

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191537

考虑光伏集群无功贡献的配电网无功电压优化调节方法

王文宾, 靳伟, 李洪涛, 李会彬, 石磊磊

(国网河北省电力有限公司邢台供电分公司, 河北 邢台 054001)

摘要: 为协调运用配电网各类调压资源, 实现经济、灵活的电压控制, 整合中高压配电网各类无功治理设备, 提出考虑低压光伏无功集群贡献的配电网无功控制资源协调运行优化方法。针对配电网低压侧分布式小容量离线运行光伏电源, 设计了3种光伏集群无功运行模式, 使其按模式预设在线自律运行。提出低压光伏集群无功管控策略, 建立配电网无功控制资源协调优化模型。采用最优分割联合优化方法对变压器分接头及电容器组的切换时间及切换状态进行优化, 在此基础上得出光伏集群无功运行模式及其他治理设备无功输出优化结果。采用前推回代潮流计算嵌套粒子群优化的算法进行求解。仿真算例证明了所提方法的合理性及有效性。

关键词: 配电网; 无功电压优化; 分布式光伏; 集群管控; 无功运行模式; 配电网物联网

Reactive voltage optimization regulation method of distribution network considering the reactive power contribution of a photovoltaic cluster

WANG Wenbin, JIN Wei, LI Hongtao, LI Huibin, SHI Leilei

(Xingtai Power Supply Branch, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Xingtai 054001, China)

Abstract: In order to fully tap the reactive power regulation capacity of DG, coordinate the use of various voltage regulation resources of a distribution network, and realize economic and flexible voltage control, this paper integrates all kinds of reactive power control equipment in a medium and high voltage distribution network. It proposes a coordinated operation optimization method of voltage and reactive power control resources in a distribution network considering the contribution of a low voltage photovoltaic reactive power cluster. This method aims at the distributed small capacity off-line photovoltaic power supply at the low-voltage side of the distribution network, puts forward the reactive power management and control strategy of the low-voltage photovoltaic cluster, and designs three kinds of photovoltaic cluster reactive power operation modes, so that it can preset the on-line self-regulation operation according to the mode. In addition, it establishes a distribution network reactive power control resource coordination optimization model, and adopts an optimal division joint optimization method to cut the transformer tap and capacitor bank. Based on the optimization of switching time and switching state, the reactive power operation mode of a photovoltaic cluster and the reactive power output optimization results of other governance equipment are obtained. The forward and backward power flow calculation is nested into the particle swarm optimization algorithm. The simulation results show that the proposed method is reasonable and effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607153) and Science and Technology Project of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. (No. KJ2018-003).

Key words: distribution network; reactive power and voltage optimization; distributed photovoltaic; cluster management and control; reactive operation mode; distribution internet of thing

0 引言

无源配电网通常采取就地平衡原则管理无功,

并通过变压器有载调压 (On-Line Tap Changer, OLTC) 和投切并联电容器组 (Shunt Capacity Bank, SCB) 进行电压调节。随着分布式电源 (Distributed Generation, DG) 大规模高渗透率接入配电网, 其出力的随机性和不确定性加上配电线路阻感比高的特点, 使配电网电压分布复杂, 电压越限问题突出^[1-2]。这种新态

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (51607153); 国网河北省电力有限公司科技项目资助 (KJ2018-003)

势仅依靠无功就地平衡和 OLTC、SCB 的调节并不能有效解决^[3-4], 需要采取更加主动、更加综合的电压控制策略。光伏并网逆变器及双馈、直驱风电机组具有双向无功调节能力, 能够快速动态响应无功控制, 调压手段更为经济灵活。如何充分挖掘 DG 的电压无功调节能力, 协调运用配电网各类调压资源, 实现经济、灵活的电压控制, 是大规模 DG 并网形势下亟需解决的问题。

国内外学者在传统无功电压调控手段基础上, 结合 DG 无功支撑拓展研究思路, 从多时间尺度^[5-7]、分层分区控制^[8-11]及模型预测控制^[12-14]等方面对配电网无功电压协调优化开展研究。文献[7]提出考虑网络动态重构含多异质可再生分布式电源参与调控的配电网多时空尺度无功优化模型, 基于“分区控制”对各类调压设备进行精细化调控。文献[14]建立了基于模型预测控制的配电网多时间尺度无功优化模型, 包含日前优化调节层和实时滚动调控层。文献[15]挖掘分散式风电机组无功能力, 提出一种考虑负荷类型和风电机组无功极限的分散式风电场优化运行策略; 文献[16]以系统总运行成本最小为目标, 并将 OLTC 和 SCB 动作次数融入目标函数统筹考虑, 进行长时间尺度配电网无功优化调度; 文献[17]提出一种采用自上而下的方式主动管理 DG、有载调压器以及电容器等电压调节设备的电压分层协调控制策略, 以解决电压控制中的调节震荡问题。文献[18]建立了一种主动配电网联合无功优化模型, 在模型加入不同调压设备调用次序, 但缺乏对关键调压设备的动作次数约束。文献[19]提出一种多主动管理手段相协调的主动配电网无功电压优化方法, 采用日优化一时段优化结合的两阶段无功电压优化策略。

