

## 配电网选线和测距新方法研究

赵化时<sup>1</sup>, 姚李孝<sup>2</sup>, 柯丽芳<sup>2</sup>, 伍利<sup>2</sup>

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210061; 2. 西安理工大学电力工程系, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 配电网由于分支多, 发生故障后, 过渡电阻大, 不容易正确选线和准确测距。利用一套高采样率的电流互感器和一套常规的电压互感器实现多馈线系统选线和测距。在所有线路的长度已知的情况下, 利用小波变换获取电流暂态行波, 根据暂态行波波头计算出各个波头对应的距离; 根据已知的线路的长度进行排除, 找出故障线路; 给出故障点的位置和故障线路。ATP 仿真结果表明, 该方法在配电网发生单相接地故障时, 能够正确选出故障线路并且准确地测得故障点的位置, 且不受过渡电阻和系统运行方式的影响。

**关键词:** 故障选线; 行波测距; 阻抗法测距; 小波分析

### A novel method for fault line selection and location in distribution system

ZHAO Hua-shi<sup>1</sup>, YAO Li-xiao<sup>2</sup>, KE Li-fang<sup>2</sup>, WU Li<sup>2</sup>

(1. NARI Technology Development Co., Ltd, Nanjing 210061, China;

2. Department of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Since there are many bifurcations and large transient resistance in distribution system (DS), traditional fault location algorithm cannot get the correct location and fault line selection when fault. A set of high-sampling-rate CT and a set of conventional PT are used to realize multi-feeder system's fault selection and location. On the condition that the lengths of all lines are known, using wavelet transform to acquire the transient current traveling wave, and using the transient traveling wave head to calculate the distance between each wave head differing with the first wave head; then adopting the known line length to exclude sound feeders, thereby to find fault distance and select the fault line. ATP simulation show that when single phase ground fault in distribution system the algorithm proposed in this paper is accurate for fault line selection and location and immune to transient resistance and system operation mode.

**Key words:** fault line selection; traveling wave fault location; impedance fault location; wavelet analysis

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)16-0006-05

## 0 引言

配电网故障中单相接地故障发生的概率最高, 约占故障总数的 80%。配电网分支多, 结构复杂, 发生接地故障时, 过渡电阻较大, 电弧不稳定, 故障发生后, 很难快速准确地选出故障线路和算出故障距离, 导致不能快速实现线路的相关保护, 尽管规程规定发生单相接地故障后可以继续运行 1~2 个小时<sup>[1]</sup>, 但网络馈线较多, 电容电流较大, 故障电弧不稳定, 长时间运行可能引起复故障。所以, 单相接地故障发生后, 准确迅速地选出故障线路、准确测出故障位置, 及时处理故障, 是保证配电网安全运行, 提高电能质量的一个重要途径。

近年来, 配网自动化得到快速发展, 许多行之

有效的方法被用到了配电网的故障选线<sup>[2]</sup>和测距上<sup>[3-5]</sup>。但是, 这些方法在实际应用中, 需在每条馈线上安装高速采集单元, 导致系统成本过高。为了降低配网投资, 本文考虑只在进线端安装一组高采样率的电流互感器和在母线端安装一组电压互感器实现多馈线系统的选线和测距。在已知所有线路长度的条件下, 利用故障的暂态行波波头计算出各个波头对应的距离, 然后, 根据已知的线路的长度进行排除, 找出故障距离, 最后, 选出故障线路。

## 1 暂态行波的提取

小波变换作为新兴的数字信号处理工具, 最大的特点就是具有良好的时频局部化能力。能够同时从时域和频域描述奇异信号的每一个细节, 故障产

生的行波是一种非平稳变化的高频信号,因此通过小波变换处理行波信号,可以有效地找出突变点。

电流行波是一种具有突变性质的非平稳变化的信号,突变点标志着行波到达检测点。分析这种突变信号,检测其突变点,小波变换<sup>[6]</sup>是一个非常有效的工具。

设行波信号(电压量或电流量)为 $f(t)$ ,母小波 $\psi(t)$ ,则 $f(t)$ 的小波变换如下:

$$WT_x(a, \tau) = \int f(t) \cdot \psi_{ar}(t) dt \quad (1)$$

其中 $\psi_{ar}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi(\frac{t-\tau}{a})$ 是母小波的位移与尺度伸缩。

