因数模式的功率因数角为 0 时,均可变迁为零无功模式。而当无功递增/减模式的斜率为 0 时,则变迁为定无功模式。因此,5 种无功模式存在交叉和变迁现象。该文将可

变迁模式仍作为独立模式存在,目的是使运行模式概念清晰,模式边界可有效界定,并有利于模式优化组合计算。对于可变迁模式的边界条件设定,应结合光伏集群运行特点和问题需要,合理设定在工程可实现、可操作的有效参数阈值范围。该文对模式边界问题未做深入研究,暂设定零无功模式的边界条件为集群无功功率需求小于该集群光伏总容量的 3%;无功递增/减模式、恒比例无功模式的系数大于 0.1;恒功率因数模式的功率因数角不小于 5° 。

2 光伏集群日前运行场景构建

根据 1.1 节光伏集群管控方案,LVDPV 模式信息已固化到逆变器中,运行中只需设定各时段运行模式和参数整定值。该文采用日前决策方式,为避免逆变器模式频繁切换和光照强度大幅变化,以 1 小时为单位进行配置时段划分,对 LVDPV 进行模式配置。为精细刻画馈线无功需求场景,以 15 min 为单位划分场景时段,更好地突出无功需求曲线特征。并且因测量设备记录数据的周期大多为 15 min,由此可更好地利用实际数据。结合历史光照、负荷用电数据,综合考虑气象等不确定因素对光伏输出功率及负荷用电特性影响,根据光伏出力预测模型和负荷预测模型对日前各时段光伏有功功率及馈线无功需求进行预测^[18-19],构建各时段光伏集群有功输出及馈线无功需求的日典型运行场景。场景描述为

$$\Omega = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_{t_i} \ Q_1 \ Q_2 \ \dots \ Q_{t_i}] \quad (9)$$

式中 Ω 为日前运行场景; P_{t_i} 为 t_i 时刻($i \in \{1, 2, 3, 4\}$)光伏集群有功功率, Q_{t_i} 为 t_i 时刻馈线无功需求。

3 光伏集群无功运行模式优化配置

为实现光伏集群最优无功输出,结合模式预设、自律运行的集群无功输出,依据馈线无功负荷需求曲线建立各集群运行模式优化配置目标函数。对馈线各集群在不同时段的无功运行模式和参数进行优化配置,使集群提供的总无功曲线尽量接近馈线无功需求曲线;同时为抑制集群间无功不合理流动,建

立无功网损最小目标函数。

3.1 目标函数

3.1.1 馈线无功平衡度目标函数最优

为尽可能满足馈线无功需求,使光伏集群无功曲线最大程度接近馈线无功曲线,以馈线无功平衡度最优建立目标:

$$F_1 =$$

$$\min \sqrt{\sum_{i=1}^4 \left| Q_{\text{Feeder},t_i} - \sum_{k \in \Omega_{\text{DPV}}} N_k(s) \cdot Q_{\text{DPV},s,k,t_i} \right|^2} \quad (10)$$

式中 Q_{Feeder,t_i} 为 t_i 时段馈线无功需求; Q_{DPV,s,k,t_i} 为 t_i 时刻光伏集群无功输出; s 为光伏集群所采用的无功运行模式,取值 1~5; Ω_{DPV} 为馈线上光伏集群集合; k 为馈线光伏集群个数; $N_k(s)$ 表示第 k 个光伏集群是否在 s 模式下运行,取值 1 或 0,取 1 表示光伏集群运行在当前无功模式下。

3.1.2 无功网损最小

为了防止集群无功电流在馈线中大范围流动,会造成功率损耗,考虑到这个损耗包括有功功率损耗和无功功率损耗,以集群无功的视在网损最小建立目标函数:

$$F_2 = \min \sum_{i \neq j} S_{ij}^L = \min \sum_{i \neq j} \sqrt{(P_{ij}^L)^2 + (Q_{ij}^L)^2} \quad (11)$$

式中 S_{ij}^L 为馈线上包含集群的节点 i, j 间的视在功率损耗; P_{ij}^L 为节点 i, j 间的有功损耗; Q_{ij}^L 为节点 i, j 间的无功损耗。该文对不含 LVDPV 设备的节点不进行讨论,所讨论节点均为包含集群的节点。