电力系统中 220 kV 及以上主电网的无功管理一般采用分层原则, 重点关注电压安全稳定问题。110 kV 及以下配电网的无功管理则按供电分区进行, 主要考虑无功平衡和电压质量。中压电网的分布式光伏和分散式风电及其场站内配置的 SVG、SVC 等一般具备通信监控功能, 可在线调度, 是一种优质电压无功资源。同时, 低压配网中含有大量分布式光伏(Low Voltage Distributed PV, LVDPV), 由于未与电网信息对接, 其无功资源得不到发挥^[20]。随着泛在电力物联网的建设, 配电网台区 TTU 向智能化、平台化方向发展, 可以承担台区低压系统的边缘计算和管控, 从而使 LVDPV 具备了参与电网互动的条件。由于 TTU 与台区设备间信息交互速率低、实时性差, 因而台区 LVDPV 发挥无功资源具有自身特性。类似地, OLTC 和 SCB 在响应速度和

动作频次上也具有特殊性。因而 DG 高渗透率配电网面临多层次、分布式、异质电压无功资源并存的情况, 如何发挥好各类无功资源、优化协调各种设备的联合运行, 解决新能源接入带来的电压问题, 是需要研究的重要课题。

本文以 110 kV 变电站供电区域为对象, 研究考虑多种异质无功设备联合运行的电压无功协调优化策略。首先针对台区 LVDPV 提出一种集群无功管控策略, 设计了 3 种无功运行模式, 使每个台区的 LVDPV 能够在 TTU 管控下按预设统一模式进行集群自律运行。在此基础上, 整合高、中、低压各类电压无功调节手段, 建立了供电区域内考虑多种调压资源属性的电压无功协调优化模型和方法。按设备动作的时间尺度, 先运用最优分割联合优化方法对 OLTC 和 SCB 的切换时间及切换状态进行优化; 然后以台区 LVDPV 集群的运行模式和中压调节设备的无功出力为变量进行全局优化, 使供电区域内网损和电压偏差最小。仿真算例验证了本文方法的有效性。

1 配电网电多层次无功管控框架

1.1 低压光伏集群管控方案

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配置较完善的监控通信功能, 调度系统可根据电网需要在线调控其无功输出^[21]。除此之外, 低压配电网还接有大量分布式小容量光伏。LVDPV 处于用户端, 通信条件差, 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, 可用于输出无功, 是一种优质无功资源^[22]。

本文利用平台化配变终端管理台区光伏资源, 针对 LVDPV 提出一种按集群模式预设并对集群无功运行模式进行优化组合使其在线自律运行的无功调节优化策略。以各配变台区 TTU 为终端平台, 以同一台区接入的 LVDPV 为集群, 进行集群管控, 通过设定 LVDPV 无功运行模式, 将其模式信息固化到逆变器控制器中, 运行中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 集群按预定模式工作。按上述思路管理 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配置, 通信负担非常小。

1.2 多层次无功设备管控框架

本文整合配电网 110 kV/10 kV、10 kV/380 V 侧各类异质无功设备进行管控。其中 110 kV 侧包括 OLTC; 10 kV 侧包括 SCB、分布式光伏站、分散双

馈感应风电场及其场站内配置的 SVC 及 SVG；380 V 低压侧包括 LVDPV 集群。配电网电压无功调控框架如图 1 所示。

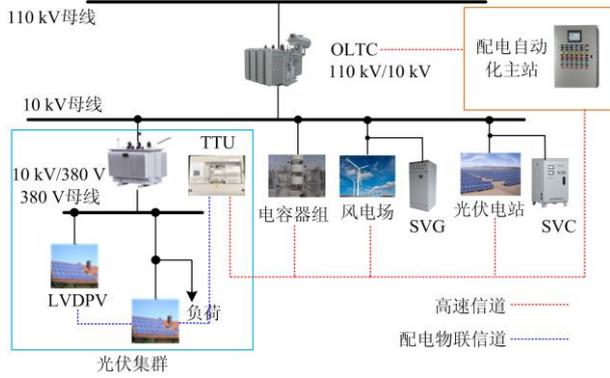


图 1 配电网多层次无功调控框架

Fig. 1 Reactive power control framework of medium and high voltage distribution network

通过优化 OLTC 档位调节及 SCB 投切组数,对配电网无功进行分段不连续调节;根据光伏发电及风电运行态势,调控光伏、DFIG 及其场站 SVC、SVG 无功输出参与配电网中压侧无功调节。充分调用低压侧分布的 LVDPV 参与配电网无功调节,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,使其按模式预设、自律进行无功输出。

2 光伏集群无功运行模式设计

本文设计 3 种低压光伏集群运行模式,3 种模式主要设计及划分依据为:

1) 控制规则易表征,无功输出可确定。本文光伏集群的功能是无功辅助调节,因而其无功输出应相对独立并可确定,以便在此基础上可对中压电网的电压无功调节设备进行决策调度。集群采用模式固化、预先配置的方式,因而无功运行模式应力求简捷、易表征且方便优化计算。

