

DOI: 10.7667/PSPC170142

一种用于配电网故障数据自同步的故障时刻检测方法

李娟¹, 高厚磊², 弓新月¹, 孔祥平¹, 高磊¹

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南 250061)

摘要: 配电网故障数据自同步算法以故障发生时刻为基准, 不依赖于外部对时装置, 不受数据通信传输路径与通信信道延时的影响, 可以在较低成本的情况下实现故障数据的同步。而精确的故障发生时刻检测是实现故障数据自同步的关键。为此提出了适用于故障数据对时同步的故障时刻精确检测方法。该方法首先利用故障信号构造Hankel矩阵, 对故障信号进行分解, 得出细节信号, 最后结合模极大值法求解故障数据的奇异点, 即故障发生时刻。仿真结果表明, 该方法可以有效降低因故障检测延时不同导致的同步误差, 且具有较高稳定性。

关键词: 电流差动保护; 对时同步; 故障时刻; Hankel矩阵

A novel fault instant detection scheme for fault data self-synchronization method in distribution network

LI Juan¹, GAO Houlei², GONG Xinyue¹, KONG Xiangping¹, GAO Lei¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China; 2. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education (Shandong University), Jinan 250061, China)

Abstract: In distribution network, fault data self-synchronization method which takes the fault instant for reference can realize fault data self-synchronization without external time identifying facility, which makes a low investment. And it is also little affected by data communication channel or channel time delay. However, the precise detection of fault instant relates to the self-synchronization error directly. Therefore, a fault instant detection scheme for fault data self-synchronization method in distribution network is proposed. In this scheme, fault data is used to form Hankel matrix and Singular Value Decomposition (SVD) is used to decompose signals. In this way, detail signals reflecting singularity can be gained. And then singular point, i.e. fault instant, can be obtained by modulus maximum method. The simulation results verify that this scheme proposed can effectively reduce synchronous error caused by different delay of fault detection and has a high stability.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Study on the Relay Protection Techniques in Distribution Network with High Permeability of Distributed Generation” and Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd “Research and Demonstration of Fault Location Technology with High Efficiency based on Multi-source Information”.

Key words: current differential protection; time synchronization; fault instant; Hankel matrix

0 引言

配电网直接面向用户, 其供电可靠性直接关系到社会的稳定和经济的发展。随着高新技术的发展,

基金项目: 国家电网公司科技项目“适应高渗透率分布式电源接入的配电网继电保护技术研究”; 国网江苏省电力公司科技项目“基于多源信息的配网高效故障定位技术与示范应用”

尤其是敏感负荷的出现使得用户对电能质量的要求越来越高。为保证用户供电电能质量, 在一些重负荷且负荷密度大的工业园区, 配电网采用闭环运行模式, 如目前应用较多的“花瓣型”网架结构^[1-2]。在闭环运行的配电网中, 其环网线路和联络线多配置光纤差动保护^[3]。

另一方面, 随着可再生能源技术的迅速发展以及相关政策的激励, 大量的、分散的可再生能源亦接入中压配电网中, 可有效提高可再生能源的利用

率。但配电网的网架却发生了改变,变为一多端、多源的配电网。在含高渗透率可再生能源的配电网中,现有保护显然不再适用,为保证配电网的可靠运行,一些专家学者提出了类电流差动保护的保护方案^[4-9]。

电流差动保护因其绝对选择性,是解决未来配电网保护问题的有效方法之一。但电流差动保护基于基尔霍夫定律,需要各端数据的数据传输与对时同步。对于数据传输,由于配电网网络结构庞大、节点多,铺设专用信道进行数据传输不够经济,而复用 SCADA 信道的通信方式可以满足数据传输需求,因此在配电网中获得了应用。对于数据对时同步,不同于输电网,配电网复用 SCADA 信道进行通信,数据收发延时不一致,会影响基于通信通道的对时同步方法的对时精度,采用 GPS 法投资大,不利于电流差动保护的大范围推广应用^[10-11]。可见,故障数据对时同步成为电流差动保护应用需要解决的关键技术之一。

