

[分布式光伏]

分布式光伏并网的无功优化方法

文/杨世佳
永清环保股份有限公司

为了提升分布式光伏并网后配电网运行效率与质量，提出一种分布式光伏并网的无功优化方法。通过对配电网无功优化总体思路的简单介绍，构建基于无功控制目标追踪的数学模型，设计基于外点罚函数的模型求教方法，以期对分布式光伏并网的无功进行调控提供帮助。

分布式光伏并网过程中，应采取科学、合理的方式对配电网中的无功进行控制。以往阶段，电力领域通常采用安装电容器的方式对无功调控，具有较为良好的应用效果。但通过大量实践研究可以发现，该无功调控方法也存在一些缺陷，如只可用于10 kV以上的高压配电网当中，控制误差较大，容易出现超调的问题等，依然会对并网后的配电网造成一定干扰。基于此，介绍一种分布式光伏并网的无功优化方法，对进一步提升并网后的配电网运行质量具有重要意义。

配电网无功优化总体思路

分布式光伏并网后的配电网无功优化时，主要利用静止无功发射器（SVG）对配电网无功进行调控。该设备具有响应速度快，实时调控性能良好等诸多优势，适用于中高压配电网系统无功优化当中。而通过SVG对配电网无功调控时，应考虑以下几个问题^[1]。

1) 确定最佳的SVG安装点。整个配电网内包含大量节点，在理想条件下，应将所有节点上均安装一个SVG设备，以使整个配电网处于最优运行状态。然而从实际角度来说，由于SVG设备造价较高，后期运维管理难度较高，导致所有节点很难都安装SVG设备，因而需要根据配电网实际情况，确定出最佳的SVG安装点，在确保电能质量符合规定

要求的基础上，降低配电网优化方案成本。

2) SVG设备容量计算。SVG设备的使用，通常与配电网改造成本成正相关关系，但应确保SVG设备的容量符合配电网负荷要求，即在负荷峰值与谷值工况条件下，能够输出或吸入充足的无功，以提升整个配电网运行的稳定性。

3) 将电压控制作为主要目标，利用配电网线损及相关成本构建出无功优化模型，进而通过相应的方式对模型求解，从而确定出最佳的AVG设备布置方案。

基于无功控制目标追踪的数学模型构建

1. 确定电压控制目标节点

现代电力系统规模不断扩大的今天，配电网中的节点数量越来越多，其中不仅涉及变电站、配电所、用户接入点等关键连接点，而且还包含开闭所、柱上开关等。若完全按照实际情况建模，虽然模型准确度较高，但由于节点数量较大，将会大大增加建模难度，降低模型计算效率，不利于配电网无功优化。所以，在构建配电网无功优化模型时，应先选择出合理的节点。研究中对配电网选择时，主要参考下述3个标准。

1) 主导节点。注重整个配电网的链接特性，即支路的汇聚节点均看作配电网的主导节点，将这些节点全部保留。

2) 关键负荷节点。在一条支路当中,通常也包含大量的负荷节点,这些节点的重要程度并不相同,如果采用所有节点,将会增加配电网无功调控时的投入成本,不符合配电网实际改造要求。因而在控制改造成本的基础上,确保模型具有较高的精确性,仅选取二级重要用户当作模型的关键负荷节点。

3) 电压敏感节点。配电网中不仅包括主导节点与关键负荷节点,同时还有很多对电能质量较为敏感的用户,如半导体企业、芯片制造企业、化纤企业和石化生产企业等,当电能电压出现较大波动后,将会对生产作业活动的开展造成干扰,甚至会引发严重的生产安全事故,对企业经济效益、人员生命健康及社会发展均造成较大危害。所以,这些敏感用户生产过程中,应确保电能电压处于稳定状态。

2. 基于电压控制目标追踪的配电网无功优化模型

与常规无功补偿设备相比,SVG设备连续补偿效果较好,配电网中的电压更加稳定,但也具有补偿容量上限,且SVG设备改造后,将会增加改造及后续运维管理成本,因而在配电网中不可无限地安装SVG设备。与此同时,如果在配电网中安装了大量SVG设备,会使配电网中出现严重的谐波问题,从而对配电网稳定运行及电能质量产生一定干扰^[2]。所以,为控制SVG设备改造与运维管理成本的同时,提升配电网运行效果与电能质量,应设计出最佳的SVG布置优化方案,具体包括两方面:一是计算出最佳的SVG设备容量;二是在整个配电网中选择合理的SVG设备安装节点。