2) 便于组合拼接,贴近无功需求曲线。本文根据配电网馈线无功运行各种场景特性,使光伏集群在各无功模式下提供易于拼接及组合的无功输出特性。

3) 适应光伏有功运行特点。光伏有功输出受光照控制,因而其剩余容量和无功潜力也受光照制约,设计的 3 种无功模式考虑了光伏的实际特点。

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。3 种集群无功运行模式分别用

M1~M3 表示,具体包括:

(1) 零无功模式

零无功模式的输出特性为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。零无功模式的输出特性为

$$\text{M1:} \begin{cases} P_{\text{DPV}} = P(t) \\ Q_{\text{DPV}} = 0 \end{cases} \quad t \in (T, T+1) \quad (1)$$

(2) 定无功模式

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

$$\text{M2:} \begin{cases} P_{\text{DPV}} = P(t) \\ Q_{\text{DPV}} = \lambda \end{cases} \quad t \in (T, T+1) \quad (2)$$

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

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

(3) 无功递增/减模式

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/递减变化。无功递增/递减模式的输出特性为

$$\text{M3:} \begin{cases} P_{\text{DPV}} = P(t) \\ Q_{\text{DPV}} = Q_f + at \end{cases} \quad t \in (T, T+1) \quad (4)$$

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,具体如式(5)所示。

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

由上述 3 种光伏集群无功运行模式定义可知,当定无功模式输出的无功功率值为 0 时,可变迁为零无功模式;当无功递增/递减模式斜率为 0 时,可变迁为定无功模式。因此,3 种模式存在交叉和变迁现象。本文将可变迁模式仍作为独立模式存在,是考虑这样可使运行模式清晰,保障模式参数有效,同时也使模式组合的优化计算易操作。例如定无功

模式的无功定值应“不太小”才有实际意义, 若定值很小则应属于零无功模式。为避免模式功率交叉优化结果产生影响, 本文设定 3 种模式执行的边界条件。设定零无功模式执行的边界条件为逆变器输出无功功率小于该集群光伏总容量的 3%; 无功递增/递减模式、恒比例无功模式的斜率大于 0.09。

3 配电网电压无功控制资源协调优化建模

本文针对 DG 高渗透的配电网面临多层次、分布式、异质电压无功资源并存的状态, 整合高、中、低压各类电压无功调节手段, 制定多种无功设备联合无功协调优化运行策略, 建立优化模型, 以实现 110 kV 配电网供电区域无功电压全局精细化调控。

3.1 多种无功设备联合运行电压无功协调优化策略

考虑配电网不同无功设备运行特性, 以电压偏差及网损最小为目标, 按设备动作时间尺度对 24 h 划分时段, 运用最优分割联合优化方法对 OLTC 和 SCB 的切换时间及切换状态进行优化; 然后以台区 LVDPV 集群的运行模式和中压调节设备的无功出力为变量进行全局优化, 配电网多类无功资源协调优化结构如图 2 所示。

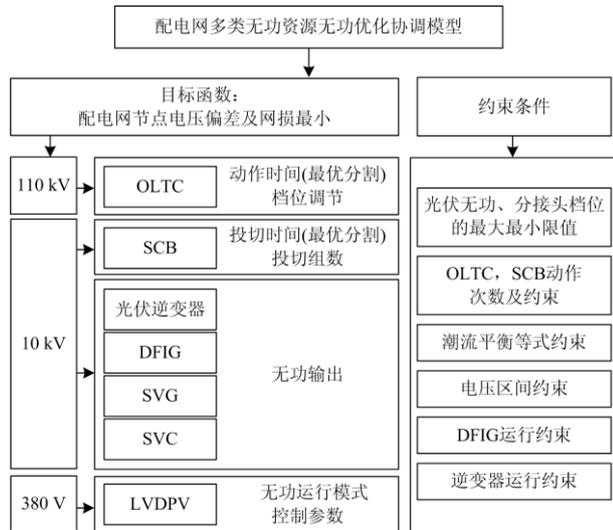


图 2 配电网多类无功设备联合电压调控框图

Fig. 2 Joint voltage coordination diagram of reactive Power equipment of distribution network

具体策略如下:

(1) 配电网电压日前无功优化。对配电网电压日前无功优化模型进行求解, 得到次日各时段配电网无功设备优化运行结果, 包括变压器最佳分接头档位、电容器投切组数、LVDPV 无功运行模式以及光伏逆变器、DFIG、SVC、SVG 的无功输出。

(2) OLTC 及 SBC 动作时刻最优分割。以(1)得

到结果为初值, 在满足 OLTC 动作次数约束下, 采用最优分割法对次日各个时段日前结果进行分段, 确定 OLTC 最优动作时刻。然后以分时段内 OLTC 分接头档位及各时段其他无功设备无功输出为控制变量, 优化得到各时段 OLTC 最佳分接头档位; SCB 投切时间优化计划步骤同上。

(3) 其他无功设备联合优化。由(2)得出的 SCB 动作时刻, 以各时段 SCB 投切组数和各时段的其他无功资源的无功输出功率为控制变量进行优化, 得到最优控制变量结果。

