

一种计及分布式电源的配电网潮流算法研究

分布式电源接入配电网之后,使得原有的配电系统由辐射状网络变为高度交叉联结的遍布电源和用户互联的网络,针对这种混杂配电网的特点,介绍了一种基于前推回代算法和牛顿-拉夫逊算法的配电网模型潮流计算方法,并提出了改进的PZ节点法,分析解决了分布式电源带来的电力系统潮流计算负荷不确定的问题。首先,针对配电网模型进行收敛性分析,然后考虑了分布式发电对潮流计算的影响,最后通过对通辽地区变电所的无功配置方案进行研究,验证了该改进方法在分布式电源接入配电网后进行潮流计算的优越性。

贾学涵 杨东升/东北大学电气自动化研究所 孙 羽/中航工业沈阳发动机设计研究所 李珂珂/中航光电科技股份有限公司

0 引言

相对于集中发电的电力系统存在的不足之处,分布式发电成为新能源技术发展的趋势。但对于含有分布式电源的配电网,其负荷的不确定性会增加,配电网的潮流大小及方向也会不确定地改变,这样会较大地影响潮流计算^[1],局限现有的基本潮流计算方法,使得不能对电力系统进行精确的潮流计算。基于基本的潮流计算方法,提出了一种基于前推回代算法^[2]和牛顿-拉夫逊算法^[3]的配电网潮流计算方法。

将大规模的电力系统模型解耦为小系统进行计算是配电网潮流计算的核心思想。解耦后简化的电力系统模型包含了辐射状网络和环式网络,前者采用基本的前推回代算法,后者采用牛顿-拉夫逊算法进行计算。需要重点指出的是,解耦后的小系统的连接是通过电压

分级点^[4]来实现的,这就涉及到节点类型的转换,因此这种计算方法不同于传统的单一的配电网潮流计算或发输电网潮流计算。配电网模型是以大系统为计算对象,解耦以后得到若干不同类型的小系统,并且每个小系统都有基于本系统的收敛性判据,因此只有在所有小系统都收敛,并且全局系统也收敛的情况下,才能判定配电网模型的潮流计算收敛^[5]。

应用此潮流计算方法,对含分布式电源的配电网进行分析,可以得出此法的优越性和实用性。

1 简化的配电网模型

图1为一个简化的配电网潮流计算的模型。图1中,G为发电机、 T_1 、 T_2 和 T_3 为同一等级的变压器, t_1 、 t_2 和 t_3 为下一等级的变压器,A、 $B_1 \sim B_6$ 和 $C_1 \sim C_6$ 为母线, T_1 、 T_2 和 T_3 组成的网络是环式网络, T_1 又与 t_1 、 t_2 和 t_3 组成了辐射状网络。其中,点A是连接环网和辐射网的分级点,在环网中A是负荷节点,即PQ节点,在辐射网中A为电源平衡点,即U θ 节点。由图1可知,配电网的特点是,虽然配电网包含环网和辐射状网的两种结构,但是它们是通过分级点而不是通过支路相连的,这样就给配电网潮流计算提供了一定的基础。

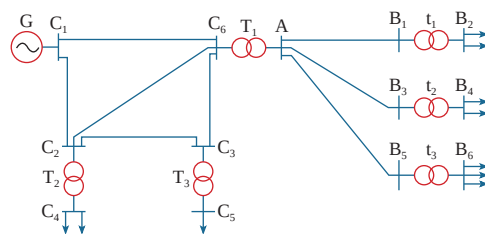


图1 简化的配电网潮流计算模型



贾学涵/硕士研究生

关键词/Keywords

分布式发电·
配电网·
潮流计算·
电力系统·
牛顿-拉夫逊算法·

国家自然科学基金项目(61273029)。

2 配电网模型潮流计算的算法

依据对上文配电网潮流计算模型的介绍分析可知,在进行全局潮流的计算时,需要将大规模的电力网络系统解耦成环式网络和辐射状网络。关于环网的牛顿-拉夫逊算法和辐射网的前推回代算法的比较结果如表1所示。