将SVG设备安装到配电网中后,主要通过配电网中无功与电压波动的调控,以此达到提升配电网运行稳定性的目的。所以,对SVG设备布置优化过程中,不仅要考虑配电网中无功补偿的容量,而且还应注重SVG设备抑制电压波动的效果。为此,在模型目标函数设计时,选择的是安装SVG设备后配电网产生的线损,表达式为^[3]

$$F = \min \left[\sum \Delta U_i \right] \quad (1)$$

$$\Delta U_i = \left| U_i - U_N + \sum_k^{PV} U_{i,k} \right| \quad (2)$$

$$= \left| \sum_j^i \frac{P_{D,j} R_j + Q_{D,j} X_j}{U_N} - \sum_k^{PV} \sum_j^i \frac{P_{D,j} R_j + Q_{D,j} X_j}{U_N} \right|$$

式中, F 为目标函数; ΔU_i 表示*i*节点的压降值; i 为节点的编号; U_i 为分布式光伏未并网时, i 节点的实际电压水平; U_N 为分布式光伏未并网时,基准电压水平; $\sum_k^{PV} U_{i,k}$ 为分布式光伏并网后, i 节点出现的电压上升值; $\sum_j^i \frac{P_{D,j} R_j + Q_{D,j} X_j}{U_N}$ 为*k*节点并网分布式光伏 $P_{D,K} + jQ_{D,k}$ 后, i 节点出现的电压上升值; $\sum_k^{PV} \sum_j^i \frac{P_{D,j} R_j + Q_{D,j} X_j}{U_N}$ 为PV中全部节点均接入到分布式光伏 $\{P_{D,K} + jQ_{D,k}\}$ 时出现的电压上升值。

为确保目标函数计算出精确的结构,应根据问题具体情况设计出相应的约束条件。针对分布式光伏并网无功优化问题,主要考虑两个方面因素,分别为SVG设备容量与节点电压,表达式为

$$Q_{Cj} \leq Q_{Cj,max}, \quad j=1,2,\dots,N_C \quad (3)$$

$$V_{Di,min} \leq V_{Di} \leq V_{Di,max}, \quad i=1,2,\dots,N_D \quad (4)$$

式中, Q_{Cj} 为安装SVG设备的容量; $Q_{Cj,max}$ 为节点上无功负荷的最大值,将SVG设备容量控制在无功负荷最大值范围内,可以在保证配电网稳定运行的同时,防止出现资源浪费的问题; $V_{Di,min}$ 为节点上允许通过安全电压的最小值; V_{Di} 为配电网中实际的电压水平; $V_{Di,max}$ 为节点上允许通过安全电压的最大值; N_C 为SVG安装数量; N_D 为配电网中节点的数量。

优化模型求解

1. 外点罚函数

研究中采用外点罚函数对无功优化数学模型进行计算。该函数主要是将约束优化问题转变成无约束问题后,通过逐步计算,以此寻找出接近约束问题的极小点。该函数初始惩罚参数较小,有利于快速、准确地计算。随着数学模型的不计算,虽然惩罚参数也随之而提升,增加求解难度,但分布式光伏并网无功优化迭代次数并不是很多,惩罚参数基本处于相对较小的范围内,因而该函数依然符合分布式光伏并网无功优化要求。常规外点罚函数表达式为^[4]

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } g_i(x) \geq 0, \quad i=1,2,\dots,m \\ h_j(x) = 0, \quad j=1,2,\dots,l \end{cases} \quad (5)$$

式中, $f(x)$ 、 $g_i(x)$ 、 $h_j(x)$ 为 R^n 的连续函数; m 与 l 为迭代点的数量。

模型计算时,先确定出辅助函数,表达式为

$$F_1(x, \sigma) = f(x) + \sigma \sum_{j=1}^l h_j^2(x) \quad (6)$$

式中, σ 为惩罚因子, 是一个很大的正数, 将其与点罚函数整合到一起后, 即可得到无约束问题, 表达式为

$$\min F_1(x, \sigma) \quad (7)$$

在辅助函数当中, 存在独有的约束条件, 即可行点辅助函数值与前一目标值相同时, 目标函数值与较大正数值、辅助函数值相近, 由此, 可构建出不等式约束问题函数, 表达式为^[5]

$$\min F_2(x, \sigma) = f(x) + \sigma \sum_{i=1}^m [\max\{0, -g_i(x)\}]^2 \quad (8)$$