3.2 配电网无功电压协调优化模型

3.2.1 目标函数

配电网无功电压协调优化模型目标函数为配电网节点电压及网损最小, 具体模型如下

(1) 配电网节点电压偏差最小

$$F_1 = \min \left\{ \sum_{t=1}^m \sum_{i=1}^n |U_{i,t} - U_0| \right\} \quad (6)$$

式中: $U_{i,t}$ 为节点 i 的电压区间中值; U_0 为节点电压期望值; n 为系统节点数; m 为对 24 h 划分的时段数。

(2) 配电网全时段网损最小

$$F_2 = \min \left\{ \sum_{t=1}^m \sum_{i=1}^n P_{\text{loss},i,t} \right\} \quad (7)$$

其中

$$P_{\text{loss},i,t} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \left[\alpha_{ij} (P_{i,t} P_{j,t} + Q_{i,t} Q_{j,t}) + \beta_{ij} (Q_{i,t} P_{j,t} - P_{i,t} Q_{j,t}) \right] \quad (8)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{\gamma_{ij}}{U_i U_j} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (9)$$

$$\beta_{ij} = \frac{\gamma_{ij}}{U_i U_j} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (10)$$

式中: $P_{\text{loss},i,t}$ 为第 t 时段配电网节点 i 的网损; $P_{j,t}$ 、 $Q_{j,t}$ 为 t 时段节点 j 所流入的有功及无功功率; U_i 、 U_j 为电网节点 i 、 j 的节点电压; γ_{ij} 为节点间的馈线电阻。

(3) 综合目标函数

将配电网节点电压偏差最小与总网损最小加权建立配电网无功优化型综合目标函数为

$$F = \alpha F_1 + (1 - \alpha) F_2 \quad (11)$$

式中, α 为目标函数的权重。关于 α 的取值, 参考文献[18]相关研究。

3.2.2 光伏集群无功出力模型

对于 LVDPV 集群, 其输出的有功及无功功率受预设的无功模式限定, 存在以下关系

$$\begin{cases} P_{LVDPV,i,t} = \sum_{s=1}^m \sum_{k \in \Omega_{DPV}} N_k(s) \cdot P_{DPV,k,t} \\ Q_{LVDPV,i,t} = \sum_{s=1}^m \sum_{k \in \Omega_{DPV}} N_k(s) \cdot Q_{DPV,k,t} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{LVDPV,i,t}$ 、 $Q_{LVDPV,i,t}$ 分别为 t 时段节点 i 接入的 LVDPV 集群输出的有功及无功功率; $P_{DPV,k,t}$ 、 $Q_{DPV,k,t}$ 分别为 t 时段单个光伏集群有功及无功输出; s 为光伏集群所采用的无功运行模式, 取值 1~3; Ω_{DPV} 为馈线光伏集群集合; k 为馈线光伏集群个数; $N_k(s)$ 表示第 k 个光伏集群是否运行在 s 模式下, 取值 1 或 0, 取 1 表示光伏集群运行在当前无功模式下。

3.2.3 约束条件

(1) 配电网潮流平衡等式约束

$$\begin{cases} P_{i,t} = U_{i,t} \sum_{j \in i} U_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{i,t} = U_{i,t} \sum_{j \in i} U_{j,t} (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} P_{i,t} = P_{G,i,t} + P_{PV,i,t} + P_{DFIG,i,t} + \\ P_{LVDPV,i,t} - P_{L,i,t} \\ Q_{i,t} = Q_{G,i,t} + Q_{PV,i,t} + Q_{DFIG,i,t} + Q_{SCB,i,t} + \\ Q_{SVC,i,t} + Q_{SVG,i,t} + Q_{LVDPV,i,t} - Q_{L,i,t} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 为 t 时段内节点 i 注入的有功功率、无功功率; $P_{G,i,t}$ 、 $Q_{G,i,t}$ 分别为第 t 时段电网向节点 i 注入的有功及无功功率; $P_{PV,i,t}$ 、 $Q_{PV,i,t}$ 为 t 时段光伏电站输出的有功功率、无功功率; $P_{DFIG,i,t}$ 、 $Q_{DFIG,i,t}$ 为 t 时段 DFIG 机组输出的有功功率、无功功率; $Q_{SCB,i,t}$ 为 t 时段内节点 i 处无功补偿电容器组的投切容量; $Q_{SVC,i,t}$ 、 $Q_{SVG,i,t}$ 为 t 时段节点 i 处无功补偿设备投切容量; $P_{L,i,t}$ 、 $Q_{L,i,t}$ 为 t 时段内节点 i 处负荷消耗的有功功率、无功功率。

