

文章编号: 1671-251X(2010)07-0042-04

# 配电网单相接地仿真分析研究

田书、王晓卫、王娟娟

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003)

**摘要:** 在对配电网单相接地系统进行仿真分析时, 利用小波包良好的时频特性和局部化能力精细处理故障瞬间的暂态信息, 精确捕捉到了故障瞬间的电压行波波头, 为下一步的配电网故障定位研究提供了理论依据; 分析了故障瞬间的零模电压和零模电流波形, 观察到故障线路的零模电压和零模电流在第一个周波内极性相反, 而健全线路的零模电压和零模电流在第一个周波内极性相同, 且故障线路的幅值明显大于健全线路。利用这一特点构造出的零模功率保护方案将不受故障时刻、过渡电阻等的影响, 对提高配电网的继电保护水平提供了很好的条件。

**关键词:** 矿井; 电网; 单相接地故障; 小波包; 零模电压; 零模功率; 仿真

**中图分类号:** TD61      **文献标识码:** A

## 0 引言

近年来, 高压输电线路的故障定位研究工作取得了较大发展, 但作为和用户密切相连的配电网的故障定位问题长期以来却未能得到很好解决。究其原因, 主要是配电网较高压输电网多为小电流接地系统, 分支线路较多、网络拓扑结构复杂、易受过渡电阻等的影响, 使得故障时行波能量的衰减剧烈, 检测装置难以捕捉到行波初始波头的时间。另外, 传统配电网中主要采用速断和过流保护方式, 这种保护配置存在的问题: (1) 电流保护实现配电网保护的前提是将整条馈线视为一个单元。当馈线发生故障时将整条线路切掉, 并不考虑对非故障区域的恢复供电。这对保证供电可靠性非常不利。(2) 依靠时间级差实现保护的选择性, 会导致故障的切除时间过长而影响设备寿命和恢复供电时间。(3) 保护级数太多, 整定难以配合。

本文在对配网单相接地系统进行大量仿真的基础上, 利用小波包分析理论精确地捕捉到了单相接地时刻行波的初始波头, 为进一步研究配电网的故障定位工作提供了依据。另外, 在对仿真结果进行

研究时, 观察到单相接地时刻故障线路的零模功率与健全线路的零模功率有着本质的区别, 利用这一特点构成的反时限保护将极大地提高配电网的保护水平。

## 1 小波包理论

小波分析是一种窗口大小固定但其形状可改变的时间窗和频域窗的时频局部化分析方法<sup>[1]</sup>。小波包分析是从小波分析延伸出来的对信号进行更加精细分析的一种方法, 它将频带进行多层次划分, 成功地解决了小波变换的“高频低分辨”这一时-频分析上的缺陷, 并根据被分析信号的特征自适应地选择相应频带, 使之与信号频谱相匹配, 从而提高了时-频分辨率。

小波子空间  $\{U_j^n, j \in \mathbb{Z}, n \in \mathbb{Z}\}$  的任意函数  $f_j^n(t)$  都可以展开成正交小波级数:

$$f_j^n(t) = \sum_{l \in \mathbb{Z}} c_l^{j,n} \mu_n(2^j t - l) \quad (1)$$

式中:  $c_l^{j,n}$  为小波子空间  $U_{j+1}^n$  的小波包重构系数;  $\mu_n(2^j t - l)$  为小波包函数族。

根据小波包空间的值和分解关系  $U_{j+1}^n = U_j^{2n} \oplus U_j^{2n+1}$ , 得到小波包分解系数  $d_l^{j,2n}$ 、 $d_l^{j,2n+1}$  的递推公式:

$$\begin{cases} d_l^{j,2n} = \frac{1}{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_m d_k^{j+1,n} \\ d_l^{j,2n+1} = \frac{1}{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_m d_k^{j+1,n} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $g_m, h_m$  为滤波器系数;  $m = k - l$ 。

收稿日期: 2010-03-26

基金项目: 煤炭青年基金资助项目(117160), 河南理工大学研究生创新基金资助项目

作者简介: 田书(1963-), 女, 陕西神木人, 副教授, 主要研究方向为电力系统微机保护与故障测距技术。E-mail: proceedings@126.com

由  $d_{l-2k}^{j+2n}$ 、 $d_{l-2k+1}^{j+2n+1}$  可得到小波包重构系数  $c_l^{j,n}$  的递推公式:

$$c_l^{j+1,n} = \sum_{k \in \mathbb{Z}} (h_m d_k^{j,2n} + g_m d_k^{j,2n+1}), \quad m = l - 2k \quad (3)$$