表1 两种基本的电力系统潮流算法比较

算法	前推回代算法	牛顿-拉夫逊算法
已知量	节点电压、线路阻抗	节点功率、线路阻抗
过程量	线路电流、节点电压	节点功率、节点电压
目标量	节点功率、线路潮流	节点功率、节点电压
修正条件	电压差值	功率差值
收敛条件	相邻两次电压迭代差值 $<e$	相邻两次P、Q差值 $<e$

当进行潮流计算时,需将其解耦成环网和辐射网分别计算,对照表1的算法比较,以分级点为界,对辐射网采用前推回代算法,得到分级点的有功功率和无功功率后,将所得的P、Q值代入环网中,采用牛顿-拉夫逊算法,解得分级点新的电压值,再代入辐射网中计算,如此往复,直到满足收敛条件为止。前推回代算法和牛顿-拉夫逊算法都是基于迭代思想的潮流算法,而配电网计算本身也是这样的一个迭代过程,图2简要地表示了这种算法的基本流程。

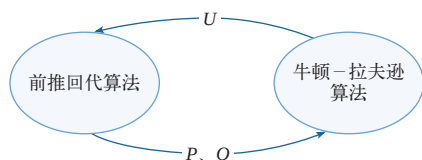


图2 配电网计算算法逻辑

由本节全局潮流计算问题的分析可得配电网潮流计算具有以下特征。

- 1) 将复杂的大规模电力系统问题转化为若干简化的小系统模型来处理。
- 2) 支持不同的潮流算法,即可以采用不同的算法、标么值计算和收敛指标,以保证配电网潮流计算的可靠性和精确性。

3 配电网潮流计算的收敛性分析

配电网模型潮流计算方法将大规模的系统潮流问题分解为发输电潮流和一系列小规模配电

馈线潮流问题。这样既降低解题规模,为全局电力系统的在线分布式计算创造了条件,又使差异很大的各潮流采用适合各自的不同算法、标么值和收敛准确度,从而使计算的可靠性和全局收敛准确度得到保证,也使原有的发输电和配电潮流软件受到保护。

就基于牛顿-拉夫逊潮流算法数学模型的收敛性给出证明。

分析线性方程组为^[6]

$$AX = b \quad (1)$$

假设 A^{-1} 存在,考虑下列形式的迭代方法

$$X^{(i+1)} = \varphi(X^{(i)}) \quad i=0,1,\dots \quad (2)$$

取任意非奇异矩阵B,可得到迭代算法

$$BX + (A - B)X = b \quad (3)$$

式(3)可改写为

$$BX^{(i+1)} + (A - B)X^i = b \quad (4)$$

由此解出 $X^{(i+1)}$,即

$$X^{(i+1)} = (I - B^{-1}A)X^i + B^{-1}b \quad (5)$$

可见,选择不同的非奇异矩阵B,迭代方法也会不同,要得到较好的迭代方法B需要满足以下条件:从式(4)容易解出 $X^{(i+1)}$; $I - B^{-1}A$ 的模尽可能小。

对于每个初始矢量 $X^{(0)}$,迭代方法都会产生一个相对应的矢量序列 $\{X^{(i+1)}\} (i=0,1,2,\dots)$,若所有初始矢量 $X^{(0)}$ 都能使其对应的序列 $\{X^{(i+1)}\} (i=0,1,2,\dots)$ 收敛到解 $X = A^{-1}b$,那么该迭代方法就收敛。

设 λ_i 为 $I - B^{-1}A$ 的特征值,则

$$\rho(I - B^{-1}A) = \max_{1 \leq i \leq n} |\lambda_i| \quad (6)$$

此为矩阵 $I - B^{-1}A$ 的谱半径。

于是式(5)收敛,当且仅当 $\rho(I - B^{-1}A) < 1$ 。

证明如下。令误差 $f = X^{(i)} - X$,则

$$\begin{aligned} f_{i+1} &= (I - B^{-1}A)X^{(i)} + B^{-1}b - [(I - B^{-1}A)X + B^{-1}b] \\ &= (I - B^{-1}A)f_i \end{aligned} \quad (7)$$

