

[无功电压]

含分布式电源的配电网无功电压优化方法

文/杨夏喜 魏兵兵
苏州市产品质量监督检验院

随着分布式电源渗透率的逐渐提高，其随机性、波动性造成电网的电压偏差，危害电网安全可靠运行，需要研究结合无功补偿装置及分布式电源调节特性的无功调控方案。将网损和电压偏差作为无功优化的目标函数，通过改进的粒子群算法，对含分布式电源的配电网无功电压进行优化。为检验优化的效果，使用IEEE33结点模型对优化方案进行检验。通过对比优化前后各时段的网损以及各节点电压幅值变化的大小，证明模型及算法的可行性和有效性。

在分布式电源渗透率逐渐提高的情况下，配电网从单源变为多源，其功率波动性影响到配电网的电能质量。分布式电源配电网无功电压优化对于提高配电网电能质量，促进分布式清洁能源高效消纳具有重要意义。

国内外研究人员对分布式电源并网对于电网电压和网损的影响的问题开展了大量研究。文献[1]的分布式电源配电网模型以有功网损为目标函数，用PSO算法进行无功优化；文献[2]使用逆变器对无功进行优化；文献[3]使用场景分析方法构建分布式电源出力及负荷的不确定性模型；文献[4]提出改进的粒子群算法，通过改变无功补偿装置的大小来优化电网的电能质量；文献[5]对于含分布式电源的配电网无功进行简略优化；文献[6]从安全性的角度出发，对电网的电压和功率进行优化；文献[7]着重分析分布式电源接入对于电压的影响，并提出解决方案；文献[8]提出一种基于改进元胞差分算法的含分布式电源配电网无功电压优化方法；文献[9]结合分布式电源的有功和无功进行优化，使用双层分区电压调节策略；文献[10]分析无功补偿装置的安装位置和容量；文献[11]分析并强调进行电压无功控制的

必要性，指出了九宫图或扩展九宫图的电压无功控制策略进行分析的弊端；文献[12]制定衡量分布式电源并网对电压的影响程度的指标。

本文从潮流和电压两个方面分析分布式电源接入对配电网产生的影响。构建多目标优化的目标函数和约束条件，基于改进粒子群优化方法实现含分布式电源的配电网无功电压优化。最后，对优化方案进行算例验证。结果表明，相较于未优化之前，系统的电压明显更加稳定，系统的网损明显减小，展示了本文方案的可行性和有效性。

分布式电源接入对配电网电压的影响

电压偏差是指电力系统中节点电压与额定电压之间的偏差。电压偏差可能会导致设备运行出现故障，控制电压偏差对于系统的安全可靠运行至关重要。分布式电源的接入将传统单源电网变成多源电网，给配电网电压调节带来巨大的挑战。

在分布式电源并网以前，系统节点与节点间电压降为

$$U_1 - U_2 \approx \Delta U = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} \quad (1)$$

假设分布式电源接入的电网系统有 n 个节点，在第 m 个节点上的负荷为 P_m+jQ_m ，则节点 m 到根节点的电压降为

$$\Delta U_m = \sum_{i=1}^n \frac{R_m \sum_{i=m}^n (P_i - P_{GN,i}) + X_m \sum_{i=m}^n (Q_i - Q_{GN,i})}{U_m} \quad (2)$$

式中， $P_{GN,i}$ 为第 i 个节点接入的分布式电源输出的有功功率； $Q_{GN,i}$ 为第 i 个节点接入的分布式电源输出的无功功率。

则系统中的电压偏差为

$$\Delta U = \frac{U - U_N}{U} \times 100\% \quad (3)$$

式中， U_N 为系统的额定电压。

为衡量节点安全运行的电压，本文提出节点电压安全运行指标 S_u ，电压安全运行的基准选用国家标准给定的偏差数据，以此计算每个节点电压的安全程度，为分布式电源无功调节提供数据支撑，计算公式为

$$S_u = \left| \frac{U - U_N}{U_s} \right| \quad (4)$$

式中， U 为节点电压的实际电压值，V； U_s 为国家标准规定的不同电压等级下的电压基准值。

由以上公式可知，当节点电压符合国家标准时， S_u 的变化范围为 $[0,1]$ ；当节点电压不符合国家标准时， S_u 的变化范围为 $(1,\infty)$ 。

