

基于谐波的低电压配电干线中性线断线检测方法

雍 静, 周 浩

(输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400030)

摘要: 三次谐波电流含量较大是目前低压配电系统负荷的普遍特征, 利用这一特征, 提出了在配电干线首端设置监测装置, 对中性线断线故障进行检测的保护方法。其基本原理是通过检测线路首端三次谐波变化来判断是否发生中性线断线故障。仿真和实测分析表明: 无论故障点以后的负荷是否平衡, 当中性线断线时线路首端三次谐波均会呈现不同程度变化, 故障点越接近线路首端, 故障导致的三次谐波变化就越显著。对中性线断线故障时线路首端三次谐波和基波的突变规律, 以及正常运行时, 负荷三次谐波和基波的波动规律进行了研究和分析, 获得了将故障和正常运行状态进行有效区分的故障判据和故障判别流程。利用实测负荷的波动数据进行仿真研究, 验证了故障检测判据在负荷平衡和不平衡状态下对中性线断线故障判别的有效性。

关键词: 谐波; 中性线断线故障; 故障检测; 负荷不平衡

A harmonic-based approach for open-neutral fault detection in low voltage systems

YONG Jing, ZHOU Hao

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University),
Chongqing 400030, China)

Abstract: In low-voltage distribution system 3rd harmonic current content is big enough. It is a common characteristics. Through analyzing the characteristics of harmonic, a new open-neutral fault detection approach is proposed that monitoring device can be simply installed at feeder head. Main idea of the proposed approach is that the fault can be identified according to the 3rd harmonic variation measured at the feeder head. Simulation and experimental analysis shows that the 3rd harmonic current will show varying degrees of change at the feeder head when open neutral fault occurs, regardless of the load is balanced or unbalanced. The fault location is closer to feeder head indicates that the 3rd harmonic current change is more significant. This paper researches and analyzes the 3rd harmonic and fundamental currents sudden change method at feeder head when open-neutral fault happened, as well as 3rd harmonic and fundamental currents of load fluctuation method during normal operation. It obtains fault criterion and fault identification processes that can effectively distinguish between open-neutral fault and normal operation. The experimentally measured load fluctuation data for simulation study verifies the fault detection criterion is validity to open-neutral fault whenever in balanced and unbalanced load conditions.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51077138).

Key words: harmonics; open neutral fault; fault detection; load imbalance

中图分类号: TM645 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)19-0049-09

0 引言

在我国常规工业与民用低压配电系统中, 三相四线制系统最为常见, 其中性线是维持配电系统的中性点零电位, 保证三相电压基本平衡的重要手段。对于向三相不平衡负荷供电的回路, 中

性线断线将导致断线点后的系统不同程度出现过电压情况, 并极有可能造成电器损坏及电气火灾。

目前针对中性线断线故障主要有如下几种检测方法^[1-8]: 文献[1]中是将两个相差很大的电阻分别接在 A 相与中性线以及 B 相与中性线上, 当两个电阻上有不同的电压降时表明中性线发生断线故障; 文献[2]和文献[3]中提出测量相电压来辨别由中性线断线引起的过电压, 实际上这种检测过电压的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077138)

方法只适用于单个负载；文献[4]中的方法是需要测量中性线与PE线间的电压来检测电位偏移和故障，这种方法只适用于TN-S接地系统；文献[5]方法使用漏电流来检测中性线断线，而这种方法需要在负荷侧和电源侧同时加装额外的线路；文献[6]的方法则需要加装恒流源；文献[7]是对谐波电压及基波零序电压分析的保护方法，对平衡负荷不易检测出；文献[8]是分析负序电流变化规律，但只针对单相的断线故障。现有的中性线断线检测设备都需要安装在负荷侧或者配电回路末端以防止设备遭受由中性线断线引起的过电压，其共同缺陷是检测设备必须遍布整个配电系统，这样其投资大、维护难度高。因此急需研究设置在回路首端的中性线断线检测方法^[9]。在文献[9]中证明了设置在线路首端的中性线断线检测方法的可行性，但是并没有研究检测装置的具体检测判据、流程及灵敏度问题，另外也没有实验数据的支撑。本文是在文献[9]的基础上依据配电干线的测量数据对设置在线路首端的中性线断线检测方法做了具体的研究。