则有

$$f = (I - B^{-1}A)f_0 \quad i=0,1,2,\dots \quad (8)$$

设式(7)收敛,则对所有的 f_0 ,都有 $\lim_{i \rightarrow \infty} f_i = 0$ 特别地,当 f_0 是矩阵 $I - B^{-1}A$ 对应于特征值 λ 的特征向量时,根据式(8)可以得到

$$f = \lambda^i f_0 \quad (9)$$

因为 $\lim_{i \rightarrow \infty} f_\lambda = 0$, 所以 $|\lambda| < 1$, 即 $\rho(I - B^{-1}A) < 1$ 。
再假设 $\rho(I - B^{-1}A) < 1$, 可以推出

$$\lim_{i \rightarrow \infty} (I - B^{-1}A)^i = 0 \quad (10)$$

对于所有的 f_0 有

$$\lim_{i \rightarrow \infty} f_i = 0 \quad (11)$$

把 A 进行标准分解

$$A = D - E - F \quad (12)$$

$$\text{其中, } D = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}, E = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ -a_{21} & & \\ \vdots & \ddots & \\ -a_{n1} & \cdots & a_{nn-1} & 0 \end{pmatrix},$$

$$F = \begin{pmatrix} 0 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 0 & & & \vdots \\ \vdots & \ddots & & a_{n-1n} \\ 0 & \cdots & & 0 \end{pmatrix}, \text{ 令 } L = D^{-1}E, U = D^{-1}F,$$

$J = L + U$, 假定 $a_i \neq 0$, ($i = 1, 2, \dots, n$) 取适当的含有参数 ω 的矩阵 $B(\omega)$, 用最佳方法取 ω , 使 $\rho(I - B^{-1}A)$ 作为 ω 的函数尽可能小, 这样得到的迭代方法收敛速度快。设 $B(\omega) = (1/\omega)D(I - \omega L)$, 迭代方法收敛的速度由下面的矩阵 $H(\omega)$ 的谱半径确定, 即

$$H(\omega) = I - B(\omega)^{-1}A$$

$$= (I - \omega L)^{-1}[(I - \omega)I + \omega U] \quad (13)$$

对任意矩阵 A , 有 $\rho[H(\omega)] > |\omega - 1|$ 对所有 ω 成立。这个结论说明, 仅当 $0 < \omega < 2$ 时, 所对应的迭代方法收敛。

可以得到, 配电网潮流计算的收敛前提是潮流计算的初值要在给定的范围内且接近实际结果, 雅各比矩阵非奇异, $\rho(I - B^{-1}A) < 1$; 并且 $(c_1 R_j + c_2 X_j) / (1 + a_1 R_j + a_2 X_j) < 1$ 。收敛条件为: 辐射网前后两次迭代的电压值满足要求, 环网的前后两次功率迭代差值满足要求。

4 分布式发电的潮流算法分析

以异步发电机为例, 其发电机的无功功率 Q_F 和 P_F 、 U 的关系式为

$$Q_F = U^2 \frac{X_C - X_M}{X_C X_M} + \frac{X}{U^2} P_F^2 \quad (14)$$

式中, X 为定子漏抗与转子漏抗之和; X_M 、 X_C 为机端励磁电抗和并联电容。

结合风机的 RX 模型, 风机输出的有功功率为

$$P_F = -I_r^2 R_r (1 - s) s \quad (15)$$

式中, R_r 为转子电阻; I_r 为转子电流^[7]。

由于一般异步风力发电机的电抗远大于电阻, 因此, 忽略电阻的影响, 仅考虑风机的电抗, 得到其无功功率为

$$Q_F = -\frac{U^2}{X_p} + \frac{-U^2 + \sqrt{U^4 - 4P_F^2 X^2}}{2X} \quad (16)$$