含分布式电源的配电网无功电压优化方法设计

1. 改进粒子群优化算法

粒子群算法存在对参数的选择敏感、易陷入局部最优等问题，特别用于计算多维和多峰值函数，这种缺点将会更为明显。因此，需要对粒子群算法进行优化。引入惯性权重 ω ，可以避免之前的结果对于后续的优化产生过大影响，有效解决粒子群算法对参数的选择敏感、易陷入局部最优等问题。惯性权重 ω 的计算公式为

$$\omega = \frac{\omega_{\max} - k(\omega_{\max} - \omega_{\min})}{k_{\max}} \quad (5)$$

式中， ω 为惯性权重，一般取 $\omega_{\max}$ 为0.9， $\omega_{\min}$ 为0.4； $k_{\max}$ 为最大迭代次数； k 为当前迭代次数。

改进后的粒子群算法计算公式为

$$\begin{aligned} v_i^{(k+1)} &= \omega v_i^{(k)} + c_1 r_1 (pbest_i - x_i^{(k)}) + c_2 r_2 (gbest_i - x_i^{(k)}) \\ x_i^{(k+1)} &= x_i^{(k)} + v_i^{(k+1)} \end{aligned} \quad (6)$$

设计优化模型的目标函数和约束条件，采用改进粒子群算法优化分布式电源接入的配电网的无功电压开展优化。

2. 目标函数

本文选取两个指标作为目标函数：网损和电压偏差。而要将节点电压与无功补偿联系起来，就需要找到节点电压和无功分布的关联函数。根据欧姆定律，只须知道各节点之间线路的参数（电阻、电抗、电导、电纳）以及流过各节点的电流，就可求出节点的电压。欧姆定律的计算公式为

$$I = YU \quad (7)$$

式中， I 为流入节点电流的列向量，即 $[I_1, I_2, \dots, I_n]^T$ ； U 为各节点之间电压的列向量，即 $[U_1, U_2, \dots, U_n]^T$ ； Y 为系统的导纳矩阵，即

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1,p} & Y_{1,p+1} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & \dots & Y_{2,p} & Y_{2,p+1} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{p1} & \dots & Y_{p,p} & Y_{p,p+1} & \dots & Y_{pn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{n,p} & Y_{n,p+1} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中， Y_{ii} 为第 i 个节点的自导纳； Y_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的互导纳。

通过上述分析，分布式电源自身出力的不确定性和无功补偿装置都会影响节点电压。分布式电源并网点的电压波动为

$$d = \frac{\Delta u}{U} = \frac{\Delta S_{GN}}{S_k} \left| \cos(\phi + \theta) \right| \times 100\% \quad (9)$$

无功装置对于电压的影响为

$$\tilde{S}_i = \dot{U}_i \left(\sum_{j \in N} Y_{ij} \dot{U}_j \right)^* \quad (10)$$

式中， $\tilde{S}_i$ 为节点 i 的复功率。

为了方便控制，本文选取众多节点中的平衡节点进行控制，从而控制整个电力网络电压都保持在正常范围内。平衡节点的选取原则为其所在线路满足下列条件

$$\frac{\partial U_b}{\partial Q_b} = 0 \quad (11)$$

式中， U_b 为满足平衡节点的电压值； Q_b 为满足平衡节点的节点所注入的无功功率。

复功率的计算公式为

$$\tilde{S} = P + jQ \quad (12)$$

结合平衡节点的选取原则，节点的电压偏差与

节点的无功功率变化量之间的关系为

$$j1_{(i=b)} = \frac{\partial \Delta U_b}{\partial \Delta Q_b} \sum_b Y_{ij} U_j + U_j \sum_{j \in N} Y_{ij} \frac{\partial \Delta U_j}{\partial \Delta Q_j} \quad (13)$$

式中, ΔU_b 为平衡节点的电压的偏差量; ΔQ_b 为平衡节点的无功功率的变化值; ΔU_j 为除了平衡节点外其他节点的电压的偏差量; ΔQ_j 为除平衡节点外其他节点的无功功率的变化值。