近二十年间，基于电力电子技术的电器和设备(非线性负载)在低压配电系统中迅速普及，伴随而来的是电力系统严重的谐波注入。正是利用低压配电系统负载电流中谐波含有量大这一特性，论文提出一种新的中性线断线检测方法，这种方法通过检测线路首端3次谐波和基波变化大小及变动关系检测中性线断线故障，配合继电保护装置在故障造成危害前发出动作信号。此方法的优点是检测装置只需安装在线路首端，可降低投资及维护费用，不需要对线路做改造；同时该方法可检出负荷平衡状态下的中性线断线故障，在故障未造成过电压危害之前发出报警信号。

1 中性线断线故障特征分析

一条向多个负载供电的三相四线制配电干线回路，负载包括线性负载和非线性负载，可以分别等效为阻抗和谐波电流源^[10-22]，理想情况下，线路首端3次谐波电流 I_3 包括所有负载的3次谐波。

1.1 三相负荷平衡状态

当中性线正常连接时，由于系统阻抗远小于负载阻抗，非线性设备产生的3次谐波电流将经中性线流至系统侧；而当中性线断线时，故障位置后由非线性负载产生的谐波电流将无法流回馈线首端，而是流向负载阻抗，此时线路首端的3次谐波电流将只包括故障位置前的3次谐波电流。因此对于回

路首端来说，在三相上可以同时检测到3次谐波突变，而此时整个回路的基波电流由于流通过程不变仍能在首端检测到，并按实际负荷的变动而波动。

在此，将3次谐波电流的突变量 ΔI_3 定义为

$$\Delta I_3 = I_{3,k} - I_{3,k-1} \quad (1)$$

其中： k 表示第 k 次采样数据； ΔI_3 即为前后两次数据采集值的差。

于是，3次谐波电流突变率即为

$$\Delta I_3 \% = \frac{I_{3,k} - I_{3,k-1}}{I_{3,k}} \times 100\% \quad (2)$$

图1(a)为负荷平衡情况下正常的3次谐波波动，图1(b)为负荷平衡情况下，当中性线断线导致20%负载失去中性线前后，线路三相上3次谐波电流的突变，其中采样间隔10s，在第50个采样点处发生断线故障，此时三相上3次谐波同时减小。

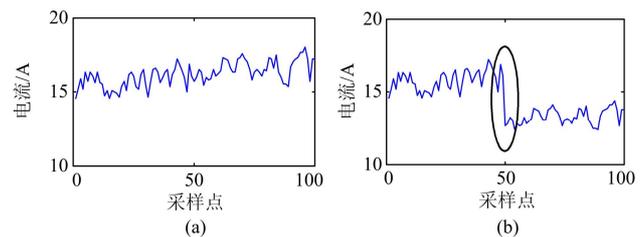


图1 中性线断线时3次谐波变化(负荷平衡)

Fig. 1 3rd harmonic changes with open-neutral fault (balanced load)

1.2 三相负荷不平衡状态

如果故障点后的负载不平衡，故障后在三相线路首端同样能检测到3次谐波电流同时突变，但此时中性点电位将发生偏移。电压偏移量由三相负载不平衡程度决定。最严重的中性点电位偏移会使轻载相电压升至接近于线电压，接入该相的设备将承受过电压；而重载相电压则降至接近于零，接入该相的设备将无法正常运行。因此，在负荷不平衡的状态下发生中性线断线故障，除了三相的3次谐波电流同时突变，在线路首端各相上基波电流也会同时发生突变。图2(a)、图2(b)分别为负荷不平衡情

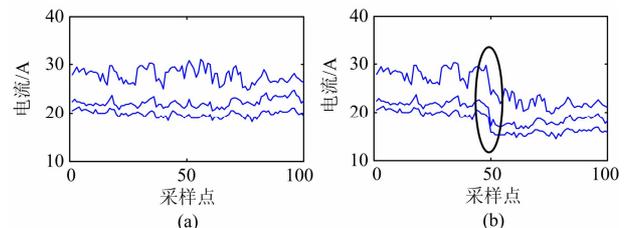


图2 中性线断线时3次谐波变化(负荷不平衡)

Fig. 2 3rd harmonic changes with open-neutral fault (unbalanced load)