为了方便计算,采用直流潮流对有功、无功网损进行计算^[20]:

$$P_{ij}^L = P_{\text{DPV},ij}^L - P_{\text{Load},ij}^L = \alpha g_{ij} (\theta_{ij}^2 + \tilde{V}_{ij}) \quad (12)$$

$$Q_{ij}^L = Q_{\text{DPV},ij}^L - Q_{\text{Load},ij}^L = \beta (-b_{ij}) (\theta_{ij}^2 + \tilde{V}_{ij}) \quad (13)$$

$$\tilde{V}_{ij} = (V_i - V_j)^2 \quad (14)$$

式中 $P_{\text{DPV},ij}^L$ 、 $Q_{\text{DPV},ij}^L$ 分别为节点 i, j 间的集群有功、无功; $P_{\text{Load},ij}^L$ 、 $Q_{\text{Load},ij}^L$ 分别为节点 i, j 间的负载消耗有功、无功; \tilde{V}_{ij} 、 θ_{ij} 分别为节点 i, j 的电压差、相角差; b_{ij} 、 g_{ij} 分别为节点 i, j 的电纳、电导; V_i 、 V_j 分别为节点 i, j 的电压幅值。

3.1.3 综合目标函数

将馈线无功平衡度最优与无功电流网损最小 2 个目标函数加权,建立光伏集群无功运行模式优化配置模型综合目标函数:

$$F = \alpha F_1 + (1 - \alpha) F_2 \quad (15)$$

其中, α 为目标函数的权重。

由于某些运行模式的边界参数存在连续性,在优化过程中当最优模式参数位于 2 种模式的边界附近时,容易出现优化结果在 2 种模式之间振荡而使结果不稳定的问题。为避免这种情况,该文对目标函数设置改善度阈值,若寻优过程中本次优化与前次优化的结果出现模式切换,则可判断本次目标函数值与前次目标函数值之差是否超过设定的改善度阈值,只有目标函数改善度大于阈值才使本次优化的模式和参数生效。否则,舍弃本次优化而保留前次的优化模式和参数。

3.2 无功网损潮流等式约束

馈线无功网损潮流等式^[20]:

$$P_i = P_{\text{DPV},i}^L - P_{\text{Load},i}^L = \sum_{j \in B_i} (P_{ij} + g_{ij} \tilde{V}_i) \quad (16)$$

$$Q_i = Q_{\text{DPV},i}^L - Q_{\text{Load},i}^L = \sum_{j \in B_i} (Q_{ij} - b_{ij} \tilde{V}_i) \quad (17)$$

式中 P_i 、 Q_i 分别为节点 i 有功、无功功率; \tilde{V}_i 为节点 i 的电压幅值; B_i 为节点 i 相连的所有支路末端节点集合。

3.3 不等式约束

光伏集群在不同无功模式下的无功输出应满足当前运行模式限制条件。因此,光伏集群模式优化配置不等式约束应包含不同无功运行模式各类参数约束(各类无功运行模式的参数限定范围已在 1.2 节讨论)。

3.3.1 无功倒送约束

为防止无功倒送,所有集群所发无功功率应小于等于馈线的无功需求量,即

$$\sum_{k \in \Omega_{\text{DPV}}} N_k(s) \cdot Q_{\text{DPV},s,k} \leq Q_{\text{Feeder}} \quad (18)$$

3.3.2 单个集群无功输出约束

单个集群所发无功应小于等于集群剩余容量。根据集群的有功输出来确定集群剩余容量,即

$$Q_{\text{DPV},s,k} \leq S_{\text{DPV},s,k}^R \quad (19)$$

式中 $Q_{\text{DPV},s,k}$ 为第 k 个光伏集群在 s 无功运行模

式下所发出的无功功率; $S_{\text{DPV},s,k}^{\text{B}}$ 为第 k 个光伏集群在 s 无功运行模式下的剩余容量。

4 算例分析

该文算例选取某城乡配电网中一条馈线线路,对该馈线光伏集群无功运行模式进行优化配置分析计算。该馈线电压等级为 10 kV,5 个 LVDPV 集群通过台区变压器升压接入该馈线。城乡配电网馈线结构如图 2 所示,将图 2 中的集群进行编号,并且给出各集群中光伏的数量以及各集群的总容量,光伏集群相关配置参数如表 1 所示。

收集当地光照、负荷用电特性 5 年历史数据,对日前各时段光伏集群有功功率及负荷无功功率进行预测,构建光伏集群日前运行场景。以馈线上光伏集群 2 为例,对其日前有功输出及剩余容量进行预测,结果如图 3、图 4 所示。其中,图 3 为集群 2 的日前有功输出曲线,图 4 为集群 2 逆变器日前剩余容量。