(2) 控制变量约束

无功优化模型约束条件包括 OLTC、SCB、SVC 及 SVG 控制变量约束, 具体如下

$$\begin{cases} Q_{SVC,i,\min} \leq Q_{SVC,i,t} \leq Q_{SVC,i,\max} \\ Q_{SVG,i,\min} \leq Q_{SVG,i,t} \leq Q_{SVG,i,\max} \\ K_{\min} \leq K_t \leq K_{\max} \\ 0 \leq N_{C,t} \leq N_{C,\max} \end{cases} \quad (15)$$

$$T_t = 1 + K_t \times \Delta T \quad (16)$$

$$Q_{N_{C,t}} = N_{C,t} \times q_C \quad (17)$$

式中: $Q_{SVC,i,\min}$ 、 $Q_{SVC,i,\max}$ 、 $Q_{SVG,i,\min}$ 及 $Q_{SVG,i,\max}$ 分别为 t_1 时刻 t 节点所连接的无功补偿装置输出无功功率上下限; K_{\max} 、 K_{\min} 分别为有载调压变压器分接头档位的上、下限值; K_t 为 t 时段内有载调压变压器分接头档位; T_t 为 t 时段内变压器变比; ΔT 为有载调压变压器分接头单位调节量; $N_{C,\max}$ 为无功补偿电容器最大投切组数; $N_{C,t}$ 为 t 时段内无功补偿电容器投切组数; $Q_{N_{C,t}}$ 为 t 时段内无功补偿电容器组投切容量; q_C 为无功补偿电容器单组投切容量。

(3) 动作次数约束

有载调压变压器和无功补偿电容器作为离散型决策变量, 在一个调度周期内操作次数具有严格限制^[23]。应满足以下约束条件。

$$\sum_{t \in m} |K_{L,t+1} \oplus K_{L,t}| \leq L_t \quad (18)$$

$$|K_{L,t_3+1} - K_{L,t_3}| \leq L_{t_1} \quad (19)$$

$$\sum_{t_3 \in 24} |C_{k,t_3+1} \oplus C_{k,t_3}| \leq L_k \quad (20)$$

式中: L_t 为有载调压变压器分接头档位最大允许动作次数; L_{t_1} 为变压器分接头相邻时段最大调节档位; L_k 为无功补偿电容器组最大允许投切次数。

(4) 配电网电压区间约束

$$[U_{i,t}] \subseteq [U_{\min}, U_{\max}] \quad (21)$$

式中: U_{\max} 、 U_{\min} 为满足运行要求的电压上、下限值; $[U_{i,t}]$ 为 t 时段内节点 i 的电压幅值区间。

(5) DFIG 风电机组无功出力约束

基于现有关于 DFIG 无功输出特性相关研究, 可知 DFIG 无功输出受其定子侧无功输出及转子侧换流器容量等条件限制, 具有下述特性^[24]。

$$\begin{cases} Q_{DFIG,\max} = Q_{s,\max} + Q_{c,\max} \\ Q_{DFIG,\min} = Q_{s,\min} + Q_{c,\min} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $Q_{DFIG,\max}$ 、 $Q_{DFIG,\min}$ 分别为 DFIG 输出无功功率限值; $Q_{s,\max}$ 、 $Q_{s,\min}$ 分别为 DFIG 定子侧输出的最大及最小无功功率; $Q_{c,\max}$ 、 $Q_{c,\min}$ 分别为 DFIG 网侧换流器无功输出最大最小值。

(6) 光伏逆变器无功出力约束

光伏无功输出受其逆变器剩余容量限制, 具有如下关系^[25]。

选取河北省某市典型日风光特性曲线及负荷用电曲线作为原始数据, 风光特性曲线及负荷用电曲线如图 4 所示。

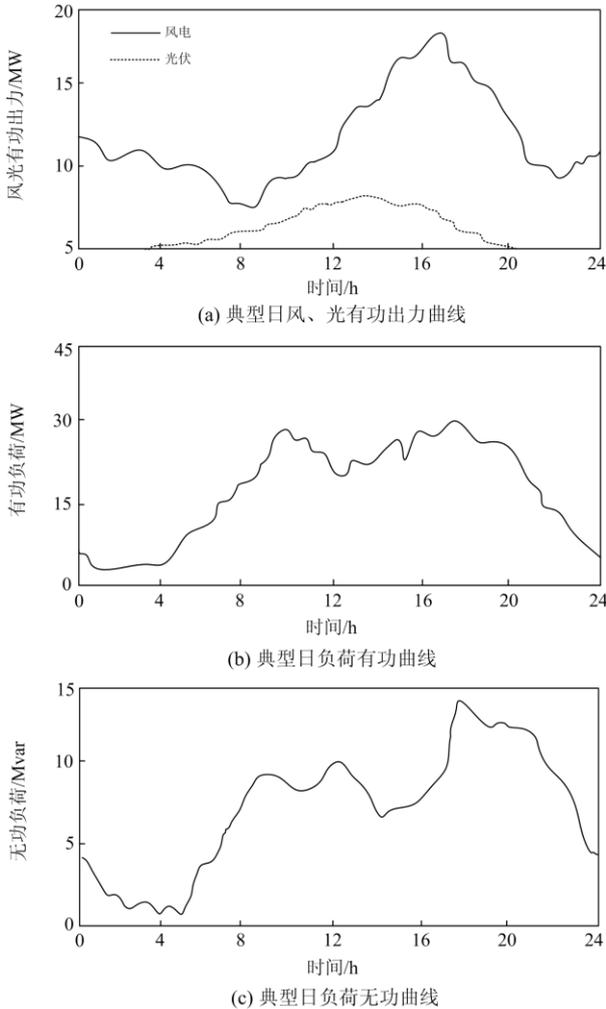


图 4 风、光及负荷特性曲线

Fig. 4 Wind, light and load characteristic curve

由风光特性曲线图可知, 风电在 16:00 时左右达到最大有功输出, 而光伏发电在 13:00—15:00 时达到最大有功输出。

将上述基础数据代入到前推回代复仿射潮流计算中进行运算, 可以得到各个时段电压幅值情况。选取一天中 11:00—17:00 的数据进行分析, 结果如图 5 所示。在未采用本文方法进行优化前, 该网络在 14:00—15:00 时段存在电压越限等问题。

