

文章编号: 1671-251X(2010)02-0049-04

# 基于 PowerWorld 的煤矿供电系统潮流计算的应用研究

赫飞, 樊鹏, 汪玉凤

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

**摘要:** 根据煤矿供电网络系统稳态运行和静态稳定需要, 提出了一种适合煤矿电网潮流计算的算法——保留非线性潮流算法, 同时将 PowerWorld 软件应用在供电网潮流分析之中, 使得潮流计算与可视化图形系统结合, 实现了对电网的实时运行状况监测, 有利于调度员对电网的监测分析。

**关键词:** 煤矿; 供电系统; 潮流分析; 监测分析; PowerWorld

中图分类号: TD611

文献标识码: A

## 0 引言

随着我国煤矿供电系统规模的迅速扩大, 对供电质量的要求也随之提高。煤矿电网潮流计算作为研究供电系统稳态运行情况和静态稳定的一种基础的算法, 它可根据给定的运行条件及系统接线情况确定整个系统各部分的运行状态, 如各母线的电压、各元件中流过的功率、系统的功率损耗等。同时, 它也可以用来定量分析比较供电方案或运行方式的合理性。因此, 对煤矿供电系统进行可视化潮流分析, 对电网的稳定运行进行安全预测分析是非常必要的。基于上述原因, 本文提出了一种适合煤矿电网潮流的计算算法——保留非线性潮流算法, 同时将电力系统潮流分析软件 PowerWorld 应用在供电网的潮流分析中, 使潮流分析的可视化程度得到了极大的提高, 为工作人员全面掌握供电系统的实际运行状态、预测和分析系统的运行趋势、对运行中发生的问题做出正确决策提供了很好的分析依据和直观的可视化界面。

## 1 可视化潮流分析软件 PowerWorld 简介<sup>[1]</sup>

PowerWorld 是一款基于潮流计算的交互式电力系统仿真软件包, 其核心是一个综合性强大的潮流

计算软件, 能有效地求解多达 60 000 个节点的系统。它采用直观的可视化技术, 生动地阐述了电力系统的基本元件, 使用户对系统的运行有直观的体会。它用各种颜色的图元来表现电力系统中的发电机、母线、输电线、并联电容器、变压器等元件。图元旁边的数字标注了运行值, 如母线电压幅值、有功/无功负荷值等, 其最基本的表示如下所述:

(1) 输电线上的饼形图显示了线路的载荷情况, 用载荷占线路额定容量的百分比表示;

(2) 发电机图标中转子的位置形象地表示了发电机母线电压的相角;

(3) 断路器的状态以颜色表示: 红色表示断路器闭合, 有电流通过; 绿色表示断路器断开;

(4) 采用动画技术显示系统的潮流情况, 仿真过程中可以看到一连串的大小不一的箭头在输电线、变压器、发电机上流进流出, 其大小和方向表示了功率流动的大小和方向。

## 2 保留非线性潮流算法的原理<sup>[2~3]</sup>

保留非线性潮流算法采用了泰勒级数的高阶项或称为非线性项, 该算法数学模型可表示为直角坐标形式下的潮流方程:

$$P_i = \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_{ij}e_{ej} - B_{ij}e_{ij}f_{ej} + G_{ij}f_{ij}f_{ej} + B_{ij}f_{ij}e_{ej}) \quad (1)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n (G_{ij}f_{ij}e_{ej} - B_{ij}f_{ij}f_{ej} - G_{ij}e_{ij}f_{ej} - B_{ij}e_{ij}e_{ej}) \quad (2)$$

$$U_i^2 = e_i^2 + f_i^2 \quad (3)$$

收稿日期: 2009-10-28

作者简介: 赫飞(1978-), 男, 河南商丘人, 硕士, 讲师, 2005 年毕业于辽宁工程技术大学电力电子与电力传动专业, 现主要从事现代电力电子技术方面的研究与设计工作, 已发表文章 6 篇。