况下当有 20% 的负载失去中性线时, 故障前后三相上 3 次谐波电流变化, 采样点与图 1 相同。

中性点电位偏移引起的基波电流变化由负载特性决定。通常, 根据负载的电流随电压变化的函数关系将负载分为三类, 分别是恒功率负载、恒电流负载和恒阻抗负载。特定的用户或地区下, 负载有可能是上述三种特性负载的组合。事实上, 低压系统中大多数线性负载, 如白炽灯、热水壶、炉灶、厨具等, 表现为恒阻抗负载(电流与电压成正比); 其他的线性负载, 如电动机, 表现为恒功率负载(电流与电压成反比)。因此中性点电位偏移时, 基波电流势必发生不同程度的突变。

由中性点电位偏移引起的基波电流突变 ΔI_1 可以由式 (3)、式 (4) 计算得到。

$$\text{恒功率负载 } \Delta I_1 = \left(\frac{V_r - V_{ub}}{V_{ub}} \right) I_1 \quad (3)$$

$$\text{恒阻抗负载 } \Delta I_1 = \left(\frac{V_{ub} - V_r}{V_r} \right) I_1 \quad (4)$$

其中, I_1 , V_{ub} 和 V_r 分别是故障位置后负载的基波电流, 不平衡相的相线-中性线电压和负载的额定相电压。

综上分析, 中性线断线故障会导致回路首端 3 次谐波、甚至基波电流突变, 基波和谐波在故障前后的这种变化特性, 使得在线路首端检测中性线断线故障成为可能。需要指出的是: 如果故障位置后的负载三相平衡, 则其中性线断线不会引起显著的中性点电位偏移, 此时现有的中性线断线检测方法只检测相线与中性线电位差将不适用, 而本文所提出的方法能够检测这种潜在的危险。

2 回路正常时基波和三次谐波电流特征

如果一条线路上的负载特性相同、三相对称均匀分布并且非常平稳, 则按照以上分析, 直接检测线路首端 3 次谐波电流突变率 ($\Delta I_3\%$) 即可判断故障, 并且因此时 3 次谐波与基波电流严格成比例, 可以获得故障点后失去中性线的负荷比例 ($\Delta I_{1,\text{fault}}\%$), 即可以进行故障点定位。但事实上, 低压系统中的负载无论在负载特性、三相对称性和平稳性方面都不能完全满足上述理想条件, 因此需要根据负载特性确定检测参数。

2.1 三次谐波和基波电流的比例

因为故障检测依赖于基波和 3 次谐波电流的突变率, 因此要求 3 次谐波含量足够大。为了掌握实际配电干线上 3 次谐波含量, 对大量配电干线实际

的首端电流进行测量, 以得到基波和 3 次谐波电流波动曲线。图 3 所示为 6 条建筑物内低压配电干线一天的运行数据, 数据采集时间间隔为 10 s, 图中实线表示基波电流, 虚线表示 3 次谐波电流, 其中基波电流缩小了 10 倍, 可以看出当干线上一天中基波电流的最大值在 100 A 左右时, 其 3 次谐波电流大约在 5~30 A。图 4 为这 6 条线路上的 3 次谐波与基波电流比, 约在 10%~30% 间, 这样的谐波含量是足够大的。对其他商业、办公和住宅配电干线的实测可得到类似的结论。