由图 5 可知, 当 PV 接入配电网进行潮流计算后, 由于光伏输出功率的不断增加, 导致在该时段有电压越限发生, 且越限节点分布在节点 13 到节点 18 之间。原因是该时段光伏有功输出较前时段增加, 使得光伏逆变器可利用容量变小, 即使逆变器

全部剩余容量用于无功调压也无法将各节点电压调至合格区间内。因此, 需要通过其他调压手段相互配合来进行电压调节, 以提高电压运行水平, 减少电压越限程度。

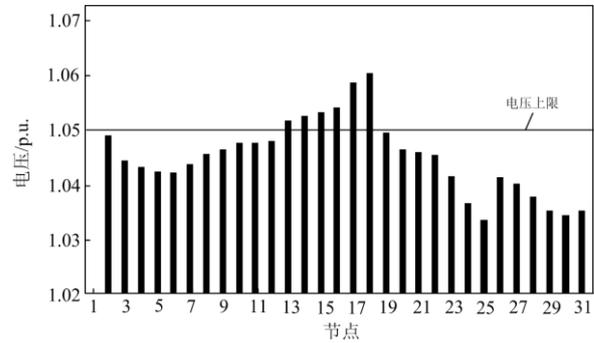


图 5 优化前电压幅值

Fig. 5 Voltage amplitude before optimization

基于上述分析, 采用本文建立的配电网电压无功优化模型进行求解, 得到 24 个时段变压器最优分接头档位调节、无功补偿电容器最优投切组数、DG 及其场站 SVC、SVG 最优无功输出值和光伏集群最优运行模式。其中, 一天中 OLTC 及 SCB 动作调节结果如表 2 所示。

表 2 OLTC 及 SCB 动作调节结果

Table 2 OLTC and SCB action adjustment result

时段	SCB 投入数量	OLTC 变比	时段	SCB 投入数量	OLTC 变比
1	5	1.05	13	1	1
2	5	1.05	14	1	1
3	4	1.05	15	1	0.975
4	4	1.05	16	1	0.975
5	4	1.025	17	1	0.975
6	4	1.025	18	2	0.975
7	3	1.025	19	2	0.975
8	3	1.025	20	2	0.975
9	3	1.025	21	4	1
10	3	1.025	22	4	1
11	3	1.025	23	4	1
12	3	1.025	24	4	1

限于篇幅, 选取一天中 11—16 时具有代表性的 6 个时段其他电压调节控制资源优化结果用于分析, 其中表 3 为 10 kV 侧无功控制资源优化结果, 表 4 为 LVDPV 集群无功模式及参数调节结果。

由上述结果分析可知, 在 16 时段为放出无功功率, 支撑配电网电压。电容器组分别在第 2 时段、第 6 时段、第 17 时段、第 20 时及第 24 时段动作,

表 3 10 kV 侧无功设备配置结果

Table 3 Configuration results of 10 kV side reactive equipment

时段	风机无功/ Mvar	光伏无功/ Mvar	SVC/ Mvar	SVG/ Mvar
11	2.686 5	1.433 4	0.721 1	0.813 4
12	3.667 5	1.299 7	0.734 8	0.905
13	3.443 5	1.002 2	0.657 2	0.836 3
14	2.324 3	0.923 4	0.552 2	0.629 5
15	1.311 1	0.387 6	0.332 4	0.331 5
16	0.275 8	-0.563 5	-0.194 7	-0.174 3

表 4 光伏集群无功运行模式配置结果

Table 4 Configuration results of photovoltaic cluster reactive power operation mode

时段	集群 1	集群 2	集群 3	集群 4
1	M2(0.2755)	M3(0.3,0.07)	M3(0.5,0.07)	M2(0.3235)
2	M2(0.3475)	M3(0.3,0.07)	M3(0.4,0.07)	M2(0.3257)
3	M2(0.5460)	M2(0.5454)	M2(0.7323)	M2(0.4579)
4	M2(0.4598)	M2(0.5454)	M2(0.9435)	M2(0.5684)
5	M2(0.3658)	M1(0)	M2(0.4433)	M2(0.3456)
6	M3(0.6,-0.1)	M3(0.4,0.05)	M2(0.3543)	M1(0)

而有载调压变压器分别在第 4 时段、第 12 时段、第 14 时段、第 20 时段和第 24 时段动作。所以,调压设备全部满足本文设定的动作次数限制,并且使得有载调压变压器和无功补偿电容器组可以在同一时段动作,极大地发挥了各自的电压调控能力。10 kV 侧 PV、DFIG 及其场站内 SVC 与 SVG,380 V 侧 LVDPV 无功运行模式都实现了参与配电网无功优化,各自发挥自己无功调节能力,保证配电网电压运行水平最优。动态优化是考虑配电网系统实际运行情况采取的一种优化调整,虽然不能保证各时段结果最优,但是可以实现全天结果最优。