当节点的电压在正常范围内时, 其结果为零; 当节点的电压不在正常范围内时, 其结果为 $j1$ 。

目标函数为

$$F = \min \left\{ P_{\text{loss}} + \lambda \sum_{i=1}^N \left(\frac{\Delta U_i}{U_{i\max} - U_{i\min}} \right)^2 \right\} \quad (14)$$

$$\Delta U_i = \begin{cases} U_i - U_{i\max} & U_i > U_{i\max} \\ 0 & U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \\ U_{i\min} - U_i & U_i \leq U_{i\min} \end{cases}$$

式中, P_{loss} 为电力系统中的有功网损; λ 为不同节点所采用的惩罚系数; N 为节点的数目。

3. 约束条件

本文采用的约束条件主要有节点的有功功率和节点的无功功率以及节点的电压。约束方程为

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{Gi} - Q_{Li} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ 0 \leq P_{Gi} \leq P_{Gi\max} \\ 0 \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi\max} \\ U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中, P_{Gi} 和 Q_{Gi} 分别为在节点 i 处分布式电源的有功出力和无功出力; P_{Li} 和 Q_{Li} 分别为在节点 i 处负荷的有功消耗和无功消耗; G_{ij} 为节点 i 到节点 j 之间线路的电导; B_{ij} 为节点 i 到节点 j 之间线路的电纳; θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 电压的相角差。

基于IEEE33的算例分析

IEEE33标准模型描述了一个包含33个节点的简化配电系统, 其包括发电机、变压器、输电线路、配电线路和负载等。这些节点之间通过导线连接, 构成了一个电力系统。本文使用IEEE33标准模型来进行算例分析, 如图1所示。

在原有系统的基础上在10、17节点接入分布式电源, 在7、31节点接入无功补偿装置SVC。本文研究

一天内分布式电源的出力情况和无功补偿装置SVC的出力情况。无功补偿装置SVC出力如图2所示。

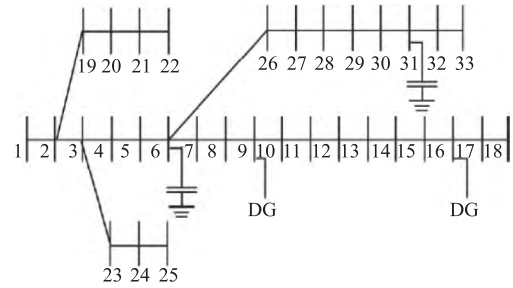


图1 含分布式电源的IEEE33节点算例

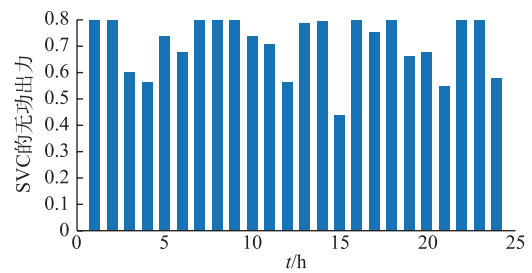


图2 无功补偿装置SVC出力

知晓了分布式电源出力和无功补偿装置SVC出力后, 通过优化后的粒子群算法对该系统进行无功优化, 通过对比优化前后各节点电压和各个时段的网损来检验无功优化的效果。参数设置: 粒子数设为30; 迭代次数设为200; 粒子的维数为4维; 自适应权重的上限设为0.9, 自适应权重的下限设为0.4; 个体学习因子和群体学习因子都设为2。优化前后的系统节点电压如图3所示。

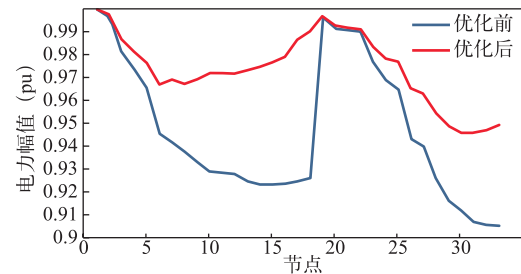


图3 优化前后的系统节点电压

由图3可以看出无功优化对于本电力系统的电压质量有所提升。为更加严谨地描述无功优化对于本电力系统的电压质量提升的效果, 本文决定使用优化前后的系统节点电压方差这一指标来衡量无功优化对于本电力系统的电压质量提升的效果。方差反映了一组数据的离散程度或波动的大小。当方差较大

