

一种含分布式电源的配电网线损优化方法

文/贵州大学电气工程学院 宁志泉 王兴龙

在处理分布式电源的选址和定容问题时,近年来,许多学者和专家对配电网中分布式电源的选址和定容提出了多种多样的解决方法。这些解决方法大致可分为基于种群的优化算法或启发式算法、分析法等。基于种群的优化算法包括遗传算法、人工蜂群算法、粒子群算法和进化规划算法等。这些算法广泛应用在运行与规划研究中,并且获得了比较理想的效果。通过分析法来处理分布式电源的选址和定容问题引发了许多学者和专家极大的兴趣,此类方法是以配电网系统降损和电压分布的改善为目标函数。但是分析法绝大多数都是利用某节点电压幅值、相角和流入此节点的有功、无功有关的高度非线性线损公式。其最主要的缺点是在每一次计算时都要更新功率损耗系数,这是一个高度非线性的复杂函数计算过程。使用非线性方法,一方面,虽然能够给出较高的计算精度,但是需进行大量的计算并且占用较大的存储空间。另一方面,由于配电系统有着线路阻抗比较大的特点,会使得潮流计算很可能会出现不收敛的情况。因此,本文研究的方法将解决潮流收敛性问题,使潮流计算快速可靠并且能够快速处理以线损最优为目标的分布式电

源配置问题。

含分布式电源的配电网线损优化方法

分布式电源的选址和定容的问题本质上是复杂的非线性混合约束优化问题。对解决这类优化问题的快速性、内存需求和程序编写来说,非线性优化方法是一项非常繁琐的工作:各个量之间复杂的关系、配电系统存在的大量电气元件无疑增加了问题的复杂性。因此,为配电系统规划和运行研究运用更加快速方便的方法是非常有必要的,本文基于传统潮流模型研究了一种改进线性潮流模型,与线性规划方法结合形成了一种含分布式电源的配电网线损优化方法。

1. 传统潮流模型

电力系统潮流需考虑每个节点上的四个变量,考虑简单的电能传输线路如图1所示,在节点 k 上,考虑的变量包括注入有功功率 P_k ,注入无功功率 Q_k ,电压幅值 V_k ,电压相角 δ_k ,由潮流计算可以得到有功潮流、无功潮流,线损和各个节点上的电压和相角。流入节点 k 的电流 I_k 通过式(1)计算得出

$$I_k = \sum_{m \in \Psi_k} Y_{km} E_m \quad (1)$$

式中, Ψ_k 是与节点 k 相连节点的集合, E_m 是节点电压矢量, Y_{km} 是系统的节点导纳矩阵。

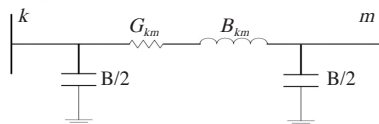


图1 简单电能传输线路

输入节点 k 的有功功率和无功率率能表示为

$$P_k = V_k \sum_{m \in \Psi_k} V_m (G_{km} \cos \delta_{km} + B_{km} \sin \delta_{km}) \quad (2)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in \Psi_k} V_m (G_{km} \sin \delta_{km} - B_{km} \cos \delta_{km}) \quad (3)$$

由于潮流方程中存在非线性项,则在潮流方程迭代过程中可能会出现不收敛的情况。

2. 基于传统交流潮流模型改进的线性潮流模型

式(2)和式(3)得出了输入节点 k 的有功功率和无功率率,节点电压保持在标幺值1.0附近,与额定值相差一般不能超过 ± 5 。因此节点 k 和节点 m 的电压幅值能分别表示为

$$V_k = 1.0 \pm \varepsilon_k, V_m = 1.0 \pm \varepsilon_m \quad (4)$$

对节点 k 处的输入功率作近似处理,则忽略 V_k 中很小的部分 ε_k 。但是,这样的处理并不是假设电压大小为标幺值1.0。则式(2)和(3)能表示为

$$P_k \approx V_m \sum_{m \in \Psi_k} V_m (G_{km} \cos \delta_{km} + B_{km} \sin \delta_{km}) \quad (5)$$

$$P_k \approx V_m \sum_{m \in \Psi_k} V_m (G_{km} \cos \delta_{km} + B_{km} \sin \delta_{km}) \quad (6)$$