为证明本文所提方法在无功调压方面优越性,将本文所提无功优化协调模型与未优化前以及仅考虑 DG 无功调节的优化方法^[27]的结果进行对比,结果如表 5 所示。

表 5 各类模型优化结果对比

Table 5 Comparison of optimization results of various models

分析场景	电压偏差/%	网损/MWh
无功电压优化前	5.32%	1.135
仅分布式电源无功电压优化	4.75%	1.028
本文无功电压优化	3.11%	0.993

由上述结果分析可知,本文所提方法对配电网电压运行水平控制及网损方面均优于其他两种方

法。因此,采用配电网多类型无功调压资源共同参与配电网无功调整能够有效改善配电网电压运行水平,降低网络损耗,具有一定的指导意义。

5 结论

本文提出考虑低压光伏无功集群贡献的配电网电压无功控制资源协调运行优化方法。该方法针对配电网低压侧分布式小容量离线运行光伏电源,提出低压光伏集群无功管控策略,设计 3 种光伏集群无功运行模式,使其按模式预设在线自律运行;建立配电网无功电压控制资源协调优化模型,采用最优分割联合优化方法对变压器分接头及电容器组的切换时间及切换状态进行优化,在此基础上得出光伏集群无功运行模式及其他治理设备无功输出优化结果。算例结果表明本文提出的配电网无功电压控制资源协调方法能够有效降低配电网网损,改善网络电压偏差。

参考文献

- [1] 孙玲玲, 赵美超, 王宁, 等. 基于电压偏差机会约束的分布式光伏发电准入容量研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(7): 1560-1569.
SUN Lingling, ZHAO Meichao, WANG Ning, et al. Research of permitted capacity of distributed photovoltaic generation based on voltage deviation chance constrained[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(7): 1560-1569.
- [2] 王宁, 孙玲玲, 贾清泉, 等. 计及光伏调压能力的分布式光伏并网机会约束规划方法[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(6): 88-96.
WANG Ning, SUN Lingling, JIA Qingquan, et al. Distributed photovoltaic grid-connected opportunity constrained planning method with photovoltaic voltage regulating capacity[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(6): 88-96.
- [3] 刘文霞, 龙伟迪, 宫琦, 等. 计及微网负荷特性的配电网动、静态无功设备优化配置方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(4): 63-70.
LIU Wenxia, LONG Weidi, GONG Qi, et al. Optimal configuration method of dynamic and static reactive power equipment for distribution network considering the load characteristic of microgrid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(4): 63-70.
- [4] 刘畅, 郭力, 柴园园, 等. 含高渗透分布式光伏的增量配电网日前优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 90-98.

- LU Chang, GUO Li, CHAI Yuanyuan, et al. Day-ahead optimal scheduling method for incremental distribution network with high penetration of distributed photovoltaic[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 90-98.
- [5] 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. Reactive power optimization scheduling of distribution network with photovoltaic uncertainty in a long time scale[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 154-162.
- [6] 肖浩, 裴玮, 董佐民, 等. 基于元模型全局最优化方法的含分布式电源配电网无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(20): 1-13.
- XIAO Hao, PEI Wei, DONG Zuomin, et al. Reactive power optimization of distribution network with distributed generation using metamodel-based global optimization method[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20): 1-13.
- [7] 颜湘武, 徐韵. 考虑网络动态重构含多异质可再生分布式电源参与调控的配电网多时空尺度无功优化[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4358-4372.
- YAN Xiangwu, XU Yun. Multiple time and space scale reactive power optimization for distribution network with multi-heterogeneous RDG participating in regulation and considering network dynamic reconfiguration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4358-4372.
- [8] 林少华, 吴杰康, 莫超, 等. 基于二阶锥规划的含分布式电源配电网动态无功分区与优化方法[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 238-246.
- LIN Shaohua, WU Jiekang, MO Chao, et al. Dynamic partition and optimization method for reactive power of distribution networks with distributed generation based on second-order cone programming[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 238-246.
- [9] 孟庭如, 邹贵彬, 许春华, 等. 一种分区协调控制的有源配电网调压方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2852-2860.
- MENG Tingru, ZOU Guibin, XU Chunhua, et al. A voltage regulation method based on district-dividing coordinated control for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2852-2860.
- [10] 李建芳, 张璐, 宋晓辉, 等. 含高渗透率分布式电源的配电网多目标无功分区及主导节点选择方法[J]. 可再生能源, 2017, 35(11): 1664-1671.
- LI Jianfang, ZHANG Lu, SONG Xiaohui, et al. Multi-objective reactive power partition and dominant node selection method for distributed power supply with high permeability[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(11): 1664-1671.
- [11] 陆凌芝, 耿光飞, 季玉琦, 等. 基于电气距离矩阵特征根分析的主动配电网电压控制分区方法[J]. 电力建设, 2018, 39(1): 83-89.
- LU Lingzhi, GENG Guangfei, JI Yuqi, et al. Voltage control partitioning method for active distribution network based on electrical distance matrix eigenvalue analysis[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(1): 83-89.
- [12] 徐峰达, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 基于模型预测控制理论的风电场自动电压控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 59-67.
- XU Fengda, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Automatic voltage control of wind farm based on model predictive control theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 59-67.
- [13] 张颖, 季宇, 唐云峰. 基于 MPC 含分布式光伏配电网有功功率无功功率协调控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 140-146.
- ZHANG Ying, JI Yu, TANG Yunfeng. MPC includes active power and reactive power coordinated control of distributed photovoltaic distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 140-146.
- [14] 颜湘武, 徐韵, 李若瑾, 等. 基于模型预测控制含可再生分布式电源参与调控的配电网多时间尺度无功动态优化[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2022-2037.
- YAN Xiangwu, XU Yun, LI Ruojin, et al. Multi-time scale reactive power optimization of distribution grid based on model predictive control and including RDG regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2022-2037.
- [15] 刘昊, 王玮, 唐芬. 基于变功率因数的分散式风电场优化运行策略[J]. 太阳能学报, 2019, 40(2): 387-394.
- LIU Hao, WANG Wei, TANG Fen. Optimal operation strategy of distributed wind farm based on variable power factor[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(2): 387-394.
- [16] 季玉琦, 耿光飞, 温渤婴, 等. 基于最优分割法的含 DG 配电网动态无功优化[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2585-2592.
- JI Yuqi, GENG Guangfei, WEN Boying, et al. Dynamic