式中, $X_p = \frac{X_C X_M}{X_C - X_M}$ 。

综上所述, 将风电机组无功功率 Q_F 和有功功率 P_F 作为修正量引入, 得到修正方程简化形式, 即

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta Q_F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial e} & \frac{\partial P}{\partial f} & \frac{\partial P}{\partial P_F} \\ \frac{\partial Q}{\partial e} & \frac{\partial Q}{\partial f} & \frac{\partial Q}{\partial P_F} \\ \frac{\partial Q_F}{\partial e} & \frac{\partial Q_F}{\partial f} & \frac{\partial Q_F}{\partial P_F} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta e \\ \Delta f \\ \Delta P_F \end{pmatrix} \quad (17)$$

与基本的牛顿-拉夫逊算法相同, e 、 f 的偏导数容易求得。由式 (16) 可求得 Q_F 对 P_F 的偏导数, 即

$$\frac{\partial Q_F}{\partial P_F} = \frac{U^2}{4X^2} g \frac{1}{\sqrt{P_F}} \quad (18)$$

式 (16) 是将分布式电源应用到电力系统潮流计算中的基础方法, 阐述了该文针对含有分布式电源的输电网和配电网的潮流计算方法。在混杂配电网中, 考虑风机本身的机械特性^[8], 依据 PZ 节点法, 应用改进的 PQ 节点来处理分布式电源。而在发输电网中, 根据分布式电源的数学模型, 通过修正变量来不断修正功率输出值, 继而进行计算。即通过反复修正雅各比矩阵, 使其满足配电网模型潮流计算的迭代要求, 这样就有效地解决了含有分布式电源的潮流计算问题。

5 含分布式电源的配电网潮流计算

含分布式电源的配电网潮流计算是指在全局潮流计算中,以变量形式标示出连接环网和辐射网的电压分级点,采用前推回代算法计算出辐射网潮流分级点的有功功率和无功功率,然后代入到环网中,使用牛顿-拉夫逊潮流算法得到环网各节点电压后,更新分级点电压,将更新的电压值代入辐射网中,再根据收敛判据,判断配电网潮流是否收敛,若收敛则退出程序,否则继续迭代,直至满足收敛条件。

6 含分布式发电的配电网潮流计算仿真

以通辽地区变电所无功配置方案研究为例,对其含分布式发电的配电网潮流计算^[8]结果进行仿真,结果如图3所示。实际情况如下:全局潮流计算电压等级分为220 kV、66 kV和11 kV三级,其中作为环网的220 kV网络拓扑进行潮流计算时,采用牛顿-拉夫逊算法;而作为辐射状网络结构的110 kV和11 kV网络拓扑则采用前推回代算法;根据整个地区电网发展需要新增的16座风电厂,由于风力发电是一种不可控的新能源,归类到分布式电源的范畴,结合风力机组RX模型,采用PZ节点法进行仿真计算。

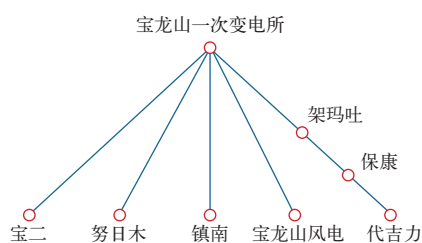


图3 宝龙山一次变电所线路图

为了简便起见,配电网潮流计算的结果以宝龙山与通辽地区宝龙山一次变电所单独采用前推回代,相比较,发现采用配电网潮流计算模型的潮流计算仿真结果在数值上更接近精确值,如表2所示。

由表2可知,首先,由支路数和节点数上的差异可以看出,采用配电网模型潮流计算的复杂度要比采用基本方法的潮流计算的复杂度高很多;

表2 宝龙山一次变电所仿真对比

采用的潮流算法	节点数	支路数	平衡节点电压	电压降落最大	线路损耗最大
基本潮流算法	7	6	66 kV	1.425 kV	0.047 588 08%
配电网潮流算法	8	7	66.332 35 kV	1.344 3 kV	0.040 389 8%

其次,由于配电网潮流计算方法的网络模型中含有分布式发电,因此需当作PZ节点处理,这样也增加了配电网模型潮流计算的复杂度;再次,平衡节点的差异表明,采用了配电网模型潮流计算,平衡节点的电压不再是额定电压的固定值,而是更符合实际电力系统中的潮流计算的实时精确值;最后,从电压降落和线路损耗的对比来看,配电网模型潮流算法比基本潮流算法效果更好。综上所述,所研究的含分布式电源的配电网模型算法在配电网的潮流计算中具有很大的优越性和实用性。