E-mail: hfei1998@126.com

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

式中:  $P_i$  和  $Q_i$  分别为节点  $i$  的有用功率和无用功率;  $e_i$  和  $f_i$  分别为节点  $i$  的电压  $u_i$  的实部和虚部;  $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  分别为节点导纳矩阵元素  $Y_{ij}$  的实部和虚部。

由式(1)和(2)可知, 潮流方程右端是齐次二项式。由于齐次二项式的泰勒级数展开式只有常数项、一阶项和二阶项这前三项, 因此二阶项以后都是零。

将潮流方程在给定的电压初值附近展开成级数为

$$P_i(e, f) = P_i(e^{(0)}, f^{(0)}) + \sum_{j \in i} \left( \frac{\partial P_i}{\partial e_j} \Delta e_j + \frac{\partial P_i}{\partial f_j} \Delta f_j \right) + sP_i \quad (4)$$

$$Q_i(e, f) = Q_i(e^{(0)}, f^{(0)}) + \sum_{j \in i} \left( \frac{\partial Q_i}{\partial e_j} \Delta e_j + \frac{\partial Q_i}{\partial f_j} \Delta f_j \right) + sQ_i \quad (5)$$

$$(U_i^s)^2 = (e_i^{(0)})^2 + (f_i^{(0)})^2 + (2e_i^{(0)} \Delta e_i + 2f_i^{(0)} \Delta f_i) + sU_i \quad (6)$$

式中:  $sP_i$ 、 $sQ_i$ 、 $sU_i$  为相应的二阶项。

将式(4)、(5)、(6)写成矩阵形式, 对 PQ 节点有:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{(0)} \\ Q^{(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} sP \\ sQ \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \quad (7)$$

对 PV 节点有:

$$\begin{bmatrix} P \\ u^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{(0)} \\ (U^{(0)})^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H & N \\ R & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} sP \\ sU \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ R & S \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $H = \frac{\partial P_i}{\partial f_i}$ ;  $N = \frac{\partial P_i}{\partial e_i}$ ;  $L = \frac{\partial Q_i}{\partial e_i}$ ;  $R = 2e_i^{(0)}$ ;  $S = 2f_i^{(0)}$ 。

由上列方程可以得到保留非线性法的迭代公式:

PQ 节点:

$$\begin{bmatrix} \Delta f^{(k+1)} \\ \Delta e^{(k+1)} \end{bmatrix} = -J^{-1} \left( \begin{bmatrix} P^{(0)} \\ Q^{(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} sP^{(k)} \\ sQ^{(k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \right) \quad (9)$$

PV 节点:

$$\begin{bmatrix} \Delta f^{(k+1)} \\ \Delta e^{(k+1)} \end{bmatrix} = -J^{-1} \left( \begin{bmatrix} P^{(0)} \\ U^{(0)2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} sP^{(k)} \\ sU^{(k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P \\ U^2 \end{bmatrix} \right) \quad (10)$$

这便是保留非线性法的主要迭代公式, 其中

$P^{(0)}$ 、 $Q^{(0)}$  可以通过电压初值  $U^{(0)}$  由式(1)、(2)求得:

$$P_i^{(0)} = \sum_{j \in i} [e_i^{(0)} (G_{ij} e_j^{(0)} - B_{ij} f_j^{(0)}) + f_i^{(0)} (G_{ij} f_j^{(0)} + B_{ij} e_j^{(0)})] \quad (11)$$

$$Q_i^{(0)} = \sum_{j \in i} [f_i^{(0)} (G_{ij} e_j^{(0)} - B_{ij} f_j^{(0)}) - e_i^{(0)} (G_{ij} f_j^{(0)} + B_{ij} e_j^{(0)})] \quad (12)$$