为解决上述问题,文献[12]结合配电网的结构提出了基于故障时刻的故障数据自同步方法,可以在不增加额外设备的情况下实现故障数据的近似同步。该算法本质是以故障发生时刻为对时同步标准,但故障检测延时(故障发生时刻到保护装置检测到故障的时间)不可避免,目前多以保护装置检测到故障的时刻(保护启动时刻)代替故障发生时刻来实现对时同步,其应用前提是保护区段两端的故障检测延时时间差在允许范围内。该同步方法不受通信路径以及通信信道收发延时的影响,可实现故障数据的近似同步。但文献[13]的分析表明,利用保护装置的启动时刻进行数据同步时,会存在两端故障检测延时时间差较大的情况。当该误差大于对时同步误差允许裕度时,则可能导致保护的拒动。

可见,精确的故障时刻检测,是保证故障数据对时同步精度的关键。为此本文提出了一种适用于对时同步的故障时刻精确检测方法。该方法结合奇异值分解法零相位偏移的特性^[14-17],利用故障信号构成 Hankel 矩阵,并结合模极大值法获得奇异点,即故障发生时刻,以该奇异点作为对时同步参考标准,可降低因故障检测延时不同导致的对时同步误差,可提高故障数据的对时同步精度,有利于电流差动保护在配电网中的应用。

1 配电网故障数据自同步原理及误差分析

1.1 故障数据自同步原理

当配电线路发生故障后,故障点虚拟电源会产生电磁波,并由故障点向线路两端传播,两端保护

装置经过一定的时间后检测到线路发生了故障。由于配电线路较短,电磁波由故障点传播到两端检测点的时间差可以忽略,当两端保护启动元件的启动延时时间差在允许范围内时,可以认为两端检测点检测到故障的时刻(保护启动时刻)为同一时刻,以该时刻为对时同步标准,可实现故障数据的近似同步。电流差动保护的实现是以保护启动时刻为对时同步标准,计算保护相关电气量并传送给对侧保护装置。

1.2 误差分析

以图 1 为例分析说明故障数据自同步算法的同步误差来源以及误差大小。图中 t_0 为故障发生时刻, t_{ycM} 为 M 侧保护启动元件检测到故障的时刻,即 M 侧保护启动时刻, $t_{ycM} - t_0$ 即为 M 侧故障检测延时, t_{ycN} 为 N 侧保护启动元件检测到故障的时刻, $t_{ycN} - t_0$ 即为 N 侧故障检测延时, Δt 为两端故障检测延时时差。

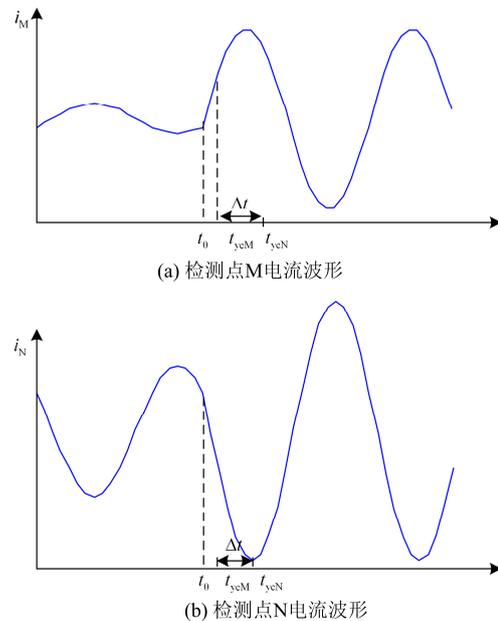


图 1 故障数据自同步原理

Fig. 1 Fault data self-synchronization principle

假设保护启动元件能在故障后第一时间检测到故障,即 MN 两端保护启动元件均能在 t_0 时刻检测到故障,此时两端故障检测延时均为 0, Δt 为 0,因故障检测延时造成的同步误差为 0。