- reactive power optimization in distribution network with DG based on optimal partition[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2585-2592.
- [17] 张国荣, 廖兵, 彭勃, 等. 电网电压不平衡条件下混合无功补偿系统分层协调控制策略[J]. 电测与仪表, 2019, 56(5): 6-12.
- ZHANG Guorong, LIAO Bing, PENG Bo, et al. Hierarchical coordinated control strategy of hybrid reactive compensation system under unbalanced grid voltage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(5): 6-12.
- [18] 邢海军, 程浩忠, 张逸. 基于多种主动管理策略的配电网综合无功优化[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1504-1510.
- XING Haijun, CHENG Haozhong, ZHANG Yi. Reactive power comprehensive optimization in distribution network based on multiple active management schemes[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1504-1510.
- [19] 廖剑波, 张路, 符杨, 等. 多主动管理手段相协调的主动配电网无功电压优化[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(6): 130-137.
- LIAO Jianbo, ZHANG Lu, FU Yang, et al. Reactive power and voltage optimization of active distribution network considering the coordination of multiple active management means[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(6): 130-137.
- [20] 张从越, 窦晓波, 盛万兴, 等. 分布式光伏集群鲁棒虚拟同步化控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 510-521.
- ZHANG Congyue, DOU Xiaobo, SHENG Wanxing, et al. A robust virtual synchronization control strategy for distributed photovoltaic clusters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 510-521.
- [21] DABRA V, PALIWAL K K, SHARMA P, et al. Optimization of photovoltaic power system: a comparative study[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 29-39. DOI: 10.1186/s41601-017-0036-2.
- [22] GAO Yajing, XUE Fushen, YANG Wenhai, et al. Optimal operation modes of photovoltaic-battery energy storage system based power plants considering typical scenarios[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 397-406. DOI: 10.1186/s41601-017-0066-9.
- [23] 魏剑啸, 粟忠来, 杨波, 等. 配电台区无功功率及三相不平衡电容调节的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 71-79.
- WEI Jianxiao, SU Zhonglai, YANG Bo, et al. Study on reactive power and three-phase unbalance regulated by capacitor in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 71-79.
- [24] 范士雄, 韩巍, 刘幸蔚, 等. 计及 VSC 和 DFIG 的电网动态无功优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 29-36.
- FAN Shixiong, HAN Wei, LIU Xingwei, et al. A dynamic reactive power optimization model considering reactive power support of DFIG and VSC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 29-36.
- [25] 裴哲义, 丁杰, 李晨, 等. 分布式光伏并网问题分析与建议[J]. 中国电力, 2018, 51(10): 80-87.
- PEI Zheyi, DING Jie, LI Chen, et al. Analysis and suggestion for distributed photovoltaic generation[J]. Electric Power, 2018, 51(10): 80-87.
- [26] 王树洪, 邵振国. 考虑 DG 运行不确定性的复仿射 Ybus 高斯迭代区间潮流算法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 38-44.
- WANG Shuhong, SHAO Zhenguo. Interval power-flow algorithm based on complex affine Ybus-Gaussian iteration considering uncertainty of DG operation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 38-44.
- [27] 苗淼, 刘赛, 施涛, 等. 光伏光热联合发电基地并网优化调度模型[J]. 中国电力, 2019, 52(4): 51-58.
- MIAO Miao, LIU Sai, SHI Tao, et al. Optimal dispatch model of grid-connected power base considering photovoltaic power and concentrating solar power[J]. Electric Power, 2019, 52(4): 51-58.

收稿日期: 2019-12-12; 修回日期: 2020-02-20

作者简介:

王文宾(1968—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: xtwangwb@126.com

(编辑 张爱琴)