其中  $P$ 、 $Q$ 、 $U$  是已知的 PQ、PV 节点的功率和电压。

式(4)、(5)、(6)中  $sP_i$ 、 $sQ_i$ 、 $sU_i$  的计算方法: 由于在直角坐标系下潮流计算方程的泰勒展开式中, 二阶项有和第一项相同的表达式, 仅变量  $e$ 、 $f$  分别用  $\Delta e$ 、 $\Delta f$  取代而已, 所以对 PQ 节点  $sP_i^{(k+1)}$ 、 $sQ_i^{(k+1)}$  的迭代式为

$$sP_i^{(k+1)} = \sum_{j \in i} [\Delta e_i^{(k)} (G_{ij} \Delta e_j^{(k)} - B_{ij} \Delta f_j^{(k)}) + \Delta f_i^{(k)} (G_{ij} \Delta f_j^{(k)} + B_{ij} \Delta e_j^{(k)})] \quad (13)$$

$$sQ_i^{(k+1)} = \sum_{j \in i} [\Delta f_i^{(k)} (G_{ij} \Delta e_j^{(k)} - B_{ij} \Delta f_j^{(k)}) - \Delta e_i^{(k)} (G_{ij} \Delta f_j^{(k)} + B_{ij} \Delta e_j^{(k)})] \quad (14)$$

对于 PV 节点  $sP_i^{(k+1)}$  的求取同 PQ 节点  $sU_i^{(k+1)}$  的求取如下:

$$sU_i^{(k+1)} = \Delta e_i^{(k)2} + f_i^{(k)2} \quad (15)$$

将式(13)、(14)、(15)代入迭代式(9)、(10)进行迭代, 将每次迭代的结果根据以下判据进行判断, 若满足则所得修正值便可以用来修正初始值, 从而得到比较精确的潮流结果。其中,  $\varepsilon$  为定义的收敛判据, 一般设为 0.0001 或 0.001。

$$\max_i |\Delta e_i^{(k)}| < \varepsilon \quad (16)$$

$$\max_i |\Delta f_i^{(k)}| < \varepsilon \quad (17)$$

最后根据式(18)、(19) :

$$e_i^{(k+1)} = e_i^{(k)} + \Delta e_i^{(k)} \quad (18)$$

$$f_i^{(k+1)} = f_i^{(k)} + \Delta f_i^{(k)} \quad (19)$$

可求得所求的节点电压值, 然后计算线路功率、网损等, 完成整个潮流计算。

### 3 节点导纳矩阵的计算与实现

在进行潮流计算时, 首先要了解电力系统网络的基本数学模型。该模型应是一个既能包含网络元件参数、又包含网络元件连接关系的矩阵节点。由于节点导纳矩阵具有这个特点, 故成为电力系统分析计算中使用最为广泛的网络矩阵。

节点导纳矩阵的节点电压方程:

$$I_B = Y_B U_B \quad (20)$$

式中:  $I_B$  为节点注入电流的列向量;  $Y_B$  为节点

导纳矩阵;  $U_B$  为节点电压的列向量。

对于含有  $n$  个节点的电力网络(地作为参考节点不包含在内),如果网络结构和元件参数一致,则网络方程可表示为

$$\dot{I}_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (21)$$

式中:  $n$  为系统节点数;  $Y_{ij}$  为节点导纳矩阵的元素。

在工程实际中,节点注入电流并未给出,给定的往往是节点注入功率。因此,为了求解潮流问题,必须利用节点功率与电流之间的关系:

$$\dot{I}_i = \frac{\dot{S}_i}{U_i} = \frac{P_i - jQ_i}{U_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (22)$$

式中:  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为节点  $i$  向系统注入的有功功率及无功功率,当  $i$  节点为负荷节点时,  $P_i$ 、 $Q_i$  本身应带负号。

将式(22)代入式(21),可得到电力系统潮流计算的基本方程:

$$\frac{P_i - jQ_i}{U_i} = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \dot{U}_j \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (23)$$