若 x 为可行点, 则可以得到 $\max\{0, -g_i(x)\} = 0$; 反之, 若 x 并非可行点, 则可以得到 $\max\{0, -g_i(x)\} = -g_i(x)$, 由此, 可将式 (8) 转变成对应的无约束问题, 表达式为

$$\min F_2(x, \sigma) \quad (9)$$

将上述思路拓展后, 可得到一般情况下的外点罚函数, 表达式为

$$F(x, \sigma) = f(x) + \sigma P(x) \quad (10)$$

式中, $P(x)$ 表示连续函数, 计算公式为

$$P(x) = \sum_{i=1}^m \phi(g_i(x)) + \sum_{j=1}^m \Psi(h_j(x)) \quad (11)$$

式中, $\phi()$ 与 $\Psi()$ 表示连续函数, 表达式为

$$\begin{cases} \phi(y) = 0, & y \geq 0 \\ \phi(y) > 0, & y < 0 \\ \phi(y) = 0, & y = 0 \\ \phi(y) > 0, & y \neq 0 \end{cases} \quad (12)$$

两者可按照下述原理进行原则

$$\phi = [\max\{0, -g_i(x)\}]^\alpha \quad (13)$$

$$\Psi = |h_i(x)|^\beta \quad (14)$$

式中, α 、 β 均为 ≥ 1 的常数, 一般将两常数设置成 2。

将式 (12) 与式 (8) 整合到一起后, 可以得到最终的无约束问题, 表达式为

$$\min F(x, \sigma) = f(x) + \sigma P(x) \quad (15)$$

2. 外点罚函数计算流程

外点罚函数计算时, 主要流程为: ①在模型中设置初始点 $x^{(0)}$ 、惩罚因子 σ 、放大系数 c (> 1)、最大误差 ε (> 0) 等参数; ②将 $x^{(k-1)}$ 设置成为初始点, 并利用式 (13) 进行求解, 以此得到 k 点的目

标函数值 $x^{(k)}$; ③对 $\sigma_k P(x_k)$ 进行判断, 如果 $\sigma_k P(x_k) > \varepsilon$, 表明该点即为问题的极小点, 终止继续运算, 并将 $x^{(k-1)}$ 输出; 反之, 则令 $\sigma_{k+1} = c\sigma_k$, 并将 $k+1$, 重新对 $k+1$ 点的目标函数值进行计算。

3. 基于外点罚函数的配电网无功优化模型求解

根据配电网无功优化要求, 结合外点罚函数运算原理, 可确定出基于外点罚函数的配电网无功优化模型求解流程, 如图 1 所示。

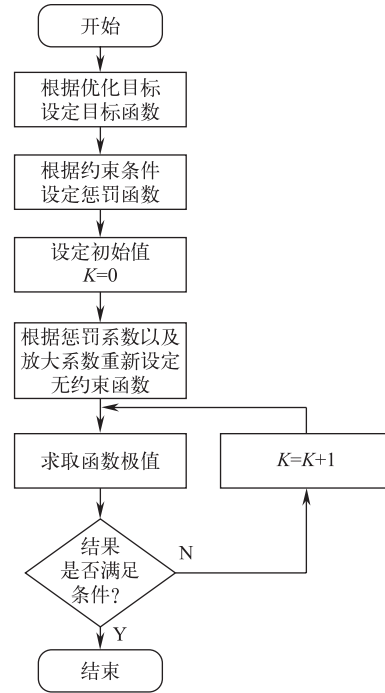


图1 基于外点罚函数的配电网无功优化模型求解流程图

1) 模型构建。按照式 (1)、式 (3)、式 (4) 构建出 SVG 设备布置优化的目标函数与约束条件, 并利用式 (2) 推导出各节点上的电压水平 V_{Dj} 。然后以此为基础, 构建出电压越限的惩罚函数, 表达式为

$$h(x) = \left(\sum_{j=1}^{N_D} \frac{V_j}{V_{j,\max} - V_{j,\min}} \right)^2 \quad (16)$$