时,表明数据偏离平均数的程度较大,波动较大,即数据较为不稳定;反之,当方差较小时,表明这组数据分布比较集中,各数据偏离平均数的程度较小,即波动较小,数据较为稳定。方差的计算公式为

$$\sigma^2 = \frac{\sum (X - \mu)^2}{N} \quad (16)$$

式中, σ^2 为方差; X 为变量; μ 为总体的均值; N 为总体的个数。

经计算,优化前的系统节点电压方差为 0.002 239 91,优化后的系统节点电压方差为 0.000 643 314,优化后的方差小于优化前的方差,证明优化后系统节点电压分布比较集中,偏离平均数的程度较小,即波动较小,较为稳定。优化前后的系统网损如图4所示。

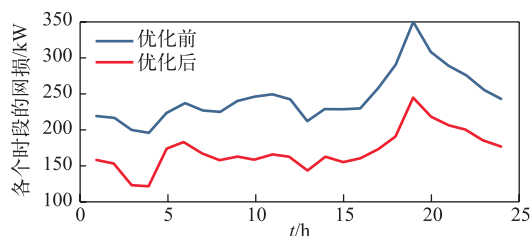


图4 优化前后的系统网损

由数据和图4可以看出,优化前的网损总和为 5 864.190 5 kW;优化后的网损总和为 4 074.603 97 kW。说明加入分布式电源和SVC,使用改进的粒子群算法后系统的网损有明显下降,说明改进的粒子群算法对系统的无功优化有效。

结束语

分布式电源接入会对配电网安全稳定运行带来巨大的挑战。本文使用分布式电源与无功补偿装置 SVC 相结合的方法,配以优化的粒子群算法,对含分布式配电网的电力系统进行优化。以电压偏差最小和网损最小为目标函数,以节点的有功功率和节点的无功功率以及节点的电压为约束条件,建立含分布式电源的配电网的无功优化模型。基于 IEEE33 节点模型对优化算法进行检验,结果表明使用该算法的电力系统节点电压相较于未优化之前波动较小,较为稳定;系统的网损相较于未优化之前有明显下降。说明优化的粒子群算法对于电网稳定经济运行有积极作用。EA

(收稿日期: 2024-11-12)

参考文献

- [1] 杨洁霞. 基于PSO算法的含分布式电源的配电网无功优化[J]. 太原学院学报(自然科学版), 2023, 41(3): 59-64.
- [2] 姚艳, 高飞翎, 周子旺. 基于改进蝙蝠算法的含分布式电源配电网无功优化[J]. 电气传动, 2023, 53(6): 46-52.
- [3] 郑玉焱. 基于场景分析的含分布式电源配电网无功优化研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2023.
- [4] 薛贤方. 基于改进粒子群算法的分布式电源配电网无功优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- [5] 王杰. 含分布式电源的配电网功率协调优化研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
- [6] 史可鉴, 李胜川, 朱义东等. 考虑电压稳定性与分布式电源接入的低压配电网无功优化研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2022, 36(2): 80-85.
- [7] 张诗建. 分布式电源接入的配电网无功电压特性分析[J]. 大众用电, 2021, 36(8): 32.
- [8] 周立, 王杰, 谢磊等. 含分布式电源的配电网多目标无功优化[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2022, 34(5): 818-827.
- [9] 郑晓莹. 面向光伏高渗透配电网的电压分区优化控制策略研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
- [10] 路怡. 含光伏电源配电网的无功优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [11] 杨博宇. 含分布式电源配电网电压无功优化控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [12] 李允昭, 黄净, 柏青等. 分布式电源接入对配电网电压影响分析及其无功优化[J]. 电子设计工程, 2019, 27(24): 135-139.
- [13] 李超, 赵志刚, 王亮等. 含分布式发电的配电网无功电压优化的研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2019, 15(1): 78-81+92.
- [14] 鲁裕婷, 赵天乐, 都洪基等. 基于改进粒子群算法的含DG配电网无功优化[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 69-74.