此外, 假设节点 k 和节点 m 之间电压相角差较小, 则正弦余弦的泰勒展开式有

$$\sin \delta_{km} = \delta_{km} - \frac{\delta_{km}^3}{3} + \frac{\delta_{km}^5}{5} - L \\ + (-1)^{n-1} \frac{\delta_{km}^{2n-1}}{(2n-1)} + R_n(\delta_{km}) \quad (7)$$

$$\cos \delta_{km} = 1 - \frac{\delta_{km}^2}{2} + \frac{\delta_{km}^4}{4} - L \\ + (-1)^n \frac{\delta_{km}^{2n}}{2n} + R_n(\delta_{km}) \quad (8)$$

由于 δ_{km} 很小, 则由正弦余弦的泰勒展开式可得: $\sin \delta_{km} \approx \delta_{km}$, $\cos \delta_{km} \approx 1$ 。则式(5)和(6)能表示为

$$P_k \approx \sum_{m \in \Psi_k} (V_m G_{km} + V_m B_{km} \delta_{km}) \quad (9)$$

$$Q_k \approx \sum_{m \in \Psi_k} (V_m G_{km} \delta_{km} - V_m B_{km}) \quad (10)$$

如前面所述, 作进一步逼近, 将式(9)中第二部分中 V_m 约等于标么值1.0, 则可变为

$$P_k \approx \sum_{m \in \Psi_k} (V_m G_{km} + B_{km} \delta_{km}) \quad (11)$$

式(11)展开表示为

$$P_k \approx \sum_{m \in \Psi_k} V_m G_{km} + \sum_{m \in \Psi_k} B_{km} (\delta_k - \delta_m) \quad (12)$$

式(12)能进一步分解为两部分

$$P_k \approx P_{kp} + P_{kq} \quad (13)$$

其中

$$P_{kp} = \sum_{m \in \Psi_k} V_m G_{km} \quad (14)$$

$$P_{kq} = \sum_{m \in \Psi_k} B_{km} \delta_k - \sum_{m \in \Psi_k} B_{km} \delta_m \quad (15)$$

而公式中

$$B_{km} = \begin{cases} \sum b_{km} + b_{kk} & \text{如果 } m=k \\ -b_{km} & \text{如果 } m \neq k \end{cases} \quad (16)$$

式中, b_{kk} 是与节点 k 所连线路的总电纳, 由式(16)能容易得到 $m \in \Psi_k$ 范围内总导纳的计算公式

$$\sum_{m \in \Psi_k} B_{km} = -b_{k1} - b_{k2} - K + \left(\sum_{m \in \Psi_k} B_{km} + b_{kk} \right) - K - b_{kn} = b_{kk} \quad (17)$$

因此, 式(15)能表示为

$$P_{kq} = -\sum_{m \neq k} B_{km} \delta_m - (B_{kk} - b_{kk}) \delta_k \quad (18)$$

则公式(18)能表示为

$$P_k \approx -\sum_{m \neq \Psi_k} V_m G_{km} - \sum_{m \neq k} B_{km} \delta_m - (B_{kk} - b_{kk}) \delta_k \quad (19)$$

无功功率方程表示为

$$Q_k \approx -\sum_{m \neq \Psi_k} V_m G_{km} + \sum_{m \neq \Psi_k} G_{km} (\delta_k - \delta_m) \quad (20)$$