当 $a$ 取 $2^k$  ( $k \in Z$ ),该变换称为二进制小波变换。本文选用3次样条函数的导函数作为母小波。

## 2 测距及选线原理

### 2.1 电流行波传播分析

根据行波理论<sup>[7]</sup>,线路发生故障时在故障点产生向线路两端传播的行波,在阻抗不连续点行波会发生反射和折射现象。图1中, $L_1$ 阻抗为 $Z_1$ , $L_2$ 阻抗为 $Z_2$ , $Z_1 \neq Z_2$ ,假设一个直角电流波侵入 $L_1$ ,则在节点A产生折射波和反射波。此时,电流的折射系数 $\gamma_i$ 和反射系数 $\rho_i$ 分别为:

$$\begin{cases} \gamma_i = 2Z_1 / (Z_1 + Z_2) \\ \rho_i = (Z_1 - Z_2) / (Z_1 + Z_2) \end{cases} \quad (2)$$

当 $Z_2 \rightarrow \infty$ 时,式(2)只剩反射系数

$$\rho_i = (Z_1 - Z_2) / (Z_1 + Z_2) = -1 \quad (3)$$

式(3)表明当 $Z_2 \rightarrow \infty$ 时,入射波会在A点发生全反射。

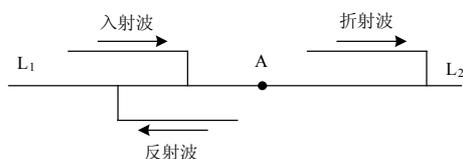


图1 行波的折射和反射

Fig.1 Refraction and reflection of traveling wave

### 2.2 阻抗法测距原理

阻抗法<sup>[8]</sup>简单易行,尽管受过渡电阻、线路分布电容、暂态分量等影响,不能精确获取测距结果,但阻抗法具有较高的鲁棒性。为了提高测距的鲁棒性,应考虑添加阻抗法作为测距参考。

图2为集中参数 $R, X$ 模型,设母线端基波电压为 $\dot{U}$ ,流过保护处的基波电流为 $\dot{I}$ ,可以表示为实部和虚部的形式。

$$\begin{cases} \dot{U} = U_R + jU_I \\ \dot{I} = I_R + jI_I \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)求出阻抗

$$Z = R + jX = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U_R + jU_I}{I_R + jI_I} = \frac{U_R I_R + U_I I_I + j(I_I U_R + I_R U_I)}{I_R^2 + I_I^2} \quad (5)$$

由于过渡电阻的纯电阻特性,对于均匀分布的线路,根据单位长度的电抗,通过式(5)虚部可以计算出故障点的位置。

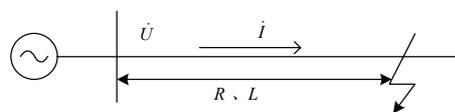


图2 线路的集中参数模型

Fig.2 Model of lumped parameters line

### 2.3 配电网行波测距原理

配电网由于其特殊性,一般只能利用单端测距法。故障点F发生接地故障,行波由F点传播到母线M点的时间 $t_1$ ,到达M点发生折反射,折射波经故障点后再次返回M点的波头时间 $t_2$ 。根据行波理论<sup>[9]</sup>,假设波速为 $v$ ,则测量点到故障点的距离:

$$l_{MF} = v \cdot (t_2 - t_1) / 2 \quad (6)$$

### 2.4 配电网选线原理

图3为单母线4回出线的配电网发生接地故障的等效模型。故障发生后F点将产生沿线路两端传播的故障行波。故障行波传播到母线端,由于母线端阻抗不连续,会发生折反射。折射波传播到健全线路,在线路的末端遇到变压器,由于变压器等效作用,此时末端等效阻抗远大于线路的阻抗,根据式(3)折射波在线路末端会发生全反射,在母线端经过一定的时延后,可以接收该全反射行波波头。利用此时间差,代入式(6),算出对应线路的距离。