而在实际应用中,故障检测延时不可避免。以图 1 为例,当两端检测到的故障时刻分别为 t_{ycM} 和 t_{ycN} 时,两端故障检测延时时间不同, Δt 不为 0,因故障检测延时不同导致同步误差不为 0。

可见,故障数据自同步算法的同步误差是由故

障检测延时不同造成的,故障数据自同步误差即为两端保护启动元件的故障检测延时时间差。故障数据自同步算法成立的前提之一是两端保护元件的故障检测延时时间差在允许范围内。对于差动保护区,当为区外故障时,由于流经差动保护区两端保护装置的短路电流为穿越性电流,可认为两端保护的故障检测延时基本一致,自同步误差基本为 0,保护不会误动。但对于区内故障,流经差动区两端保护装置的短路电流具有一定的独立性,很可能出现两端故障检测延时不一致的情况。尤其是过渡电阻较大的情况,短路电流较小,会增加保护装置的故障检测延迟时间。当两端故障检测延时时间差大于对时同步误差的允许范围时,保护可能拒动^[10]。

由上述分析可知,精确的故障时刻检测可以有效提高故障数据自同步精度,保证保护动作可靠性。为此,本文结合奇异值分解法零相位偏移的特性,提出一种适用于故障数据对时同步的故障时刻精确检测算法。该方法首先利用故障数据构造 Hankel 矩阵,并结合模极大值法获取有效奇异点,即故障发生时刻,并以该奇异点作为对时同步标准,可降低因故障检测延时不同导致的同步误差,提高故障数据的自同步精度。

2 基于 Hankel 矩阵的奇异值分解

2.1 奇异值分解

由奇异值分解理论^[18]可知,对于一个实矩阵 $A \in \mathbf{R}^{m \times n}$,必定存在正交矩阵 $U=[u_1, u_2, \dots, u_m] \in \mathbf{R}^{m \times m}$ 和正交矩阵 $V=[v_1, v_2, \dots, v_n] \in \mathbf{R}^{n \times n}$,使得

$$A = USV^T \quad (1)$$

$$S = \begin{cases} (\text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_q), \mathbf{O}) & m \leq n \\ (\text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_q), \mathbf{O})^T & m > n \end{cases} \quad (2)$$

式中: $S \in \mathbf{R}^{m \times n}$; \mathbf{O} 代表零矩阵; $q = \min(m, n)$, 且有 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_q > 0$, $\sigma_i (i=1, 2, \dots, q)$ 为矩阵 A 的奇异值。矩阵 A 由故障信号构成,信号的奇异性与信号本身或信号某阶导数在某一时刻存在突变相关,该突变点即是信号的奇异点,可用 Lip 指数来描述突变的强弱。

在奇异值分解过程中,矩阵 A 的构成方式有多种,如 Toeplitz 矩阵, Cycle 矩阵, Hankel 矩阵等,也可以用连续阶段信号来构造矩阵^[15]。矩阵构造方式的不同,奇异值分解法对信号的处理效果就不一样。根据文献^[15]的研究发现,当采用 Hankel 矩阵时,奇异值分解法对信号奇异点的检测效果最好。

2.2 基于 Hankel 矩阵的故障信号重构

设离散故障信号 $X=[x_1, x_2, \dots, x_N]$, 利用此信号

构造 Hankel 矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_{n+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{N-n+1} & x_{N-n+2} & \cdots & x_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $1 < n < N$ 。令 $m = N - n + 1$, 则 $A \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 。

由式(3)可以看出,矩阵 A 的第一行分量和最后一列分量首尾相接即为原始的故障信号。

利用奇异值分解法对信号进行分离,式(3)可变形为

$$A = \sigma_1 u_1 v_1^T + \sigma_2 u_2 v_2^T + \cdots + \sigma_q u_q v_q^T = A_1 + A_2 + \cdots + A_q \quad (4)$$

式中: $u_i \in \mathbf{R}^{m \times 1}$; $v_i \in \mathbf{R}^{n \times 1}$, $i=1, 2, \dots, q$, $q = \min(m, n)$ 。