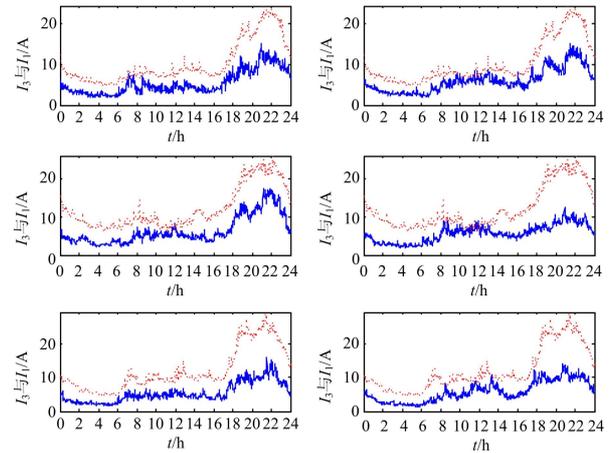


图 3 基波电流和 3 次谐波电流

Fig. 3 Measured fundamental and 3rd harmonic current pairs

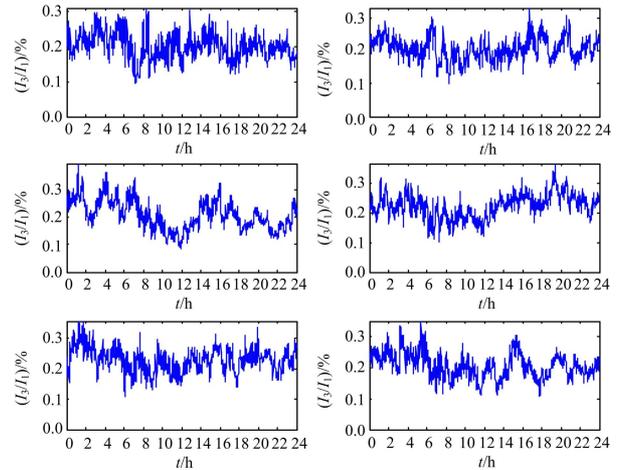


图 4 3 次谐波电流与基波电流比

Fig. 4 Ratio of 3rd harmonic to fundamental

2.2 基波和三次谐波电流相位的分散性

按照电气工程供配电设计规范, 一个回路的供电负荷应该性质相同, 因此基波和谐波相位特性也应该基本相同。在一般工业配电系统中, 一个低压回路上的负荷特性通常是非常一致的, 而民用系统, 尤其是民用住宅配电系统, 由于各住户所拥有

用电设备的差异性, 导致回路各负荷之间的特性有所不同, 如果每个负载的三次谐波电流相位差异较大, 各个负载的 3 次谐波电流有可能相互抵消而使得检测方法失效, 因此需要研究其相位的分散性。为此, 对大量住宅负荷进行了实测, 以研究其运行时基波和谐波电流特性的差异性。对实测结果比较发现, 各住户的基波电流之间的相位差非常小, 一般相位差都不超过 20° , 最大相位差也在 40° 以内, 如图 5, 可以认为其相位是一致的; 而 3 次谐波最大相位差约为 60° , 大多数的情况相位差均在 40° 以内, 如图 6 所示, 即不同住户间 3 次谐波相位差异不大, 不会相互抵消而难以检测, 而基波与 3 次谐波的相位差之间有一定差异。

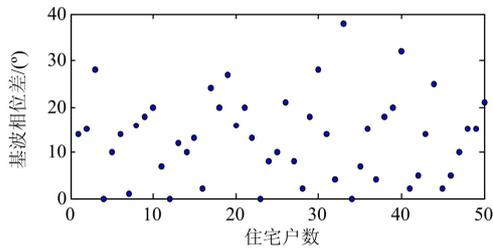


图 5 不同住户基波电流相位差

Fig. 5 Fundamental current phase angles difference of various home appliance combinations

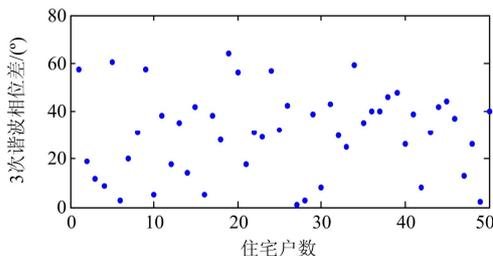


图 6 不同住户 3 次谐波电流相位差

Fig. 6 3rd harmonic phase angles difference of various home appliance combinations

电压降是影响 3 次谐波相位的另一个因素, 表 1 列出了根据交联聚乙烯电缆的实际参数在线路首端和末端的基波电压相位变化, 电缆参数见图 8。表中, “截面”指的是相线截面面积, “负载”表示该截面下功率因数为 0.8 时对应的负载容量。选择馈线长度为 300 m, 按负载集中在馈线末端, 这是在低压 0.22/0.38 kV 系统中可能会由电压降而引起的电位差最大的情况。可以看出最大电压相角差只有 3.6° , 从而最多导致 10.8° 的 3 次谐波相角位移。所以对于实际的线路, 对 3 次谐波相角分布的影响是不显著的。