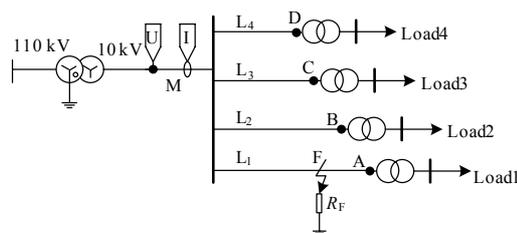


图3 单母线4回线路接地的等效模型

Fig.3 Equivalent model of single bus and quadruple circuit

当故障行波由F点向A点传播,经过A端的变

压器反射回来,其中一部分能量在F点折射到M点。故障点F存在接地电阻,使得折射到母线端的行波信号所剩无几。理论分析和仿真结果表明,该行波波头和健全线路的波头在幅值上有明显的差别。

综上,对于单母线N回出线的系统,系统发生接地故障后,在测量端可以接收到故障行波一系列的波头。假设故障线路长 $L_m$ ,在距母线端 $x$ 处发生故障,其余线路长 $L_i$  ( $i=1, \dots, N, i \neq m$ ),行波波速 $v$ ,母线端接收到第一个故障行波波头的时刻设为零时刻。测量端会在以下时间收到故障线路的行波信号:

$$\begin{cases} t_1 = 2(L_m - x)/v \\ t_2 = 2x/v \\ t_3 = 2L_m/v \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: $t_1$ 是电流行波由故障点流向负荷端,经过负荷变压器反射后到达母线端的时间; $t_2$ 是故障行波从母线流向故障点后经故障点反射回母线端的时间; $t_3$ 是故障行波从母线流向负荷端后经负荷变压器反射回母线端的时间。

故障行波到达母线后,折射到健全线路上,在各健全线路的末端经负荷变压器反射回母线端,这个阶段的时间分别为:

$$t_i = 2L_i/v \quad (i=1, \dots, N, i \neq m) \quad (8)$$

### 2.5 配电网选线和测距流程

基于以上选线和测距原理的思想,本文选线和测距步骤如下:

- (I) 利用小波变换提取出暂态电流行波;
- (II) 对暂态电流作相模变换,得到零序分量,对该分量做小波变换;
- (III) 利用式(5)计算接地故障时系统零序网络等效阻抗;
- (IV) 通过小波处理后的奇异点求出与之相应的距离;
- (V) 将(IV)获得的距离与线路长度进行对比,如果步骤(IV)获得的距离与线路的距离非常接近,则考虑故障位于线路末端,此时利用阻抗法获得故障距离,同时利用此故障距离还可选出故障线路;
- (VI) 如果步骤(IV)获得的距离与线路的距离有不同,根据式(7),必然存在与之对应的另一

个距离,利用这两个距离选出故障线路,并给出故障距离。

测距及选线流程如图4。

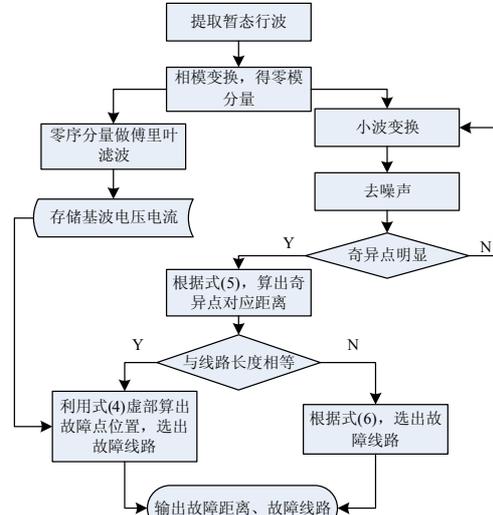


图4 测距及选线流程图

Fig.4 Flow chart of fault location and line selection

### 3 仿真分析

图3所示的配电网,线路 $L_1=13$  km, $L_2=9$  km, $L_3=4$  km, $L_4=6$  km,线路参数 $Z_0=(0.23+j1.72)$   $\Omega/\text{km}$ , $b_0=j1.884$   $\mu\text{s}/\text{km}$ ,零模波速 $v_0=1.745 \times 10^5$  km/s,采样率为1 MHz。故障线路 $L_1$ 故障点距离母线10 km。假设此时的过渡电阻为10  $\Omega$ ,在测量端获取的电流暂态波形如图5。