令 $A_i = \sigma_i u_i v_i^T$, $A_i \in \mathbf{R}^{m \times n}$, 可得

$$A_i = \begin{bmatrix} x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{in} \\ x_{i2} & x_{i3} & \cdots & x_{i(n+1)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{i(N-n+1)} & x_{i(N-n+2)} & \cdots & x_{iN} \end{bmatrix} \quad (5)$$

令 $P_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}, (x_{i(n+1)}, x_{i(n+2)}, \dots, x_{iN})^T]^T$, 则结合式(3)和式(5), 原离散信号可表示为

$$X = \sum_{i=1}^q P_i$$

可见,奇异值分解是将信号拆分为一系列分量信号,即表示信号细部特征的细节信号和反映信号主体的近似信号。 P_i 即为故障信号在不同尺度上的分解,是对原始信号的一种简单线性叠加, P_1 为近似信号, P_2 、 P_3 等为细节信号,可用于信号奇异点的检测。由于奇异值分解在信号奇异性检测时,不同分量具有不同奇异性指数的奇异点,各分量具有递增的消失矩特性,且各分量中指示的奇异点位置和脉冲宽度始终保持不变,即分解结果具有零相位特性,这对于故障时刻的确定是十分关键的。因此,在故障时刻的精确识别中,奇异值分解法是一种十分值得推荐的奇异性检测算法。

2.3 故障发生时刻的确定

故障发生时刻的确定即为短路电流奇异点的求取过程。由于需要精确地确定奇异点的位置,因此表征奇异点位置的脉冲宽度越窄越好。又因为故障信号本身为一正弦信号,因此奇异值分解处理后的分量中,第二层细节信号 P_2 中仍存在较大的正弦信号,细节信号 P_2 中的奇异性不明显。因此在故障时刻的奇异性检测中, Hankel 矩阵的列数选为 3, 通过奇异值分解后,计算第 3 层细节分量 P_3 的模极大

值, 进而确定奇异点位置, 即故障发生时刻。

3 仿真验证

3.1 故障发生时刻检测

利用 Matlab 建立仿真模型, 对现有保护启动元件常采用的基于相电流突变量的故障启动算法和本文所述精确故障时刻检测算法的故障启动延时进行仿真验证, 其中 $\delta = -50 \times 1/s$, 采样频率为 10 000 Hz, 以检测故障发生时刻所对应的角度(故障初始相角)代替检测故障时刻, 则不同故障发生时刻下的仿真对比如表 1 所示。

表 1 故障发生时刻的检测

Table 1 Detection of fault instant

故障初始相角/(°)	基于相电流突变量算法保护启动时刻所对应的角度/(°)	本文所述算法检测故障时刻所对应的角度/(°)
0	18.10	0.11
30	54.92	30.04
40	72.07	40.04
60	146.78	61.80
90	137.19	91.80
120	151.32	121.26
135	156.88	135.97
150	170.82	150.68
165	183.68	165.36

由表 1 的仿真结果可以看出: 采用基于相电流突变量算法检测故障时, 在某些情况下故障检测延时会较大, 如表 1 中当故障初始相角约 60° 时, 故障检测延迟角度最大约 86.78° , 约 4.8 ms 且最大故障检测延时对应的故障初始相角并非 0° ; 当采用本文所述算法进行故障时刻检测时, 最大故障检测延迟角度约为 1.8° , 约 0.1 ms, 远小于相电流突变量检测法。可见采用本文所述算法可以大大降低故障检测延时。

对于未来配电网, 受可再生能源接入的影响, 流经差动区段两端短路电流的故障初始相角可能存在较大差异。而从上述分析可以看出, 上述最大故障检测延时时间差对应的角度约为 68.68° , 大于保护对时同步误差允许范围(约 50°), 保护可能会发生拒动的情况。例如, 当故障初始相角分别为 40° 和 60° 时, 两端故障检测延时角度差为 54.71° , 大于对时同步误差允许范围。