表 1 不同截面馈线首末端相位角差

Table 1 Phase angle differences ($d\phi$) of fundamental voltages between the head and terminal of feeders

截面 /mm ²	25	35	50	70	95	120
负载	63.36+	79.73+	96.10+	120.91+	148.37+	173.18+
/kVA	j47.52	j59.80	j72.07	j90.68	j111.28	j129.89
$d\phi(^{\circ})$	3.60	3.11	2.43	1.97	1.48	1.09

忽略电压降的影响, 比较图 5 和图 6, 各住户 3 次谐波的相位差与基波相位差并不相同, 可能会出现 $-20\sim 40^\circ$ 的偏差, 同时不同住户间 3 次谐波的幅值也不可能是相同的, 这样 3 次谐波的变化率与断线位置后失去中性线的负载比例会有一定差异, 一般故障位置前后负载的 3 次谐波与基波比例均会如图 4 所示在 10%~30%间变化, 这样如果 3 次谐波的突变为 $\Delta I_3\%$, 理论上故障导致失去中性线的负载比例 $\Delta I_{1,\text{fault}}\%$ 范围为 $(0.4\sim 2.3)\Delta I_3\%$, 这是可能会出现的情况, 实测结果表明: 同一时刻干线上 3 次谐波与基波的比例差异一般在 10%以内, 并不会相差很大, 所以实际 $\Delta I_{1,\text{fault}}\%$ 一般在 $(0.53\sim 1.4)\Delta I_3\%$ 间。即: 如果 3 次谐波的突变为 15%, 可以判断失去中性线的负载比例一般在 8%~21%间。

2.3 基波与 3 次谐波电流的波动

回路正常时, 基波与 3 次谐波电流会随负荷的变动而波动, 因此需要对故障情况和正常负荷波动情况进行区分。

故障位置后负荷平衡时三相上只有 3 次谐波的突变; 而故障位置后负荷不平衡时, 对恒阻抗负载除了三相上 3 次谐波同时减小外, 在重载相上会有基波的减小, 轻载相上有基波的增大, 即三相上会分别出现基波突增和突降的情况, 这种突变可以由式(3)和式(4)计算得到。考虑 3 次谐波突变量与基波突变量之比为

$$\Delta I_3 / \Delta I_1 = K \quad (5)$$

大量采用实际负载数据构成的系统仿真结果表明 (见第 4 节): 故障时一般 K 的值在轻载相上会大于 0.3, 重载相上小于 -0.3。如果负载为恒功率负载, K 值有相似的结论, 负载中含不同性质的负载组合时同样满足本条件。

为考察实际系统正常运行时, 三次谐波的自然突变 ($\Delta I_3\%$) 和 K 值的范围。对住宅负荷三条三相干线持续的 17 520 个数据基波与 3 次谐波电流的正常变化范围的统计, 如表 2, 数据每隔 10 s 采集一次; 表 3 是对 2 880 个数据的统计, 数据采集每

1 min 一次。表中 I_3 表示线路上 3 次谐波电流。结果表明正常情况下很少可以观测到三相上存在 3 次谐波电流减小性突变同时超过 10% 的情况, 15% 以上的同时减小性突变则不会发生; 三相上 I_3 同时减小 10% 以上且三相上 K 分别有出现 0.3 以上和 -0.3 以下的概率基本为 0。表 3 由于其数据是每 1 min 采集一次, 可以看出故障判据按表中的设定值时发生误判的可能性会比较大。

表 2 负载正常波动范围 (每 10 s 一个数据)

Table 2 Normal load fluctuations range (every 10 s a data)

发生 的概率	三相上 I_3 同时减小		三相上 I_3 同时减小 10% 以上 且出现 $K > 0.3$ 和 $K < -0.3$
	10% 以上	15% 以上	
回路 1	0.040%	0	0.012%
回路 2	0.012%	0	0
回路 3	0.017%	0	0

表 3 负载正常波动范围 (每 1 min 一个数据)

Table 3 Normal load fluctuations range (every 1 min a data)

发生 的概率	三相上 I_3 同时减小		三相上 I_3 同时减小 10% 以上 且出现 $K > 0.3$ 和 $K < -0.3$
	10% 以上	15% 以上	
回路 1	0.35%	0	0.069%
回路 2	0.28%	0	0
回路 3	0.28%	0	0.035%