将公式(20)以与有功功率方程类似的形式, 可以进一步分解为

$$Q_k \approx Q_{kp} + Q_{kq} \quad (21)$$

其中

$$Q_{kp} = -\sum_{m \in \Psi_k} Y_m E_{km} \quad (22)$$

$$Q_{kq} = -\sum_{m \in \Psi_k} G_{km} (\delta_k - \delta_m) \quad (23)$$

那么, 可以得到 Q_{kq} 为

$$Q_{kq} = -\sum_{m \in \Psi_k} G_{km} \delta_m - (G_{kk} - g_{kk}) \delta_k \quad (24)$$

式中

$$G_{km} = \begin{cases} \sum g_{km} + g_{kk} & \text{如果 } m=k \\ -g_{km} & \text{如果 } m \neq k \end{cases} \quad (25)$$

式中, g_{kk} 是与节点 k 并联线路的总电导, 由公式(25)能容易得到 $m \in \Psi_k$ 范围内总导纳的计算公式

所以, 公式(24)能表示为

$$Q_k \approx -\sum_{m \in \Psi_k} V_m B_{km} - \sum_{m \in \Psi_k} G_{km} \delta_m - (G_{kk} - g_{kk}) \delta_k \quad (26)$$

则所提出的线性交流潮流模型

通过矩阵形式能表示为

$$\begin{bmatrix} P_k \\ Q_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B' & G \\ -G' & -B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_k \\ V_k \end{bmatrix} \quad (27)$$

式(27)中 B' 是修正的电纳矩阵, G' 是修正的电导矩阵, B 是电纳矩阵, G 是电导矩阵。这些在所提出的潮流计算中的矩阵分别定义如下

$$B' = \begin{bmatrix} (B_{11} - b_{11}) & B_{12} & L & B_{1n} \\ B_{21} & (B_{22} - b_{22}) & L & B_{2n} \\ M & M & O & M \\ B_{n1} & B_{n2} & L & (B_{nn} - b_{nn}) \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$G' = \begin{bmatrix} (G_{11} - g_{11}) & G_{12} & L & G_{1n} \\ G_{21} & (G_{22} - g_{22}) & L & G_{2n} \\ M & M & O & M \\ G_{n1} & G_{n2} & L & (G_{nn} - g_{nn}) \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & L & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & L & G_{2n} \\ M & M & O & M \\ G_{n1} & G_{n2} & L & G_{nn} \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$B' = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & L & B_{1n} \\ B_{21} & B_{22} & L & B_{2n} \\ M & M & O & M \\ B_{n1} & B_{n2} & L & B_{nn} \end{bmatrix} \quad (31)$$

3. 模型验证

(1) 案例介绍

此案例研究中考考虑的测试系统是一个33节点中压配电网。33节点系统单线图如图2所示, 总的有功和无功负荷分别为3 715 kW和2 300 kVar。基准电压是12.66 kV, 基准功率选择100 kV·A。

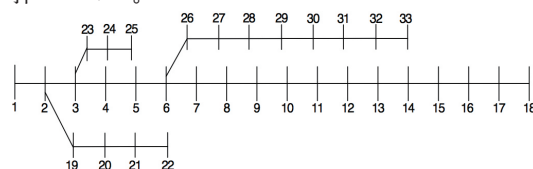


图2 33节点配电系统单线图

(2) 测试结果

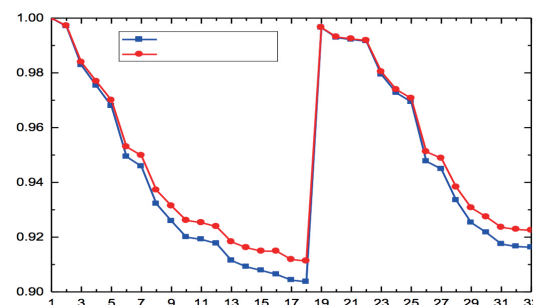


图3 IEEE33线性潮流模型和传统潮流模型电压分布

由图3得出, 研究的线性交流潮流模型在所有的节点上得到的电压与传统交流潮流模型所有节点上的电压的误差小于1%。利用该模型得出的节点最大电压误差位于16节点, 为0.938%。线性交流潮流模型在IEEE33节点系统的总有功损耗为181.63 kW, 传统潮流模型在IEEE33节点系统的总有功损耗为202.27 kW。