式(23)有  $n$  个非线性复数方程式,是潮流计算

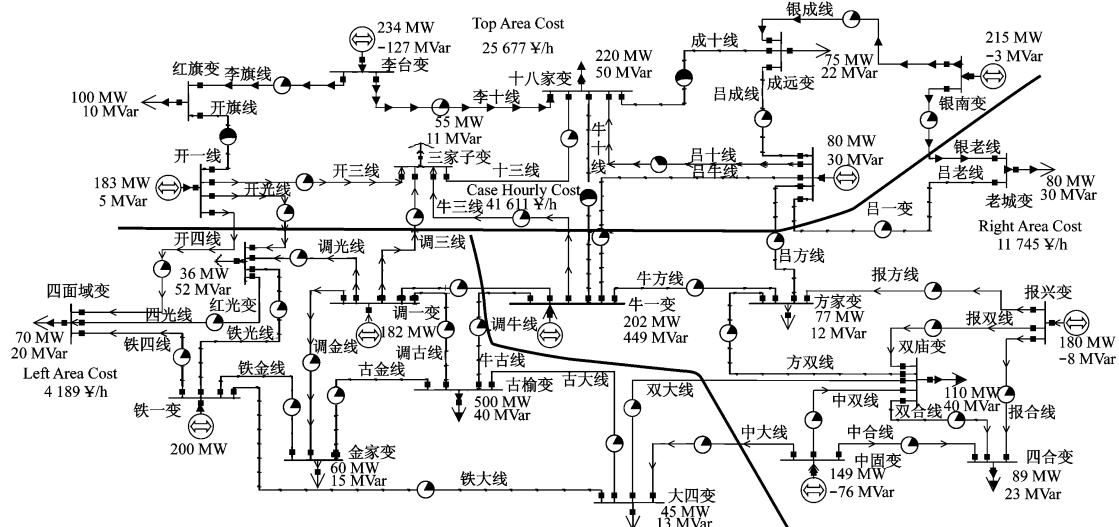


图 1 正常运行状态下的供电系统潮流分析仿真图

#### 4.2 改投切运行状态下的系统潮流分析

当煤矿供电网中的输电线路或设备检修时,就要对该线路或设备进行改投切的工作,此时会对整个煤矿供电网中的潮流分布产生影响。采用PowerWorld 可以实现在改投切运行状态下对系统潮流分析的监控,监控画面如图 2 所示。从图 2 可看出,电量参数发生明显变化的输电线路中,饼形图比值大小和颜色发生改变。

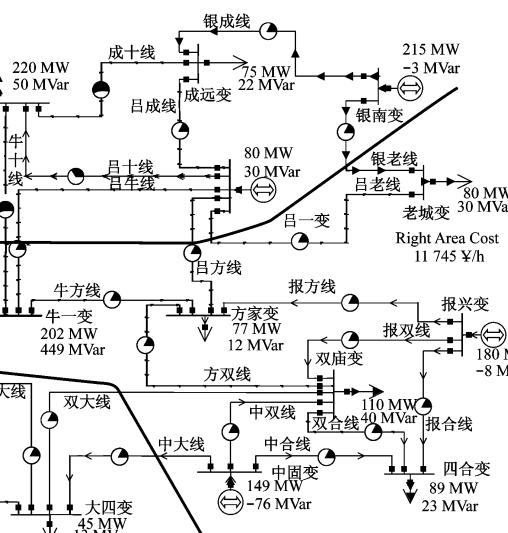
问题的基本方程式,对该方程式的不同应用和处理就形成了不同的潮流方法。

#### 4 PowerWord 在电网可视化潮流分析中的应用

七星煤矿位于黑龙江双鸭山市境内,整个煤矿供电系统共有 40 条输电线路、19 个变电所。现根据该煤矿 66 kV 供电系统的地理位置分布对整个煤矿供电系统进行潮流分析。

##### 4.1 正常运行状态下系统潮流分析

现场采集来的电量参数(如开关数字量、模拟量有各条输电线路上的电压值、各元件的有功功率值和无功功率值、节点的电压值)通过实时数据库传递到 PowerWorld 中,建立实时潮流分析模型,整个煤矿供电系统各个变电站正常运行状态下的潮流状态如图 1 所示。从图 1 可以看出,整个供电网运行良好,功率分布合理。图 1 中“→”的走向和大小表示功率的流动方向和流动大小,每条输电线路上的饼形图表示该条线路上的功率占额定功率的比值大小。这些数据很直观,可使调度人员在第一时间内了解供电系统的现状。