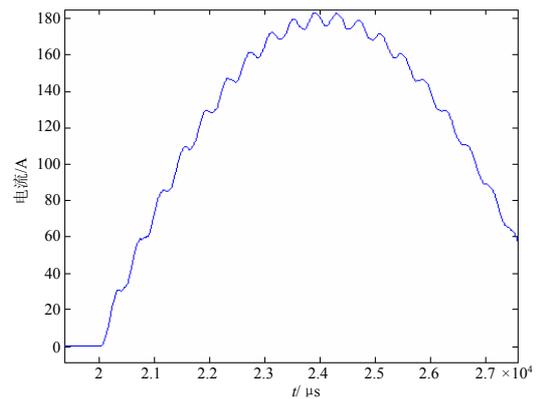


图5 单相接地故障电流暂态波形

Fig.5 Transient current figure at single phase grounded

首先,利用集中参数模型,根据傅里叶算法获取故障的零序基波电流和电压,代入到式(5),求出故障时系统零序阻抗 $Z=(12.9281+j18.9188)$   $\Omega$ 。由于变压器二次侧的零序分量在一次侧的等效阻抗很大,根据电路并联原理,故障时系统阻抗接近故

障线路的阻抗。利用式 (5) 的虚部得到测距值： $x=18.9188/1.72=10.99 \text{ km} \approx 11 \text{ km}$ 。

接下来, 对图 5 所示的暂态零模电流做小波变换, 选三次样条作为小波基。图 6 是经过 2 次小波处理后的波形。

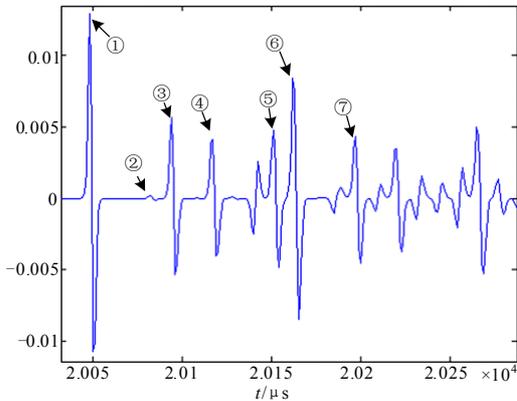


图 6 小波分解后的暂态电流波形

Fig.6 Transient current figure after wavelet decomposing

图 6, ①点和后续各点之间对应的时间差及对应距离如表 1, 表 1 最后一行是各点对应的时差与速度的乘积。

表 1 图 6 中第一点和其余点的时间长度和对应距离

Tab.1 Time difference and distance between first dot and others in Fig.6

奇异点	1	2	3	4	5	6	7
时间/ $\mu\text{s}$	20 048	20 082	20 094	20 117	20 151	20 162	20 197
与①时差	—	34	46	69	103	114	149
与①距离	—	5.93	8.03	12.04	17.97	19.89	26.00

结合图 3 分析可知, 点①对应于故障发生后检测到的第一个行波波头, 对应的传播线路为  $F \rightarrow M$ , 此段距离 10 km, 此时故障行波已经到达测量点, 接下来该点将会产生反射现象。点①、②之间的时间差求出这两点对应的实际线路距离为 6 km, 对应的传播路径为  $F \rightarrow A \rightarrow F \rightarrow M$ 。点①、③求出这两点对应的实际线路距离为 8 km, 传播路径为  $M \rightarrow C \rightarrow M$ 。点①、④求出这两点对应的实际线路距离为 12 km, 传播路径为  $M \rightarrow D \rightarrow M$ 。点①、⑤求出这两点对应的实际线路距离为 18 km, 传播路径为  $M \rightarrow B \rightarrow M$ 。点①、⑥求出这两点对应的实际线路距离为 20 km, 传播路径为  $M \rightarrow F \rightarrow M$ 。点①、⑦求出这两点对应的实际线路距离为 26 km, 传播路径为  $M \rightarrow F \rightarrow A \rightarrow M$ 。

通过公式 (7)、(8) 和线路长度, 可以判断出:

故障线路位于  $L_1$  上, 故障点距测量端 9.95 km, 与实际仿真结果相差 50 m。由此可见, 此方法不但可以准确选线, 而且具有非常高的测距精度。

表 2 分别对  $L_1$  各段进行仿真, 仿真结果再次表明本方法的可靠性和准确性。

表 2  $L_1$  各段测距和选线结果

Tab.2 Segment fault location and fault line selection

距离/km	2	3	4	5	6
测距结果/km	2.01	2.97	4.01	5.06	6.02
故障线路	$L_1$	$L_1$	$L_1$	$L_1$	$L_1$
距离/km	7	8	9	11	12
测距结果/km	6.98	7.94	8.99	10.99	11.95
故障线路	$L_1$	$L_1$	$L_1$	$L_1$	$L_1$

图 7 是故障发生在  $L_1$ , 故障点分别距母线 4 km 和 9 km 小波处理后的波形, 因为线路  $L_2, L_4$  的助增效应, 从图中可见 9 km 和 4 km 的时间点上的幅值明显大于其他健全线路对应的幅值。

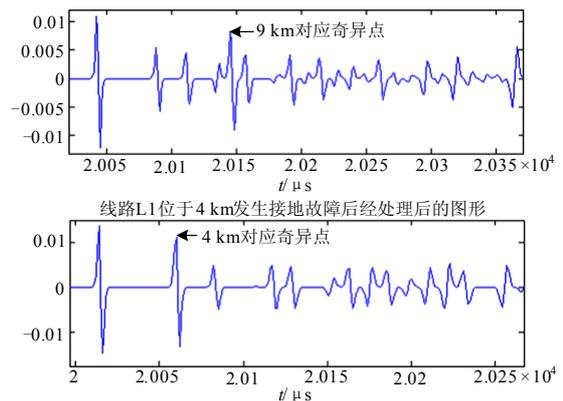


图 7 经过处理后的 4 km 和 9 km 故障波形

Fig.7 4km and 9 km fault wave after processing

表 3 和图 8 的仿真结果表明, 当接地故障位于馈线出线口时, 本方法照样可以正确地选线和准确的计算出故障点位置。

表 3 故障位于线路距母线 1 km 测距和选线结果

Tab.3 Fault location and fault line selection result where the fault is occurred 1 km after busbar

线路	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$
故障距离/km	0.96	0.96	0.96	0.96
选线结果	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$

图 8 是经过小波处理后不同线路发生接地故障波形。根据选线公式 (7), 分别找出故障线路所对应的两个奇异点的位置并在图 8 上标示出来。由此可见, 采用公式 (7) 不但可以准确地选线, 而且, 还能校验选线结果是否准确。

当接地故障发生在线路末端，利用行波法只能得到线路的距离以及线路整数倍的距离，所以，仅利用故障行波不能判断出故障位置和故障线路。应该根据公式(5)算出系统的阻抗，利用阻抗法算出故障点位置，因为故障位于线路末端，所以，获得故障点位置也就同时找到故障线路。图9给出了线路L<sub>3</sub>末端发生接地故障，经过小波处理后的波形。