综上所述, 模型在理论上可以满足潮流计算需求。虽然在精度上可能存在一定的差别, 但是对于快速获得以线损优化为目标的分布式电源配置问题中有着重要的意义。

4. 优化方法的提出

针对非线性方法在处理需进行大量计算的电力系统优化问题处理速度慢, 占用内存多的缺点, 本文结合线性潮流模型和线性规划提出的优化方法如下:

本文中设立的目标函数为

$$P_{total-loss} = \min \left(\sum_{i=1}^{N_b} P_i \right) \quad (32)$$

约束条件:

1) 有功和无功平衡约束

$$\begin{aligned} B'\delta - GV + P_G &= P_D \\ G'\delta + BV + Q_G &= Q_D \end{aligned} \quad (33)$$

2) 电压范围约束

$$|V_k^{\min}| \leq |V_k| \leq |V_k^{\max}| \quad (34)$$

3) 分布式电源容量约束

$$S_{DG}^{\min} \leq S_{DG} \leq S_{DG}^{\max} \quad (35)$$

4) 相关变量

(1) 分布式电源的渗透水平

$$\text{渗透水平} = \frac{S_{DG}}{S_{TD}} \times 100\% \quad (36)$$

公式(36)中, S_{DG} 和 S_{TD} 分别代表分布式发电机组的输出功率和系统的总需求功率。

(2) 初始最优位置选择:

引入有功功率损耗灵敏度系数 λ_p 用于决定分布式发电源的初始最佳位置使得有功功率损耗最少。为了确定灵敏度系数 λ_p , 考虑如图4所示的简单辐射状配电网馈线, 则线路有功功率损耗可以表示为

$$P_{loss} = \frac{(P_{LK,eff}^2 + Q_{LK,eff}^2)}{|V_k|^2} \times R_k \quad (37)$$

公式(37)中 $P_{LK,eff}$ 和 $Q_{LK,eff}$ 是节点 k 端总的有功和无功负荷。

有功网损灵敏度系数 λ_p 表示为

$$\lambda_p = \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_{LK,eff}} = \frac{2P_{LK,eff}}{|V_k|^2} \times R_k \quad (38)$$

分布式电源最优选址和容量对电力系统损耗的影响, 如图4所示损耗灵敏度系数在某些情况下的关于分布式电源最优选址和容量对电力系统损耗的影响的曲线图。图中实

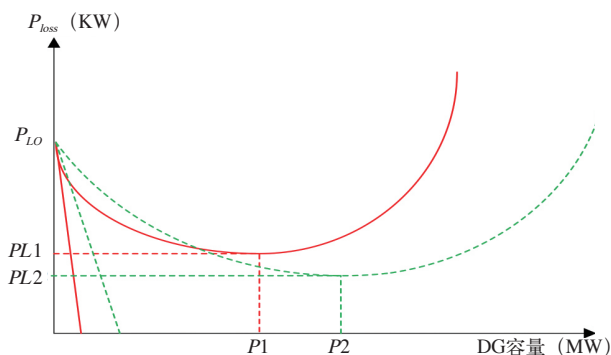


图4 线损非线性曲线

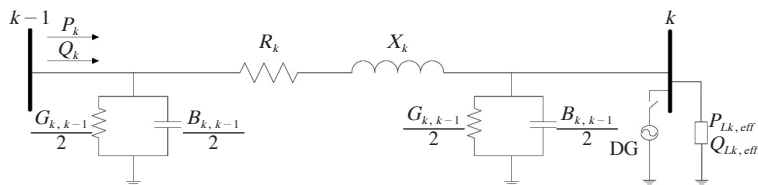


图5 简单辐射状配电馈线

线代表在初始运行条件下具有最高的损耗灵敏度系数, 当两曲线在最优容量下获得的最低损耗 $PL1 > PL2$, 它表明如果不考虑其他位置, 灵敏度因子可能不会给出最优的结果, 因此, 候选位置的优先级列表是获得最优解的前提条件。