式中, N_D 为全部节点的集合。

将式 (16) 带入到式 (1)、式 (3)、式 (4) 中, 可以得到整个配电网的优化数学模型, 表达式为

$$\begin{cases} \min f(Q_{Cj}) \\ h(x) = \left(\sum_{j=1}^{N_D} \frac{V_j}{V_{j,\max} - V_{j,\min}} \right)^2 \\ \text{st. } V_{Dj,\min} \leq h(Q_{Cj}) \leq V_{Dj,\max} \end{cases} \quad (17)$$

式中, j 为配电网中安装SVG设备节点数量; Q_{Cj} 为 j 节点处SVG设备的容量。

2) 根据外点罚函数原理, 对无功优化模型进行转换, 得到无约束条件的求解问题。通过转换后的函数模型为

$$\min f(Q_C) + \lambda h(Q_C) \quad (18)$$

式中, λ 为惩罚因子。

3) 按照外点罚函数相同的方式设置初始点 $Q_C(0)$ 、 λ 、 c 、 ε 等参数, 并利用式(18)推导出各点的最小值。

4) 当 $k=0$ 时, 如果 $h(Q_C^{(k)}) < \varepsilon$, 表明得到最优SVG设备布置方案, 终止继续运算, 并将结果 $Q_C^{(k)}$ 导出; 反之跳转到步骤2) 重新计算。

结束语

综上所述设计出一种基于外点罚函数的配电网无功优化方法, 该方法将安装SVG设备后配电网产生的线损作为目标函数, 将SVG设备容量与节点电压作为约束条件, 通过外点罚函数的计算后, 即可计算出最优的SVG布置方案。在提升配电网无功调

控效果的同时, 控制配电网改造成本, 对现代分布式光伏并网后的配电网改造具有重要意义。EA

(收稿日期: 2025-01-08)

参考文献

- [1] 王博, 严洋, 夏展鹏, 等. 含分布式光伏的配电网无功电压控制策略研究[J]. 四川电力技术, 2024, 47(3): 1-5.
- [2] 王迪生, 祁艳君. 考虑瞬时无功功率的分布式光伏并网谐波检测方法[J]. 电工技术, 2024(2): 83-86, 136.
- [3] 胡乃红, 李健. 适应大规模分布式光伏并网的无功电压控制方法[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2023, 25(6): 92-99.
- [4] 蔡永翔, 杨安黔, 付宇, 等. 面向分布式光伏并网和电能替代的低压配电网自适应控制[J]. 可再生能源, 2023, 41(10): 1343-1351.
- [5] 谢浩辉. 并网型分布式光伏系统电量计量和无功补偿的研究分析[J]. 电工技术, 2022(2): 18-19, 22.

(上接第45页)

结束语

通过设计运维作业风险预控系统, 能够有效识别、管理潜在风险, 从而降低故障发生的概率, 提高设备整体生产效率, 在系统架构方面构建层次分明的结构, 确保风险管理能够覆盖运维作业的各个环节, 技术框架强调系统的灵活性, 使其能够适应不同类型运维需求。风险评估模型部分, 结合故障树分析和回归模型, 前者识别主要故障模式及其因果关系, 后者则为故障发生时间的预测提供量化支持, 这种综合运用方式, 使得风险评估更加精准, 为决策提供数据基础。EA

(收稿日期: 2024-12-26)

参考文献

- [1] 陈新, 王林, 曾历. 水电站作业人员管控和风

险预控系统研发与应用[J]. 电工技术, 2020, (22): 153-155.

- [2] 李旭明, 张冬生, 文华宇, 高志云, 候华东. 水电厂运行值班风险分析及其预控措施探讨[J]. 电子世界, 2014, (15): 53.
- [3] 吴楷, 王创. 电厂信息系统监控平台设计[J]. 科技视界, 2020(19): 236-237.
- [4] 杨启超. 火力发电厂集控运维中的人机协作与人因工程优化[J]. 大众标准化, 2024(7): 116-118.
- [5] 李兵, 姜清辉, 杨鹏, 等. 火电厂智能化系统架构及智能监盘模型研究[J]. 工业控制计算机, 2024, 37(6): 125-126, 129.