## 2 Matlab 仿真分析

利用 Matlab/Simulink 对配电网单相接地系统进行仿真, 其模型如图 1 所示<sup>[2]</sup>, 其中线路长度:  $l_1 = 20 \text{ km}$ ,  $l_2 = 15 \text{ km}$ ,  $l_3 = 24 \text{ km}$ ,  $l_4 = 8 \text{ km}$ ,  $l_5 = 16 \text{ km}$ ,  $l_6 = 30 \text{ km}$ 。线路正序参数:  $R_1 = 0.17 \Omega$ ,  $L_1 = 1.2 \text{ mH}$ ,  $C_1 = 9.697 \text{ nF}$ ; 零序参数:  $R_0 = 0.23 \Omega$ ,  $L_0 = 5.48 \text{ mH}$ ,  $C_0 = 6 \text{ nF}$ 。变压器连接方式为  $\Delta/Y$ , 220 kV/35 kV; 其中线路 1 的负载为 2 MVA, 线路 3 的负载为 5 MVA。

仿真时设接地故障发生在线路 1 距离母线 10 km 处, 系统的采样频率为 50 000 Hz, 采样时间为 0.000 02 s, 每周波采样 1000 次, 断路器的模拟

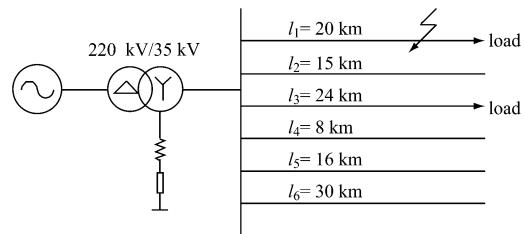


图 1 配电网单相接地系统仿真模型

单相接地时刻在 0.01 s, 该时刻是 A 相电压正半波的任意时刻, 具有一般性, 断路器在 0.04 s 恢复正常运行。

利用 db3 小波包对故障线路 1 的 A 相电压进行 4 层分解, 得到图 2, 其中 [4, 0]、[4, 1]、[4, 2]、[4, 3] 为小波包分解后的低频部分。从图 2 可看出, 根据小波分析的低频部分只能看出原始信号的大体走势和形状, 但在接地故障突变时刻却无能为力。突变时刻信号不清晰, 需要对原始信号进行进一步分析, 也就是应该在高频部分进行分解。