7 结束语

主要论述了一种基于配电网模型的潮流计算方法,即对于大规模的电力系统模型,需将其解耦为多个辐射状网络和环网小系统模型,再根据其各分级点的电压、有功功率和无功功率的反复连接迭代转换,进而计算出全局潮流。

潮流算法的收敛性判断是配电网潮流计算的难点之一,因为大规模的电力系统解耦成若干的小系统,而不同的小系统又有不同的潮流计算方法,因此收敛性必须建立在各个小系统收敛,同时满足大系统收敛条件的基础上,从而使系统达到稳定。

最后,在此基础上,该文研究了含有分布式电源的配电网电力系统潮流计算。由于分布式电源的接入使原有的电力系统变得复杂,因此对配电网潮流计算的研究更有意义。

参考文献

- [1] 宋文南,李树鸿,张尧. 电力系统潮流计算[M]. 天津:天津大学出版社,1990.

- [2] 杨辉, 文福拴, 刘永强, 等. 适用于配电系统潮流计算的新的前推回代算法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22 (3): 123-127.
- [3] 汪芳宗, 杨力森, 高学军, 等. 基于松弛牛顿法的互联电网并行分布式潮流计算方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35 (16): 18-22.
- [4] 刘波. 计及分布式电源的电力系统潮流及可靠性与稳定性研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009: 28-43.
- [5] 孙羽. 含分布式发电的电力系统复合式网络模型潮流计算方法研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- [6] 夏沛, 徐俊明. 改进牛顿法大规模电力系统潮流计算 [J]. 计算机技术与自动化, 2010, 29 (4): 59-62.
- [7] 江岳文, 陈冲, 温步瀛. 含风电场电力系统的潮流计算 [J]. 华东电力, 2008, 36 (2): 86-88.
- [8] 夏沛, 汪芳宗. 大规模电力系统快速潮流计算方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (9): 38-40.
- [9] 李小兰. 含分布式发电的电网潮流计算及无功补偿辅助决策系统 [D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [10] 汤伟, 吴昊. 基于网络拓扑结构的全网潮流计算模型自动生成 [J]. 现代电力, 2013, 30 (2): 13-16.
- [11] 王渝红, 张彪, 李兴源, 等. 基于边界节点量测信息的两端口网络等值方法 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2014, 40 (5): 127-132.
- [12] Phebe A M S, Satayanarayana B P S M. Comparison of general and fuzzy set load estimation in radial distribution network power flow [C]. International Conference on Advances in Power Conversion & Energy Technologies, 2012: 1-5.
- [13] 尹璐, 舒彬, 张璞, 等. 统一潮流控制器在电力系统中的 PSD-BPA 和 Matlab 联合建模与仿真方法 [J]. 电工技术学报, 2015, 30 (1): 383-388.
- [14] 沙浩浩, 杨天梅. 分布式风力发电技术分析及其经济评估 [J]. 华东电力, 2009, 37 (2): 300-302.
- [15] 陈海炎, 陈金富, 段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (1): 35-40.

(收稿日期: 2016-03-08) EA

(上接第27页)

- [10] Holme P, Kim B J, Yoon C N, et al. Attack vulnerability of complex networks [J]. Physical Review E, 2002, 65 (5): 056109.
- [11] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [12] Srinivas N, Deb K. Multiobjective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms [J]. Evolutionary Computation, 1994, 2 (3): 221-248.
- [13] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6 (2): 182-197.
- [14] Farina M, Amato P. A fuzzy definition of “optimality” for many-criteria optimization problems [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, Part A, 2004, 34 (3): 315-326.
- [15] 刘自发, 葛少云, 余贻鑫. 一种混合智能算法在配电网重构中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (15): 73-78.
- [16] Goswami S K, Basu S K. A new algorithm for reconfiguration of distribution feeders for loss minimization [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7 (3): 1484-1491.

(收稿日期: 2016-05-24) EA