用同样的方法预测得出该场景下馈线总无功需求曲线如图 5 所示。

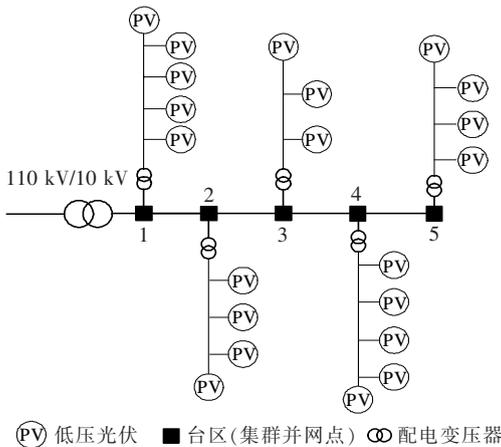


图 2 含 DPV 10 kV 配网

Figure 2 10 kV distribution network connected with DPV

表 1 光伏集群参数

Table 1 Photovoltaic cluster parameter table

集群编号	光伏数量	逆变器总容量/kW
1	5	52.4
2	4	36.7
3	3	30.0
4	5	48.2
5	4	41.3

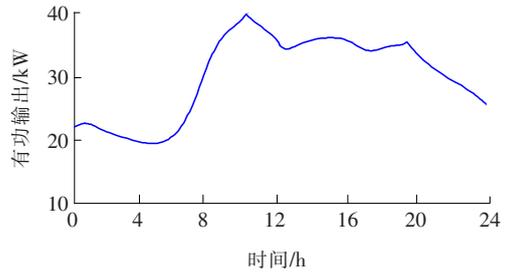


图 3 日前运行场景下光伏集群 2 有功输出曲线

Figure 3 Active power output curve of cluster 2 in day-ahead operating scenario

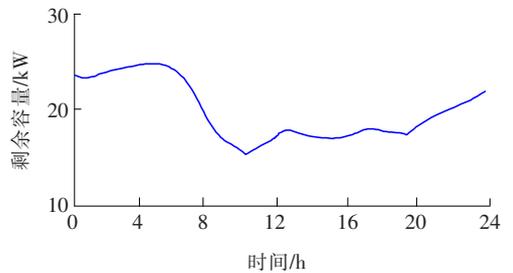


图 4 日前运行场景下光伏集群 2 剩余容量曲线

Figure 4 Residual capacity curve of cluster 2 under day-ahead running scenario

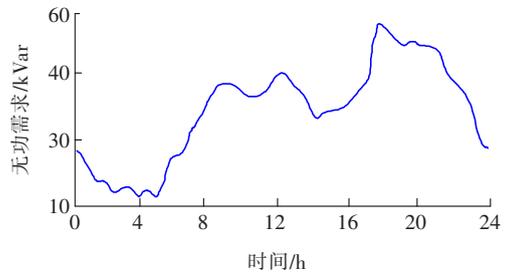


图 5 馈线无功需求曲线

Figure 5 Feeder reactive power demand curve

将上述日前运行场景的每个场景时段初始值作为优化模型原始数据,由此计算馈线无功平衡度。为避免优化结果不稳定现象,设定目标函数改善度阈值为 $\pm 6\%$ 。采用改进的粒子群算法对所建立的光伏集群无功运行模式优化配置模型进行优化求解,最终得到各集群无功运行模式及对应的可调参数数值。

表 2 为光伏集群各时段无功运行模式及其对应的可调参数设置值。M1 模式的可调参数为 0;M2 模式为光伏集群的无功功率输出值;M3 模式为光伏集群的无功功率输出初值和斜率;M4 模式为光伏集群的无功比例系数;M5 为光伏集群的功率因数。M2 和 M4 模式中无功功率单位均为 kVar。

表 2 光伏集群无功运行模式优化配置结果

Table 2 Optimal configuration results of reactive power operation mode for photovoltaic cluster