3.2 PSCAD 仿真验证

为验证本文方法的精度, 利用 PSCAD 建立含逆变类 DG 的 10 kV 有源配电网仿真模型。其简化示意图如图 2 所示, 保护区段为 MN 区段, 线路长度为 10 km, 负荷约为 7.2 MVA, 逆变类 DG

(Distributed Generation)的额定输出电流约为 106 A, 在 $t=0.1021$ s 发生故障, 采样频率为 100 kHz, f1 点距 M 点 3 km, 过渡电阻为 1Ω 。

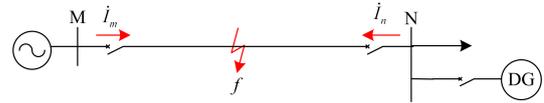


图 2 含逆变类 DG 的有源配电网示意图

Fig. 2 Active distribution network with DG integration

利用本文所述算法对区内故障保护区段两端电流信号进行奇异点检测, 其 A 相电流波形如图 3 和图 4 所示。

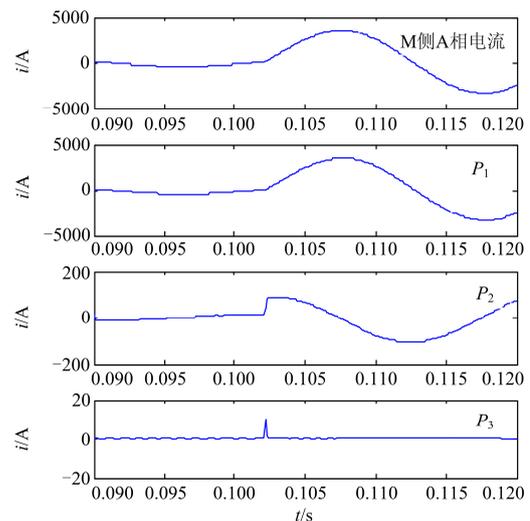


图 3 M 侧 A 相电流奇异值分解结果

Fig. 3 SVD results for current A of side M

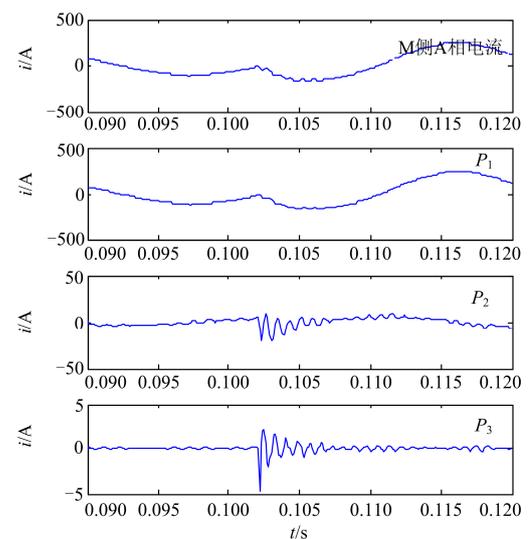


图 4 N 侧 A 相电流奇异值分解结果

Fig. 4 SVD results for current A of side N

图中, P_1 分量为近似信号, 反映原始信号的轮廓, P_2 和 P_3 为细节信号。从图 3 和图 4 可以看出, 由于故障信号本身为正弦信号, 第二细节分量 P_2 中正弦分量仍较大, 奇异性不明显, 选择第三细节分量 P_3 用于奇异点的检测效果优于 P_2 。因此利用模极大值法对 P_3 的细节信号进行分析, 可以得出图 3 和图 4 的信号均在 $t=0.1022$ s 处存在奇异点, 考虑到脉冲的宽度后, 可得故障发生时刻约为 0.1021 s。

3.3 RTDS 仿真验证

利用 RTDS 仿真软件仿照图 2 搭建有源配电网模型, 采样频率为 20 000 Hz。则在 $t=0.2210$ s 发生 AB 两相区内短路故障、故障点距 M 端 5 km, 利用本文所述算法对保护区段 MN 两端 A 相电流波形进行分析, 其分析结果如图 5 和图 6 所示。