3 中性线断线故障检测判据和灵敏度分析

3.1 故障检测流程及判据

故障检测过程可用图 7 所示框图表示, 其中 σ 、 α 、 μ 表示故障设定值。

按照躲过表 2 中正常的负载波动范围的要求, 图 7 中 σ 、 α 和 μ 的取值应分别为 15%、10% 和 0.3。

故障检测的判据可归为如下两点:

1) 如果在干线首端三相上同时观察到 3 次谐波的减小量 $|\Delta I_3\%| > 15\%$, 表明发生中性线断线故障。而 $|\Delta I_3\%|$ 越大表示故障位置更接近首端。

2) 如果在干线首端三相上同时观察到明显的 3 次谐波电流减小, 但 $|\Delta I_3\%|$ 小于 15% 而大于 10%, 并且三相上分别有 $K > 0.3$ 和 $K < -0.3$, 表明发生中性线断线。

当按照以上故障判据来整定检测装置的设定值时, 从后面的仿真验证可以看出发生误判的概率还是很小的。即该判据可以较好地满足故障判别的选择性要求。

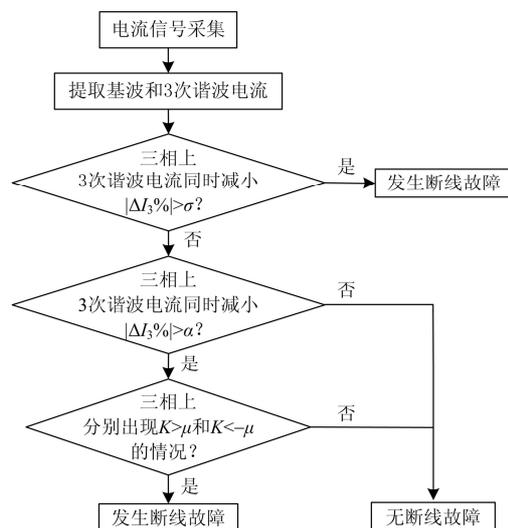


图 7 故障检测方法实现流程

Fig. 7 Implementation of the faults detection method

3.2 故障检测的灵敏性分析

故障动作设定值必须躲过正常情况下系统运行状态的相应参数。当断线位置很靠近线路末端时, 只会造成线路首端很小的 3 次谐波突变, 不能被有效检测和识别, 这就造成了本方法不可能保护到线路的全长。

如图 3 中所示的一天中干线上基波电流的计算负荷大约在 100 A, 此时其 3 次谐波含量在 5~30 A 之间, 15% 的变化量最小有 0.75 A, 如果回路中计算电流小于 100 A, 那么其谐波电流的变化量可能会更小, 这样的变化就难以检测到, 所以认为本方法对计算电流在 100 A 以上的干线回路较为有效。当干线回路中计算电流在 100 A 以下时, 原检测判据理论上是不变的, 但是此时由于负荷的正常波动也有可能引起相同的变化而发生误判, 因此对计算电流小于 100 A 的情况, 仍采用同样的判据, 只是当检测到故障时均采用动作于信号的方式。

检测装置的动作设定值 σ 设置为 15%, 那么失去中性线的负载比例 $\Delta I_{1,\text{fault}}\%$ 在 35% 以上时一定会导致 3 次谐波电流有 15% 的变化, 此时检测装置可肯定地判断中性线断线故障发生; 当 $\Delta I_{1,\text{fault}}\%$ 在 21%~35% 时, 也会可能引起 3 次谐波变化率在 15% 以上, 且其概率是比较大的, 此时可以发出中性线断线报警信号; 当 $\Delta I_{1,\text{fault}}\%$ 小于 21% 时本方法可能失效。动作设定值 α 和 μ 分别设定为 10% 和 0.3 时 (不平衡负载), 要保证故障判别的灵敏度, 故障时 $\Delta I_{1,\text{fault}}\%$ 应该在 15% 以上, 另外由故障引起的 K 值如果不能在三相上分别有 $K > 0.3$ 和 $K < -0.3$ 的变化,

那么故障将不能被检测到，但从后面的分析可以看出这种情况很少发生。另外，数据采集时间间隔大于 10 s 时，如表 3 每 1 min 一次，此时需要提高 α 的值或 μ 的值才能减少误判的发生，即此时故障检测的灵敏度会降低。