使用公式38计算所有节点的有功功率损耗灵敏度系数, 然后计算值都以降序方式被排列在一个优先级列表中, 将有功功率损耗灵敏度系数高的节点作为优先考虑分布式电源接入的位置。

(3) 初始最优容量选择:

要确定以线损优化为目标的候选分布式发电机组最优容量, 首先考虑图5描述的配电馈线。

如图5所示, 将有功为 P_{DG} 和无功为 Q_{DG} 的分布式电源放置在系统中任意一个节点 k 处。分布式电源接入前, 配电系统中节点 $k-1$ 与节点之间线路上的有功损耗计算如公式(37), 从而有

$$P_L = \frac{P_{LK,eff}^2 + Q_{LK,eff}^2}{|V_k|^2} \times R_k \quad (39)$$

当分布式电源在节点 k 处接入以后, 配电系统中节点 k 与节点 $k-1$ 之

间线路上的有功损耗计算被表示为

$$\begin{aligned} P_L^+ &= \frac{P_{DG}^2 - 2P_{DG}P_{LK,eff} + P_{LK,eff}^2}{|V_k|^2} \times R_k \\ &+ \frac{Q_{DG}^2 - 2Q_{DG}Q_{LK,eff} + Q_{LK,eff}^2}{|V_k|^2} \times R_k \end{aligned} \quad (40)$$

则分布式电源接入前后在节点 k 上功率损耗的变化为

$$\Delta P_L = P_L^+ - P_L^- \quad (41)$$

将其展开可以得到

$$\Delta P_L = \left[\frac{P_{DG}^2 - 2P_{DG}P_{LK,eff} + Q_{LK,eff}^2 - 2Q_{DG}Q_{LK,eff}}{|V_k|^2} \right] \times R_k \quad (42)$$

为了使节点 $k-1$ 至节点 k 馈线之间有功功率损耗最小, 则

$$\frac{\partial \Delta P_L}{\partial P_{DG}} = 0 \quad (43)$$

接入的分布式电源最优容量可以表示为

$$S_{DG} = \sqrt{P_{DG}^2 + Q_{DG}^2} \quad (44)$$

公式(42)求偏导数后进行整理而分布式电源的初始最佳有功功率能表示为

$$P_{DG} = \frac{P_{LK,eff} + \alpha Q_{LK,eff}}{1 + \alpha^2} \quad (45)$$

分布式电源的最佳无功功率能表示为

$$Q_{DG} = \frac{P_{LK,eff} + \alpha Q_{LK,eff}}{\alpha + \beta} \quad (46)$$

在上述公式中, α 和 β 分别表示为

$$\alpha = \tan \theta = \frac{Q_{DG}}{P_{DG}} \quad (47)$$

$$\beta = \cot \theta = \frac{P_{DG}}{Q_{DG}} \quad (48)$$

式 (47) 和 (48) 中, θ 是将接入的分布式电源的功率因数角。

(3) 最优功率因数选择:

分布式电源的最佳功率因数被设定为与分布式电源所接入节点的下游总负荷的滞后功率因数。如果将分布式电源接入在图5所示节点 k 上时, 此分布式电源的功率因数 α_{DG} 大小计算表达式为

$$\alpha_{DG} = \frac{P_{LF,eff}}{\sqrt{P_{LF,eff}^2 + Q_{LF,eff}^2}} \quad (49)$$

案例分析

利用本文提出的分析方法通过线性潮流模型计算初始潮流, 通过公式 (38) 对每个节点基于线路有功损耗进行灵敏度分析, 获得每个节点的损耗灵敏度系数 λ_p , 通过获得的损耗灵敏度系数来决定候选分布式电源的优先接入位置, 当然由灵敏度系数获得的优先接入位置并不一定是最优解, 可通过选取灵敏度系数较高的几个接入位置进行寻优。