##### 4.3 短路故障状态下的系统潮流分析

短路故障是供电网中最常见的一种故障,其危害性非常大,在 PowerWorld 仿真器中点击“Fault Analysis”即可模拟整个煤矿供电网中的故障,并加以计算分析,如图 3 所示。从图 3 中可看出,位置 15 点发生故障时,可以显示发生故障点线路的短路参数,供调度员对电网的故障进行分析。

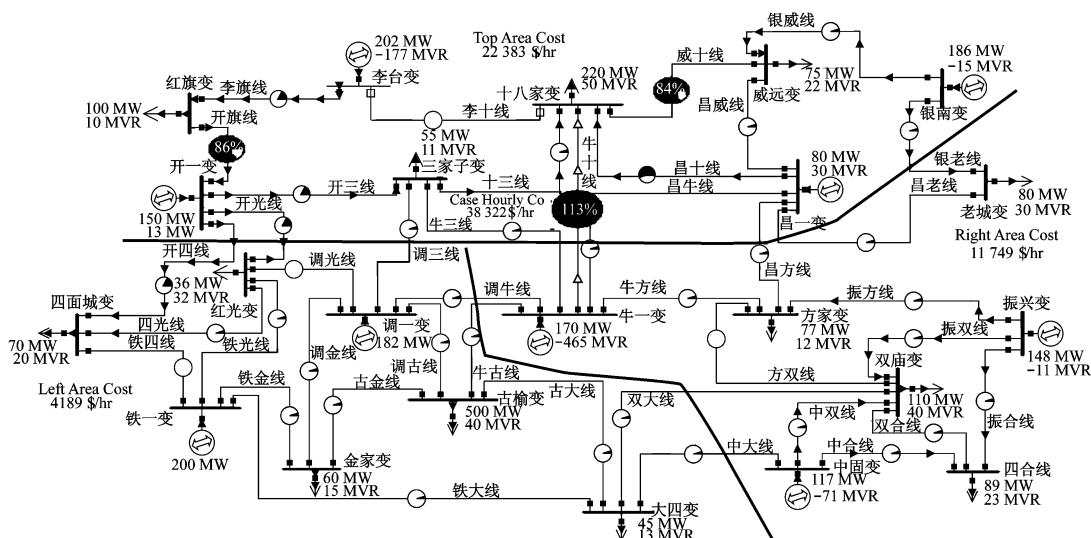


图2 改投切运行状态下的供变系统潮流分析仿真图

运行状态、改投切状态和短路故障状态下的潮流状态。通过潮流分析统计数据,运行调度人员可直观地监测到全网供电系统的运行情况,这有利于调度员对电网的监测分析并作出正确的判断。

### 参考文献:

- [1] 王宪荣,柳 煜,张伯明. 非线性总项与保留非线性潮流算法的拓广[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1990(6): 9-10.
- [2] 邓佑满,张伯明,相年德. 配电网络重构的改进最优潮流模式算法[C]//全国高校第十届电自专业学术年会论文集. 南宁: 广西大学出版社, 2005.
- [3] 韩祯祥. 电力系统分析[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2005.
- [4] 范高锋. 配电网可视化潮流计算软件的研究与开发[D]. 保定: 河北农业大学, 2003.
- [5] 廖青华,赵 斌. 电力系统可视化仿真软件 Power World的应用[J]. 河南机电高等专科学校学报, 2008, 16(6).

5 结语

本文提出了适合煤矿电网潮流计算的算法——保留非线性潮流算法。在保留非线性潮流算法的基础上,利用PowerWorld软件对双鸭山七星煤矿供电网进行了潮流分析,系统地分析了供电网在正常

安科瑞直流多功能电表在光伏电站喜获应用

为配合太阳能、风力发电等可再生能源直流系统的电参数测量及电能计量,参照我国对新能源电力设备运行和计算机智能化监控的最新要求,安科瑞成功研制了PZ系列直流多功能电表,能够直接测量、显示直流电流、电压、功率和电能等参数,并带有RS485接口、I/O模块、4~20mA输出,便于组网监控。

该多功能电表现已成功应用于宁夏某 10 MW 太阳能示范电站及国内多家风光互补发电路灯工程等项目。该电表也适用于变电站、通信基站、蓄电池储能等直流系统。

(周丽琴)