4 故障检测方法的仿真实证

对某小区 5 条回路不同时间段(EM-清晨, MO-上午, NN-中午, AF-下午, EV-傍晚, NI-晚上, ON-深夜)的运行状态做测试, 依据实际情况下的负荷在 Matlab 的 Simulink 中对中性线断线故障进行仿真分析。因为仿真时采用的数据是实验得到的负荷参数, 在做中性线断线的仿真时断线后的 3 次谐波与基波参数就基本与实际的情况相同, 能较为真实地反应故障情况。对实验的数据将基波电流值等效为阻抗, 各次谐波电流等效为电流源。如图 8 为本仿真时采用的配电干线系统图, 每一相的负荷均采用实验的数据, 其中 A、B、C、D、E 表示断线位置, A 点是距离测量装置安装处最近的断线位置, E 点是最远的断线位置, 同时图中给出了不同截面电缆参数, 仿真中干线采用截面 95 mm² 的电缆。

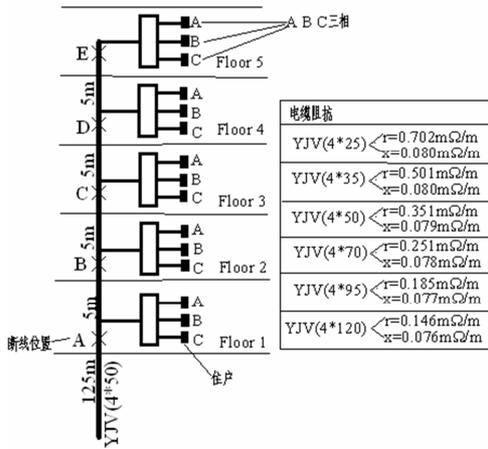


图 8 仿真低压配电系统图

Fig. 8 System diagram of the simulated feeder

4.1 负荷平衡的情况

负荷平衡的情况是理想状态, 实际很少出现的, 各相负荷平衡度相差不大时, 可基本认为是平衡的。当三相平衡系统发生中性线断线时, 虽然当前对系统没有太大影响, 但如果及时发现, 一旦断线位置后负荷不再平衡的时候, 就会使设备遭受过电压危害。

表 4 为负荷平衡且负载均匀分布时, 3 次谐波

突变率 $\Delta I_3\%$ 在不同故障位置 and 不同时段下的变化情况。表 5 为负荷平衡且负载随机分布时, $\Delta I_3\%$ 在不同故障位置 and 不同时段下的变化。表中的 T 表示时间段, A、B、C、D、E 分别是图 8 中所表示的中性线断线位置, 括号外的数为 $I_3\%$, 括号中的数字是 $\Delta I_3\%$ 与 $\Delta I_{1,\text{fault}}\%$ 之比, 该比值反应了 3 次谐波突变率与故障后失去中性线负载比例的关系, 当负载均匀分布时, 其值基本为 1, 即 3 次谐波变化率与故障后失去中性线的负载比例是基本相同的; 当负载随机分布时, $\Delta I_3\%$ 与 $\Delta I_{1,\text{fault}}\%$ 也是成一定比例的, 说明可以用 $\Delta I_3\%$ 参数来进行故障定位。表 5 中 EM、NO 和 NN 时段的 E 点断线时 $\Delta I_3\%$ 的值(即方框中的数据)是小于 15% 的, 此时虽然发生故障但不满足判据条件, 不能肯定地判定为故障。从表 4 和表 5 其他数据可以看出故障判据的设定值对平衡负荷是适用的。

表 4 不同故障位置与时段下 $|\Delta I_3\%|$ (负载均匀分布)

Table 4 $|\Delta I_3\%|$ variation with the fault location and time interval (evenly distributed loads)