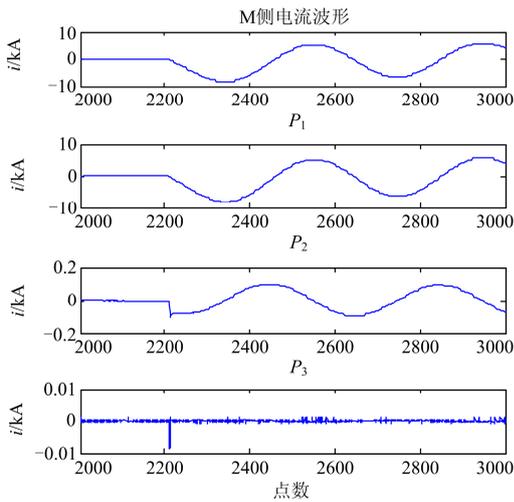


图 5 M 侧 A 相电流奇异值分解结果

Fig. 5 SVD results for current A of side M

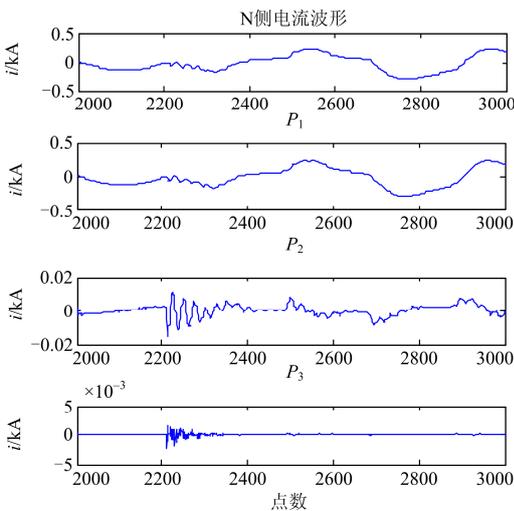


图 6 N 侧 A 相电流奇异值分解结果

Fig. 6 SVD results for current A of side N

利用第三细节分量 P_3 进行奇异点的检测, 可以确定 M 侧和 N 侧电流信号的奇异点分别为第 2210 点和第 2211 点, 对应的故障时刻分别为 0.2210 s 和 0.2211 s, 奇异点检测的误差为 1 个点。

对比上述仿真数据可以看出, 奇异值分解对信号奇异性的检测受故障信号故障前后幅值的影响。当故障信号在故障前后幅值变化不明显时, 奇异值分解对信号奇异性的检测存在误差, 但该误差远小于故障检测延时。

综上所述, 本文所述算法可以有效识别出信号的奇异点, 降低故障检测延时, 从本质上降低自同步误差。在对逆变类 DG 提供短路电流较小的情况下, 仍可以较为精确地识别信号的奇异点。

3.4 现场数据验证

利用现场实录数据对本文所述算法进行验证。该数据采样频率为 3200 Hz, 采样间隔角约为 5.6° 。图 7 为区内故障所记录的电流波形。

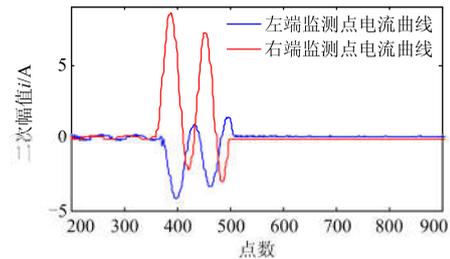


图 7 区内故障两相短路故障

Fig. 7 Fault current with double phase fault

图 7 故障电流波形表明, 该故障位置靠近于右侧电源, 两端故障电流幅值相差较大。图中左侧电流波形的故障起始点为第 371 点, 右侧电流的故障起始点为第 360 点。利用相电流突变量检测算法进行故障点识别时, 左侧和右侧保护装置的启动点分别为第 380 点和第 365 点, 两端故障检测延时分别为 2.8 ms 和 1.2 ms, 因故障检测延时不同导致的对时同步误差约为 28.8° 。