时段	集群 1	集群 2	集群 3	集群 4	集群 5
1	M3(8.3, -0.12)	M2(5.1)	M2(2.3)	M2(3.6)	M2(5.7)
2	M3(3.3, -0.05)	M2(4.1)	M2(2.3)	M2(3.6)	M2(4.7)
3	M3(3.3, 0.05)	M2(4.1)	M2(2.3)	M2(3.6)	M2(4.7)
4	M2(2.3)	M2(3.1)	M2(2.3)	M2(3.6)	M2(3.7)
5	M2(2.3)	M2(3.1)	M2(2.3)	M2(3.6)	M2(3.7)
6	M2(2.3)	M5(0.95)	M2(3)	M2(3.6)	M5(0.95)
7	M2(3)	M3(4, 0.07)	M3(4, 0.07)	M2(5)	M5(0.95)
8	M2(8)	M3(4, 0.07)	M3(4, 0.07)	M2(10)	M5(0.95)
9	M2(10.3)	M2(7.5)	M2(7)	M2(8.5)	M2(7.6)
10	M4(90%)	M2(10.3)	M1(0)	M2(10.2)	M4(90%)
11	M2(9.5)	M2(5.5)	M2(5.6)	M2(7.4)	M2(8.3)
12	M4(80%)	M3(6, 0.05)	M2(7.5)	M4(80%)	M4(80%)
13	M3(11, -0.1)	M2(8.9)	M2(5.4)	M5(0.95)	M2(11.2)
14	M3(11, -0.1)	M1(0)	M2(5.4)	M5(0.95)	M2(11.2)
15	M2(9.5)	M1(0)	M2(5)	M5(0.95)	M2(11.2)
16	M2(10.5)	M1(0)	M2(5)	M5(0.95)	M2(11.2)
17	M3(10, 0.07)	M2(5)	M4(90%)	M4(90%)	M4(90%)
18	M3(10, 0.33)	M3(8, 0.2)	M4(90%)	M4(90%)	M4(90%)
19	M2(13.2)	M2(5)	M4(95%)	M4(95%)	M4(90%)
20	M2(13.2)	M2(5)	M4(95%)	M4(90%)	M4(90%)
21	M2(10.4)	M2(4.7)	M4(80%)	M4(80%)	M4(90%)
22	M3(12, -0.05)	M3(12, -0.05)	M2(6.6)	M2(7.4)	M2(8.3)
23	M3(9, -0.05)	M3(9, -0.05)	M2(6.6)	M2(7.4)	M2(8.3)
24	M3(7, -0.05)	M3(7, -0.05)	M2(6.6)	M2(7.4)	M2(8.3)

由表 2 中各集群各时段所应用的无功模式下所发出的总无功与馈线各时段无功需求曲线对比可知,各时段光伏集群无功运行模式优化配置基本能够满足馈线上的无功需求。对比结果如图 6 所示。

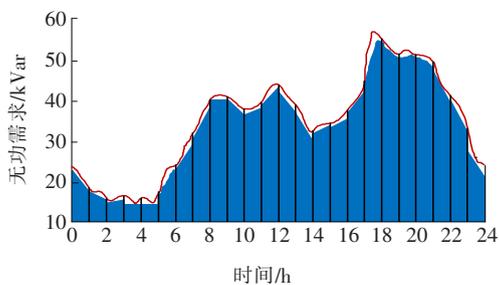


图 6 馈线无功输出与无功需求对比

Figure 6 Comparison of feeder reactive power output and reactive power demand

为验证该文方法的合理性与有效性,将光伏集群无功运行模式优化策略与单一无功运行模式的光伏集群无功补偿方案所得结果进行比较,其中,方案 1 为该文所提方法,方案 2 为只采用无功递增/减模式光伏集群无功优化方案,方案 3 为文献[21]所提有功-无功光伏协调控制方案,馈线无功补偿及网损结果如表 3 所示,3 种方案种的光伏集群无功输出及馈线无功补偿数据结果如图 7 所示。