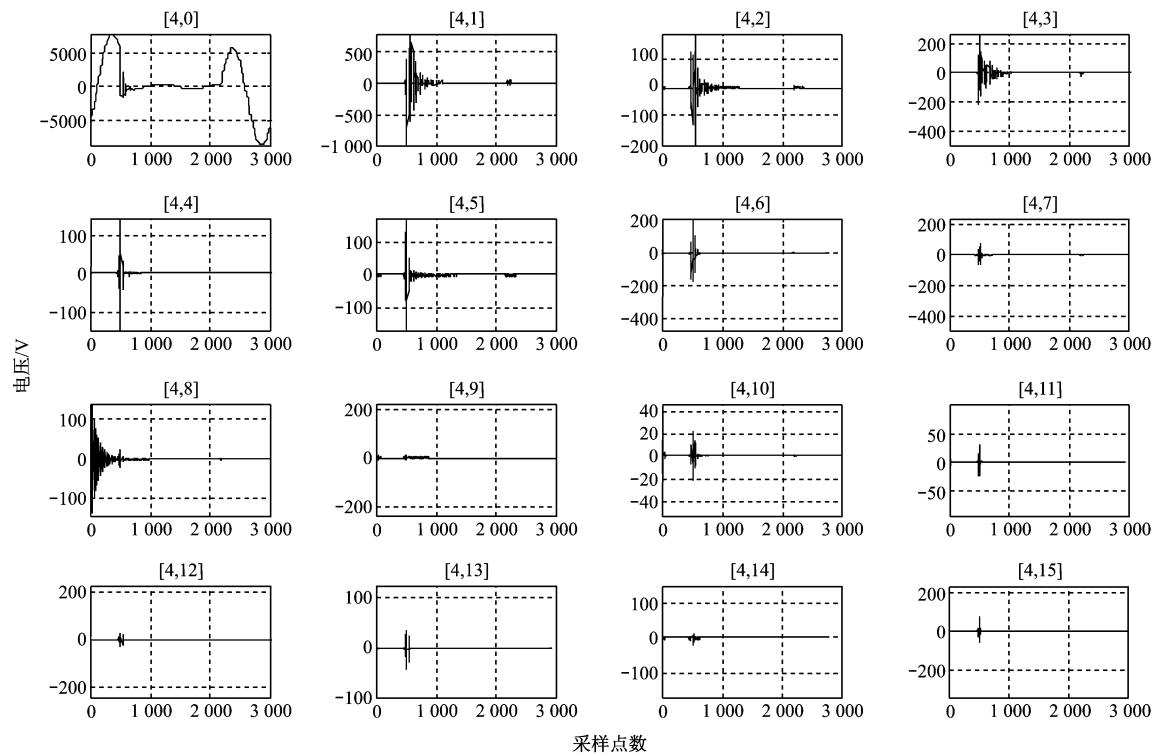


图 2 db3 小波包 4 层分解波形

图 2 中 [4, 11] ~ [4, 15] 为小波包分解后的高频部分, 从这些高频部分中可以清楚地看到故障线路 A 相电压的突变点。利用这一特点可以精确地捕捉到故障时刻电压行波的初始波头位置, 为将行波理论应用于配电网的故障定位研究工作提供理论依据。

供电线路较长时, 各条线路之间的电磁耦合现象比较严重, 但传统的对称分量法却没有考虑到

这种情况。针对该问题, 利用克伦贝尔变化, 将相电压、电流转换成零模、一模和二模电压、电流, 由于该相模变换矩阵考虑了线路之间的电磁耦合现象, 所以利用变化后的模电压、电流进行研究分析, 得出的结论才更有说服力。其中克伦贝尔变换矩阵为<sup>[3~4]</sup>

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_a \\ u_b \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

图 3 为利用相模变换矩阵得到的故障线路 1 的零模电压波形。从图 3 可看出, 在接地故障瞬间的 1 个周波里, 零模电压是负极性的, 且幅值很大, 在 0.04 s 故障排除后, 零模电压迅速减小至 0。分析原因是由于在故障前后系统为三相对称运行, 所以零模电压和零模电流都为 0, 只有在发生故障时, 系统失去三相对称运行状态, 进入到不对称运行模式, 此时零模电压和零模电流才会出现。仿真结果也正好体现了这一结论。

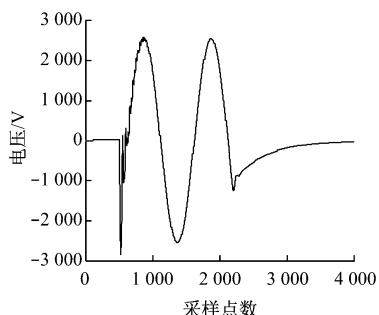


图 3 故障线路 1 的零模电压波形(正半波任意时刻)

图 4 为仿真模型中 6 条线路的零模电流波形。从图 4 可看出, 在接地故障瞬间的第一个周波里, 线路 1 故障时刻的零模电流为正极性, 且幅值明显大于其它 5 条健全线路。仿真模型中线路 2、4、5、6 没有带负载, 所以在图 4 中它们的零模电流幅值远小于故障线路 1 的零模电流。通过大量仿真证明, 健全线路 2、3、4、5、6 在故障瞬间的第一个周波内, 零模电流的极性为负, 且幅值较故障线路 1 要小。利用图 3 和图 4 的结论, 可以得出各线路零模功率波形, 如图 5 所示。

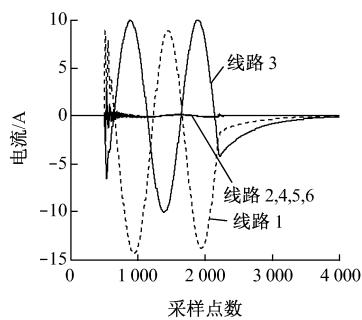


图 4 各线路零模电流波形(正半波任意时刻)

从图 5 可看出, 在故障瞬间的第一个周波内, 故障线路 1 的零模功率为负极性, 且幅值较大, 表明此时故障线路 1 为发出最大的零模功率, 而健全线路 2、3、4、5、6 的零模功率波形在故障瞬间的第一个周

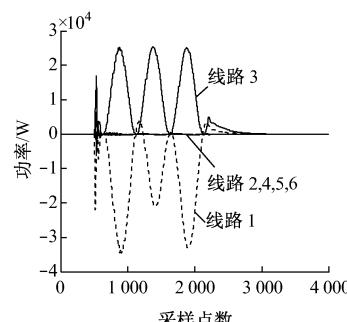


图 5 各线路零模功率波形(正半波任意时刻)