利用本文所述算法对图 7 中电流曲线进行奇异值分解, 信号的处理结果如图 8 和图 9 所示。

可见, 利用本文所述算法对故障起始点进行识别得到的结论是: 左侧电流的故障点为第 370 点, 右侧的故障点为第 360 点, 左侧故障检测延时约 0.3 ms, 两端因故障检测延时不同导致的误差约 5.6° 。

综上, 本文所述算法可以更为精确地识别出故障发生时刻, 从本质上降低因故障检测延时不同导致的同步误差。

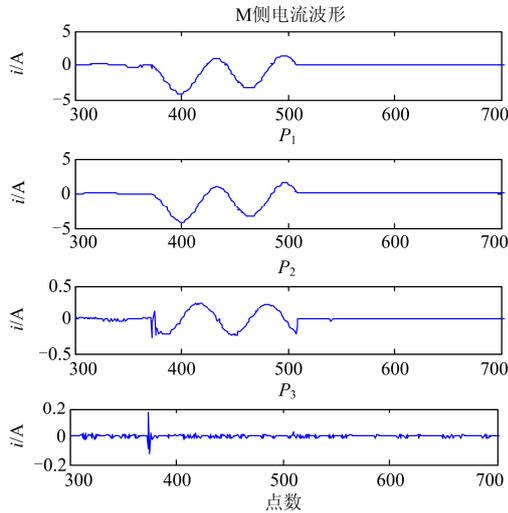


图8 基于现场波形的M侧电流奇异值分解结果
Fig. 8 SVD results for current of side M using field data

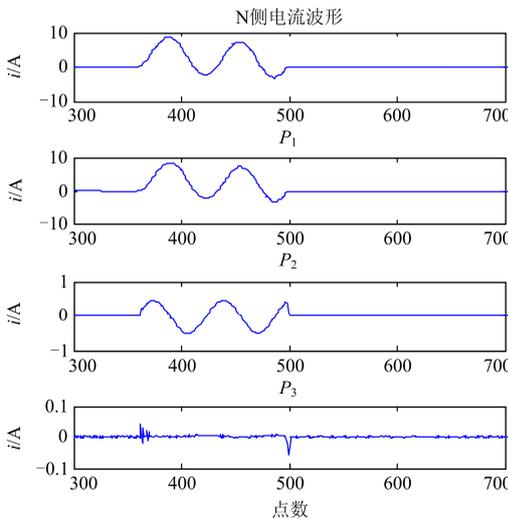


图9 基于现场波形的N侧电流奇异值分解结果
Fig. 9 SVD results for current of side N using field data

4 结论

精确的故障发生时刻识别是实现故障数据自同步的关键。本文提出了适用于故障数据自同步的故障时刻精确检测算法。该算法结合奇异值分解法零相位偏移的特性和模极大值算法,可精确地识别出故障发生时刻,且不受故障发生时刻的影响,从本质上降低了因故障检测延时不同导致的同步误差,最终实现电流差动保护两端数据的对时同步。最后的仿真和现场数据结果验证了该算法的有效性和精确性。

参考文献

[1] 张项安, 张新昌, 李卫星, 等. 基于差动保护的配电网

闭环运行方式探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 103-106.

ZHANG Xiangan, ZHANG Xinchang, LI Weixing, et al. On the closed-loop operation mode for differential protection-based distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 103-106.

[2] 华煌圣, 刘育权, 张君泉, 等. 基于配电管理系统的“花瓣”型配电网供电恢复控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 102-107.

HUA Huangsheng, LIU Yuquan, ZHANG Junquan, et al. Recovery control scheme for petal-shape distribution network based on distribution management system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 102-107.

[3] 温盛科. 中新广州知识城 20 kV 保护的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

[4] 高厚磊, 李娟, 朱国防, 等. 有源配电网电流差动保护应用技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 40-44.

GAO Houlei, LI Juan, ZHU Guofang, et al. Study on application technology of current differential protection in active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 40-44.

[5] 李瑞生. 适用主动配电网的差动保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 104-109.