表 3 各方案所得控制结果

Table 3 Control results from various schemes

方案	无功需求平衡度	无功网损/kW
1	1 087.66	193.46
2	1 340.59	223.51
3	1 502.46	188.22

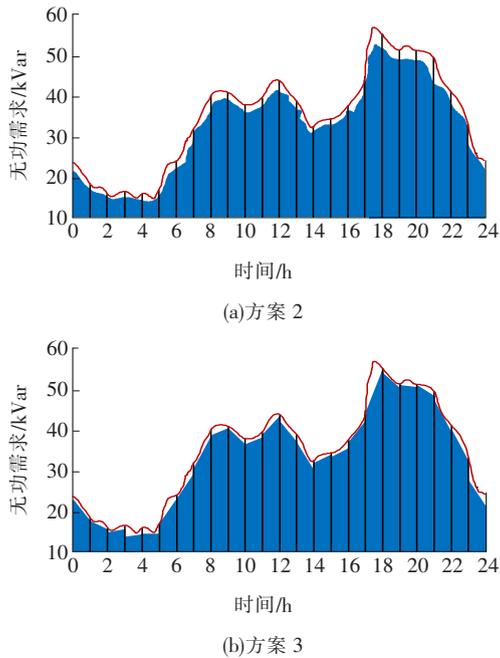


图7 方案2、3馈线无功输出与无功需求对比

Figure 7 Comparison of reactive power output and reactive power demand for scheme 2 and 3 feeders

由上述结果分析可知,方案1在无功需求平衡度及网损结果上均优于其他2个方案。方案2无功平衡度接近方案1,但集群间的无功流动增加导致其网损增加,使其经济性大大下降。方案3无功网损小,但对馈线的无功补偿效果较差。因为该文采用光伏集群无功运行模式优化组合,与采用单一无功运行模式的方法相比,能根据馈线无功需求场景采用不同模式组合,从而使集群提供的总无功曲线尽量接近馈线无功需求,同时还能抑制集群间无功大范围流动,降低网络损耗。因此相比其他2种方法,可获得较好的无功补偿效果。

5 结语

该文提出一种按集群进行模式预设、自律运行的低压光伏群无功运行模式优化策略,设计了5种集群无功运行模式,并构建了基于预测的日前典型运行场景。依据场景特征,并建立综合目标函数,通过改进的粒子群算法将集群无功运行模式进行优化配置,使集群按时段采用最优的模式及参数配置,达

到最佳的电网调节效果。

算例结果表明,该文的集群无功模式优化配置策略在尽可能满足无功需求的情况下可避免无功倒送、减少网络无功电流所引起的电网损耗,充分利用了小容量LVDPV的无功资源对电网进行辅助调节,并且具有经济性与可行性。

参考文献:

- [1] 刘乐. 光伏接入后配网馈线电压协同控制方法[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(3): 43-49.
LIU Le. Cooperative control of feeder voltage for distribution network with photovoltaic connected[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3): 43-49.
- [2] 丁健, 马春雷, 陈宣林, 等. 计及“源—网—荷”影响的主动配电网可靠性评估[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(3): 18-26.
DING Jian, MA Chunlei, CHEN Xuanlin, et al. Reliability evaluation of active distribution network considering "Supply-Grid-Load"[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(3): 18-26.
- [3] 庄双勇, 赵伟, 何学农, 等. 超谐波引发的电能质量问题及相关研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(1): 41-52.
ZHUANG Shuangyong, ZHAO Wei, HE Xuenong, et al. Power quality problems caused by supraharmonics and related research[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(1): 41-52.
- [4] 邢志斌, 韦钢, 贺静, 等. 基于图论的主动配电网双阶段电压控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 40-47.
XING Zhibin, WEI Gang, HE Jing, et al. A dual stage voltage control method in active distribution network based on graph theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 40-47.
- [5] 张艺镨, 艾小猛, 方家琨, 等. 基于极限场景的两阶段含分布式电源的配网无功优化[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 380-389.
ZHANG Yipu, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, et al. Two-stage reactive power optimization for distribution network with distributed generation based on extreme sce-