通过寻优求解, 分布式电源接入的最优位置在节点6处。由前文对于分布式电源的最佳功率因数的

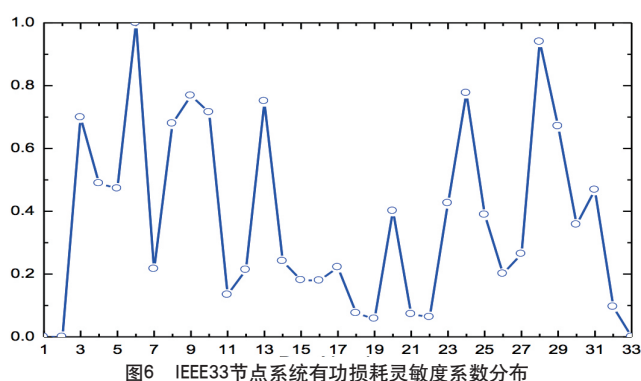


图6 IEEE33节点系统有功损耗灵敏度系数分布

表 IEEE33节点配电系统测试结果

	提出方法	穷举方法
最优位置	6	6
最佳容量/kV·A	2 475	2 473
功率损耗/kW	75.93	75.82
损耗降低率/%	62.54	62.72
耗费时间/ms	50.16	287.65

论述可知, 其值与节点6处下游负荷的功率因数大小相等, 通过公式

(49) 计算得出其值为滞后的功率因数0.8906。本文研究的是有功功率损耗最小, 假设分布式电源的渗透率范围为15%~60%, 通过公式 (44) 到 (48) 计算出分布式电源的初始最佳容量, 在渗透率范围内以初始最佳容量为基础逐步改变其大小获得最优解。

由案例测试得出, 与穷举方法相比, 获得的结果可认为一致, 而本文所研究的分析方法只需较少的计算量就能寻求全局最优解或接近于全局最优解, 适用于配电系统最

优规划与运行研究中。

结束语

本文以配电网线损优化为目标, 通过接入分布式电源来降低线损, 由此引出分布式电源最优选址和定容问题。研究的线性潮流模型与线性规划结合的优化方法, 考虑了多种实际约束条件, 设置了减少寻优计算次数的初始最优解。本文研究的线性潮流模型, 不需要进行迭代, 即使在具有高R/X比的病态系统中, 也不会遇到收敛性问题, 这种方法适用于需要大量计算的最优分布式电源选址和定容问题的研究。EA

(上接第57页)

表2 微网可孤岛概率

	微网a (微网a')		微网b (微网b')	
	负荷需求量/MW	可孤岛概率(-)	负荷需求量/MW	可孤岛概率(-)
方案I	0.51	0.1385	0.54	2.2831e-004
方案II	0.36	0.2429	0.69	2.2831e-004

表3 微电源及电源根节点实际出力

	MS1		MS3		主网电源根节点		孤岛运行微网MS2	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
方案I	0.2	0.15	0.4	0.3	3.47	2.34	0.51	0.19
方案II	0.2	0.15	0.4	0.3	3.63	2.43	0.36	0.12

表4 主网系统可靠性评估指标

主网可靠性指标S	AIFI / (次/a)	SAIDI / (h/a)	CAIDI / (h/a)	ASAI/%	EENS / (MW·h/a)
方案I	0.3632	1.8898	5.2029	99.978	7.1797
方案II	0.3582	1.8443	5.1483	99.978	7.2209

荷转移后, 网架结构较优; 选择的线路普遍长度较短, 故障率不高。

结束语

本文以风电为例, 分析了新能源接入电网中需考虑其可靠性的实用性能分析, 并对其相应的定量评估, 同时还对新能源的引入可能造成的影响展开相应的探究, 并构建出相应的评估体系, 并通过案例分析对配置方案进行了比较评价, 选出了较优的方案。EA