LI Ruisheng. Differential protection scheme to apply to active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 104-109.

[6] 黄大为, 潘波. 考虑 DG 接入位置和容量的配电网保护综合改进方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 64-70.

HUANG Dawei, PAN Bo. Improved methods of distribution network protection scheme considering connection locations and capacity of DG[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 64-70.

[7] 白加林, 高昌培, 王宇恩, 等. 基于数据源共享的广域智能保护及控制系统研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 157-162.

BAI Jialin, GAO Changpei, WANG Yuen, et al. Research and application of wide-area intelligent protection and control system based on the shared data source[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 157-162.

[8] HUANG Wentao, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. An impedance protection scheme for feeders of active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1591-1602.

- [9] 司新跃, 陈青, 高湛军, 等. 基于电流相角突变方向
的有源配电网保护[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11):
97-103.
SI Xinyue, CHEN Qing, GAO Zhanjun, et al. Protection
scheme for active distribution system based on directions
of current phase angle variation[J]. Automation of Electric
Power Systems, 2014, 38(11): 97-103.
- [10] 高厚磊, 江世芳, 贺家李. 数字电流差动保护中几种
采样同步方案[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(9): 46-49.
GAO Houlei, JIANG Shifang, HE Jiali. Sampling
synchronization methods in digital current differential
protection[J]. Automation of Electric Power Systems,
1996, 20(9): 46-49.
- [11] 卜强生, 宋亮亮, 张道农, 等. 基于GPS对时的分散采
样差动保护同步测试方法研究[J]. 电力系统保护与控
制, 2013, 41(22): 149-153.
BU Qiangsheng, SONG Liangliang, ZHANG Daonong,
et al. Research on the test method of distributed sampling
differential protection synchronization based on GPS
time[J]. Power System Protection and Control, 2013,
41(22): 149-153.
- [12] 由伟翰. 基于故障信号同步的配网差动保护技术[D].
济南: 山东大学, 2009.
YOU Weihang. Differential protection of distribution
network based on fault signal synchronization[D]. Jinan:
Shandong University, 2009.
- [13] 李娟, 高厚磊, 武志刚, 等. 有源配电网差动保护自同
步原理及误差分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9):
78-85.
LI Juan, GAO Houlei, WU Zhigang, et al. Data self-
synchronization method and error analysis of differential
protection in active distribution network[J]. Automation
of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 78-85.
- [14] 赵学智, 叶邦彦. 基于二分递推 SVD 的信号奇异性
位置精确检测[J]. 电子学报, 2012, 40(1): 53-59.
ZHAO Xuezhi, YE Bangyan. Accurate detection of signal
singularity position based on dichotomizing recursion
SVD[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(1): 53-59.
- [15] 赵学智, 叶邦彦. SVD 和小波变换的信号处理效果相
似性及其机理分析[J]. 电子学报, 2008, 36(8):
1582-1589.
ZHAO Xuezhi, YE Bangyan. The similarity of signal
processing effect between SVD and wavelet transform
and its mechanism analysis[J]. Acta Electronica Sinica,
2008, 36(8): 1582-1589.
- [16] 赵学智, 叶邦彦, 陈统坚. 基于 SVD 的奇异性信号
检测原理及其应用[J]. 振动与冲击, 2008, 27(6): 11-15.
ZHAO Xuezhi, YE Bangyan, CHEN Tongjian. Principle
of singularity detection based on SVD and its
application[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008,
27(6): 11-15.
- [17] GOLUB G H, VAN LOAN C F. 矩阵计算[M]. 袁亚湘,
译. 北京: 科学出版社, 2001.
- [18] AKRITAS A G, MALASCHONOK G I. Applications of
singular value decomposition (SVD)[J]. Mathematics and
Computers in Simulation, 2004, 67(1): 15-31.

收稿日期: 2017-02-06; 修回日期: 2017-05-30

作者简介:

李娟(1987—), 女, 博士, 研究方向为配电网故障检
测。E-mail: lijuandan@126.com

(编辑 周金梅)