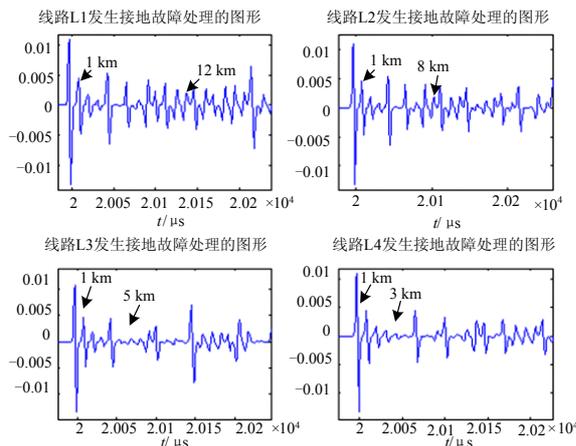


图8 经过处理后的4 km和9 km故障波形

Fig.8 Fault wave at 4 km and 9 km after processing

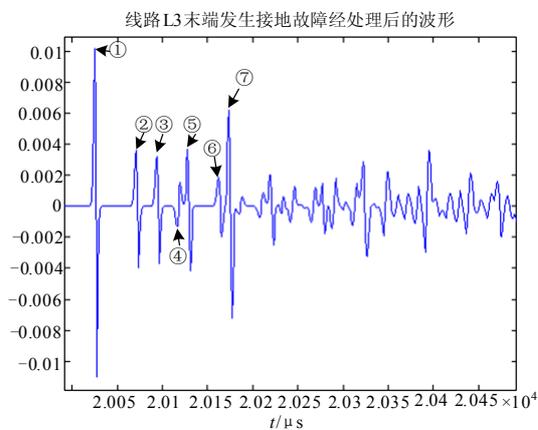


图9 线路L<sub>4</sub>末端发生接地故障处理后的波形

Fig.9 Processed fault wave at the end of L<sub>4</sub> line

图9中，点①为故障初始行波到达测量端的时刻，点②、③、⑤、⑦分别对应L<sub>4</sub>、L<sub>3</sub>、L<sub>2</sub>和L<sub>1</sub>的长度，点④对应线路2×L<sub>4</sub>的距离，点⑥对应2×L<sub>3</sub>的距离。由式(5)算出故障距离为7.8 km，通过查表4，可以判断是线路L<sub>4</sub>发生故障。

表4 故障位于各条馈线末端系统的零序等效阻抗  
Tab.4 Equivalent system zero-sequence impedance when grounded fault occurring at the end of feeder

线路	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>
电阻/Ω	13.656 8	12.732 8	11.889 4	11.355
电抗/Ω	24.360 9	17.084 5	11.525 3	7.800 4

表4是根据图3的系统参数，在各条馈线末端发生故障后，利用阻抗法获得的系统零序阻抗。

### 4 结论

仿真结果验证了本文所提出基于配网故障测距和选线新方法的正确性，具体结论如下：

- 1) 利用本文提出排除法选线和测距，只需一套高速电流采集装置和一套电压采集装置。
- 2) 在线路始端和末端发生接地故障时，本方法仍然可以获得测距和选线结果。
- 3) 本方法可以对选线结果进行自检，具有非常高的鲁棒性。
- 4) 在分支线路较多的网络中，发生故障时行波信号微弱，如何剔除噪声、识别行波信号，还有待进一步研究。

### 参考文献

- [1] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理 [M]. 三版. 北京: 中国电力出版社, 1994.  
HE Jia-li, SONG Cong-ju. Power system relay protection [M]. 3rd edition. Beijing: China Electric Power Press, 1994.
- [2] 施慎行, 董新洲. 基于单相电流行波的故障选线原理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (14): 13-16.  
SHI Shen-xing, DONG Xin-zhou. Study of fault line selection using single-phase current traveling waves[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (14): 13-16.
- [3] 于盛楠, 杨以涵, 鲍海. 基于C型行波法的配电网故障定位的实用研究[J]. 继电器, 2007, 35 (10): 1-4.  
YU Sheng-nan, YANG Yi-han, BAO Hai. Study on fault location in distribution network based on C-type travelling-wave scheme [J]. Relay, 2007, 35 (10): 1-4.
- [4] Evrenosoglu C Y, Abur A. Travelling wave based fault location for teed circuits[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20 (2): 1115-1121.
- [5] Salim R H, de Oliveira K, Filomena A D, et al. Hybrid fault diagnosis scheme implementation for power distribution systems automation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23 (4): 1846-1856.
- [6] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.  
YANG Fu-sheng. Engineering analyses and application of wavelet transform[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [7] 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.

## 5 结论

本文提出了一种适合于四桥臂三相四线并联型 APF-STATCOM 装置的谐波、无功和不平衡电流的检测方法, 它能在电网电压不平衡或畸变时准确检测出基波正序有功电流和无功电流; 并以此方法为基础, 给出了一种能在电网电压不理想和负载不对称且非线性的条件下对基波正序无功功率进行独立补偿的控制方案。仿真结果验证了本文所提检测方法与控制方案能在同一装置上用同一原理同时实现谐波抑制、无功和负载不平衡补偿这几种功能, 而且具备良好的动态特性和快捷的无功阶跃响应。