- narios[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 380-389.
- [6] 张海鹏, 林舜江, 刘明波. 考虑光伏不确定性的低压配电网分散无功补偿鲁棒优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3880-3888.
- ZHANG Haipeng, LIN Shunjiang, LIU Mingbo. Robust optimal allocation of reactive power compensation in low voltage distribution networks considering uncertainty of photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3880-3888.
- [7] 李鹏, 于航, 夏曼, 等. 分布式光伏集群分层多模式无功控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3038-3044.
- LI Peng, YU Hang, XIA Man, et al. A hierarchical multi-mode var control strategy for grid-connected PV clusters[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3038-3044.
- [8] Calderaro V, Conio G, Caldi V, et al. Optimal decentralized voltage control for distribution systems with inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 230-241.
- [9] 贾清泉, 祁希萌, 宁思远, 等. 分散光伏并网系统参与电压无功调节的控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(12): 2954-2960.
- JIA Qingquan, QI Ximeng, NING Siyuan, et al. Strategy research of voltage and reactive power operation involved with distributed PV system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2015, 36(12): 2954-2960.
- [10] 樊梦蝶, 曾成碧, 苗虹. 微网逆变器无功出力按容量分配的改进控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 100-107.
- FAN Mengdie, ZENG Chengbi, MIAO Hong. Improved control strategy of microgrid inverters with reactive power distributed by capacity[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 100-107.
- [11] 苗文静, 高瑜, 刘其辉, 等. 基于风电变模式运行与OLTC协调的配电网电压控制策略[J]. 智慧电力, 2019, 47(11): 48-53.
- MIAO Wenjing, GAO Yu, LIU Qihui, et al. Voltage control strategy for distribution network based on wind power variable mode operation and coordination with OLTC[J]. Smart Power, 2019, 47(11): 48-53.
- [12] 吕清洁, 王韶, 刘庭磊. 含分布式发电的配电网有功-无功综合优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 71-76+83.
- LV Qingjie, WANG Yun, LIU Tinglei. Active/reactive power integrated optimization in distribution networks with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 71-76+83.
- [13] 张璐, 唐巍, 丛鹏伟, 等. 含光伏发电的配电网有功无功资源综合优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5525-5533.
- ZHANG Lu, TANG Wei, CONG Pengwei, et al. Optimal configuration of active-reactive power sources in distribution network with photovoltaic generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5525-5533.
- [14] 黄伟, 刘斯亮, 王武, 等. 长时间尺度下计及光伏不确定性的配电网无功优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 154-162.
- HUANG Wei, LIU Siliang, WANG Wu, et al. Optimal reactive power dispatch with long-time scale in distribution network considering uncertainty of photovoltaic [J]. Automation of Electric Power System, 2018, 42(5): 154-162.
- [15] 符杨, 廖剑波, 李振坤, 等. 考虑越限风险的主动配电网日前优化调度及运行[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6328-6338.
- FU Yang, LIAO Jianbo, LI Zhenkun, et al. Day-ahead optimal scheduling and operating of active distribution network considering violation risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6328-6338.
- [16] 张进, 胡存刚, 芮涛. 基于交替方向乘法法的主动配电网日前两阶段分布式优化调度策略[J/OL]. 中国电力: 1-10[2020-11-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20191106.0905.002.html>.
- ZHANG Jin, HU Cungang, RUI Tao. A day-ahead two-stage distributed optimal scheduling method for active distribution network based on ADMM[J/OL]. Electric Power: 1-10[2020-11-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20191106.0905.002.html>.

- net/kcms/detail/11.3265.TM.20191106.0905.002.html.
- [17] 刘佳陇,叶保璇,张诗建,等.主动配电网集中/就地自适应无功电压控制方法[J].电网与清洁能源,2019,35(11):20-29.
- LIU Jialong, YE Baoxuan, ZHANG Shijian, et al. Adaptive centralized/local volt-VAR control in active distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(11): 20-29.
- [18] 赵书强,张婷婷,李志伟,等.基于数值特性聚类的日前光伏出力预测误差分布模型[J].电力系统自动化,2019,43(13):36-48.
- ZHAO Shuqiang, ZHANG Tingting, LI Zhiwei, et al. Prediction error distribution model of pre-day photovoltaic output based on clustering of numerical characteristics[J]. Automation of Electric Power System, 2019, 43(13): 36-48.
- [19] 朱瑞金,郭威麟,龚雪娇,等.考虑天然气和电负荷之间相关性的短期电负荷预测[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(8):27-32.
- ZHU Ruijin, GUO Weilin, GONG Xuejiao, et al. Short-term power load forecasting considering correlations between natural gas and power load[J]. Proceeding of the CSU-EPSC, 2019, 31(8): 27-32.
- [20] 范志成,朱俊澎,袁越,等.基于改进型直流潮流算法的主动配电网分布式电源规划模型及其线性化方法[J].电网技术,2019,43(2):504-513.
- FAN Zhicheng, ZHU Junpeng, YUAN Yue, et al. Distributed generation planning model for active distribution network and linearization method based on improved DC power flow algorithm[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 504-513.
- [21] 王宁,高朋,贾清泉,等.光伏并网系统参与电压调节的有功和无功协调控制策略研究[J].电工电能新技术,2017,36(8):23-29.
- WANG Ning, GAO Peng, JIA Qingquan, et al. Research on active and reactive power coordination control strategy for PV grid-connected system for voltage regulation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(8): 23-29.