波内均为正极性, 表明健全线路此时是在吸收零模功率。其中线路 2、4、5、6 因未带负载, 故吸收的零模功率较小。

### 3 零模功率保护方案理论

配电网单相接地可继续运行 1~2 h, 故小电流接地保护可有一个较长的延时时限。当发生单相接地故障时, 出现零模电压。通过小波包分析, 提取工频带零模电压, 并应用该频带 1 个周波的零模电压离散采样值计算零模电压的大小<sup>[5]</sup>:

$$U_0 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n u_0(k)} \quad (6)$$

式中:  $U_0$  为零模电压有效值;  $u_0(k)$  为零模电压离散采样值;  $n$  为 1 个周波的零模电压离散采样点个数。

暂时性的单相接地故障自动恢复正常后, 零模电压在定时限保护延时时间内消失, 零模电压模块保证线路接地保护不会误动作。永久性的单相接地故障有持续的零模电压, 到达保护延时时间后, 由零模功率和零模电压共同作用, 保证了单相接地保护可靠动作。

小电流接地跳闸保护动作原理如图 6 所示。在零模电压模块中, 以零模电压的有效值  $U_0$  大于正常运行时母线处的不平衡电压为保护启动条件, 保证了保护动作的可靠性。正常运行时不平衡电压较小, 通常取 40 V, 在图 6 中用  $U_b$  表示。以故障后第一个周波发出的暂态零模功率  $P_0 > 0$  为保护动作判据, 通过反时限保护特性保证了保护动作的选择性。

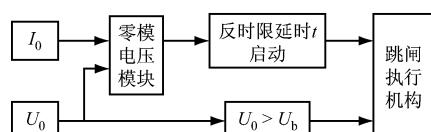


图 6 小电流接地跳闸保护动作原理

文章编号: 1671-251X(2010)07-0045-05

# 基于 P- 模糊自适应 PID 控制的无刷直流电动机调速系统

刘兴艳, 上官璇峰, 董洋洋, 张汉允

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003)

**摘要:** 分析了无刷直流电动机的数学模型, 提出了一种新型的 P- 模糊自适应 PID 控制方法, 并在 Matlab/ Simulink 环境中建立了基于 P- 模糊自适应 PID 控制的无刷直流电动机调速系统仿真模型。在该调速系统中, 电流控制采用电流滞环, 转速控制采用 P 控制和模糊自适应 PID 控制相结合的方式, 实现了电流滞环和转速模糊控制的双闭环调速控制功能。仿真结果表明, 该系统与基于常规 PID 控制的调速系统相比, 系统响应时间缩短一半, 且超调减小, 具有较强的鲁棒性和自适应能力。

**关键词:** 无刷直流电动机; 调速; P 控制; 模糊自适应 PID 控制; 双闭环控制; 仿真

**中图分类号:** TD672

**文献标识码:** B

Speed regulation System of BLDC Motor Based on P-Fuzzy Self-adaptive PID Control

LIU Xingyan, SHANGGUAN Xuannfeng, DONG Yangyang, ZHANG Haixun

(School of Electrical Engineering and Automation of Henan Polytechnic University,

Jiaozuo 454003, China)

收稿日期: 2010-03-17

基金项目: 河南理工大学开放实验室基金项目(SKJA09040)

作者简介: 刘兴艳(1982-), 女, 贵州贵阳人, 河南理工大学电气

工程与自动化学院在读硕士研究生, 主要研究方向为无刷直流电动机的控制。E-mail: luckyxing10@163.com

## 4 结语

根据以上理论分析和实验仿真可得出以下结论:

(1) 与傅里叶变换相比, 小波变换具有良好的时频局部化能力, 能够有效地分析非平稳信号, 因此, 非常适合输电线路故障暂态信号的检测。正是基于这样的考虑, 在用小波包分析时, 很好地获取到了故障瞬间的突变量发生的时刻和幅值, 为下一步配电网的故障定位研究提供了理论依据。

(2) 在故障瞬间的第一个周波内, 故障线路与健全线路的模电压、电流信息量有本质区别, 利用这一特点得到的零模功率可以和零模电压一起构成反时限保护元件, 可极大地提高配电网继电保护的可靠性。

## 参考文献:

[1] TIAN Shu, WANG Xiaowei, WANG Juanjuan,

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

Research on Wavelet Neural Network for Fault Location in Power Distribution Network [C]// Proceeding of Chinese Intelligent Automation Conference, 2009, Nanjing: 21-28.

- [2] FAN Chunju, LI K K, CHAN W L, et al. Application of Wavelet Fuzzy Neural Network in Locating Single Line to Ground Fault (SLG) in Distribution Lines [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2007, 29(6): 497-503.
- [3] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [4] SHU Hongchun, XIAO Bai. An Novel Fault Line Selection Algorithm of Single phase Ground Faults in Ungrounded Neutral System Using Wavelet Transform [C]// Proceedings of International Conference on Power System Technology, 2002: 2532-2536.
- [5] 王艳松, 解飞. 配电网单相接地保护的研究[J]. 高压技术, 2008, 34(2): 303-307.