## 参考文献

- [1] Lamedica R, Esposito G. A survey on power quality cost in industrial loads[C].//IEEE Winter Power Meeting. 2001: 938-943.
- [2] 陈国柱, 吕征宇, 钱照明. 有源电力滤波器的一般原理及应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 17-21.  
CHEN Guo-zhu, Lü Zheng-yu, QIAN Zhao-ming. The general principle of active filter and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 17-21.
- [3] 栗春, 马晓军, 姜齐荣, 等. 用 STATCOM 改善系统电压调节特性的动模实验[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(9): 46-49.  
LI Chun, MA Xiao-jun, JIANG Qi-rong, et al. The experimental research on STATCOM to mitigate the voltage sag under load disturbance[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(9): 46-49.
- [4] Aredes M, Hafner I, Heumann K. Three-phase four-wire shunt active filter control strategies[J]. IEEE Trans Power Electron, 1997, 12(2): 311-318.
- [5] Peng F Z, Ott G W, Adams D J. Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems[J]. IEEE Trans Power Electron, 1998, 13(5): 1174-1181.
- [6] JIN Tao-tao, CHEN Xiao-fan, Smedley K M. A new one-cycle controlled FACTS element with the function of STATCOM and active power filter[C].//Industrial Electronics Society, 2003. IECON'03. The 29th Annual Conference of the IEEE. 2003: 2634-2638.
- [7] Ucar M, Ozdemir E, Kale M. An analysis of three-phase four-wire active power filter for harmonic elimination reactive power compensation and load balancing under non-ideal mains voltage[C]. // Proc of the 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC. 2004:3089-3094.
- [8] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Instantaneous reactive power compensators compromising switching devices without energy storage components[J]. IEEE Trans on Ind Appl, 1984, 20(3): 625-630.
- [9] Takeda M, Ikeda K, Teramoto A, et al. Harmonic current and reactive power compensation with and active filter[C].//IEEE PESC'98. Fukuho-ka(Japan): 1998: 1174-1179.
- [10] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制与无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 216-230.
- [11] 孙驰, 魏光辉, 毕增军. 基于同步坐标变换的三相不对称系统的无功与谐波电流的检测[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 43-48.  
SUN Chi, WEI Guang-hui, BI Zeng-jun. Detection for reactive and harmonic currents of unbalanced three-phase systems based on synchronous reference frame transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 43-48.
- [12] 马惠, 刘静芳. 基于瞬时无功功率理论的三相电路谐波、无功和不平衡电流检测[J]. 四川电力技术, 2004 (4): 4-7.  
MA Hui, LIU Jing-fang. Detection for harmonic, reactive and unbalanced currents in three-phase systems based on instantaneous reactive power theory[J]. Sichuan Power Technology, 2004(4): 4-7.
- [13] 罗承廉, 纪勇, 刘遵义. 静止同步补偿器(STATCOM)的原理与实现[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

收稿日期: 2010-02-06; 修回日期: 2010-04-03

作者简介:

刘海波(1976-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为风力发电技术及大功率电力电子技术在电力系统中的应用; E-mail: liucaifan@yahoo.com.cn

毛承雄(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 从事大型同步发电机最佳励磁控制、大功率电力电子技术在电力系统中的应用以及电力系统动态仿真方面的研究;

陆继明(1956-), 男, 教授, 主要研究领域为电力系统运行与控制。

(上接第 10 页 continued from page 10)

GE Yao-zhong. New types of protective of relaying and fault location their theory and technigues[M]. Second edition. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007.

- [8] 陈皓. 微机保护原理及算法仿真[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

CHEN Hao. Microprocessor-based protection principle and simulation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.

- [9] 董新洲, 毕广见. 配电线路暂态行波的分析和接地选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (4): 1-6.

DONG Xin-zhou, BI Guang-jian. Analysis on transient traveling wave and study on fault line selection for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (4): 1-6.

收稿日期: 2009-09-14; 修回日期: 2009-10-01

作者简介:

赵化时(1985-), 男, 助工, 主要研究方向为电力系统故障分析和诊断; E-mail: zhaohuashi@sgepri.sgcc.com.cn

姚李孝(1962-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为电力系统规划与运行。