T	$ \Delta I_3\% / (\Delta I_3\% / \Delta I_{1,\text{fault}}\%)$				
	E	D	C	B	A
EM	20.0/(0.99)	39.8/(0.99)	60.0/(1.0)	80.0/(1.0)	100/(1.0)
MO	20.0/(0.98)	39.7/(0.99)	59.9/(0.99)	80.0/(1.0)	100/(1.0)
NN	20.0/(0.98)	39.7/(0.99)	60.0/(0.99)	79.9/(1.0)	100/(1.0)
AF	20.0/(0.99)	39.8/(0.99)	59.8/(1.0)	80.0/(1.0)	100/(1.0)
EV	19.6/(0.98)	39.5/(0.99)	59.6/(0.99)	79.6/(1.0)	100/(1.0)
NI	19.6/(0.98)	39.4/(0.99)	59.4/(0.99)	79.6/(0.99)	100/(1.0)
ON	19.8/(0.99)	39.7/(1.0)	59.8/(1.0)	79.8/(1.0)	100/(1.0)

表 5 不同故障位置与时段下 $|\Delta I_3\%|$ (负载随机分布)

Table 5 $|\Delta I_3\%|$ variation with the fault location (randomly distributed loads)

T	$ \Delta I_3\% / (\Delta I_3\% / \Delta I_{1,\text{fault}}\%)$				
	E	D	C	B	A
EM	14.1(0.8)	41.8(0.83)	70.2(1.06)	82.3(1.07)	100(1.0)
MO	12.3(0.64)	41.1(1.01)	61.4(1.15)	78.7(1.14)	100(1.0)
NN	13.4(0.77)	42.8(0.84)	72.5(0.98)	87.2(1.04)	100(1.0)
AF	21.6(0.83)	43.5(0.81)	74.5(1.00)	87.1(1.02)	100(1.0)
EV	18.2(0.66)	45.5(0.86)	74.2(1.15)	87.6(1.07)	100(1.0)
NI	26.8(0.76)	44.4(0.83)	60.34(0.77)	79.0(0.90)	100(1.0)
ON	28.0(1.13)	43.5(1.06)	71.1(1.11)	81.9(1.13)	100(1.0)

表 6 为当三相负载平衡且在干线上随机分布时, 3 次谐波变化量 ΔI_3 随线路长度的变化, 采用“EV”时间段的负载组合进行仿真, 在表 6 的“长度”列, 第一个数字表示图 8 中系统至故障位置 A 的距离和第二个数字表示 AB、BC、CD、DE 间的距离。比较表中各列中的数据, 其值在不同的线路长度时变化不大, 所以线路长度不会影响本方法的有效性。

表 6 不同故障位置与馈线长度下 $|\Delta I_3|$ (负载随机分布)

Table 6 $|\Delta I_3|$ variation with the length of feeder and fault location (randomly distributed loads)

长度/m	$ \Delta I_3 /A$				
	E	D	C	B	A
150, 5	2.87	7.13	11.84	13.87	15.82
200, 10	2.79	7.03	11.73	13.75	15.69
250, 20	2.74	6.95	11.64	13.65	15.58
300, 30	2.7	6.89	11.56	13.56	15.48

4.2 负荷不平衡的情况

多数情况下住宅负荷是不平衡的, 当负荷不平衡时不仅关注 3 次谐波变化, 同时也要关注基波的变化量。对于不同的负载性质当过电压或欠电压会

影响基波不同的变化, 而实际的住宅负荷大多数为恒阻抗负载, 因此在仿真分析时采用的负载为恒阻抗负载。当负荷不平衡情况下发生中性线断线故障时应考虑负荷的不平衡程度, 即不平衡率, 不平衡率 β 定义为

$$\beta = \frac{I_{1.heavy} - I_{1.light}}{I_{1.heavy}} \times 100\% \quad (6)$$

其中, $I_{1.heavy}$ 和 $I_{1.light}$ 表明重载相的基波电流和轻载相的基波电流。

通过对干线数据持续一周的采集, 其最大不平衡率大约在 50%, 一般都在 20% 以下。为了能较为明显地观察到过电压和欠电压相的变化, 仿真时依据实验数据设置其中一相轻载, 另两相负载相同, 为重载相。表 7 和表 8 显示了当负载不平衡率 β 分别设置为 25% 和 50% 且在馈线上均匀分布时 3 次谐波变化率 $|\Delta I_3\%|$ 和 3 次谐波变化量与基波变化量的比值 K 随故障位置和时间段的变化, 括号外为轻载相数据, 括号内为重载相数据。在表 8 中方框里的数据因为 $|\Delta I_3\%|$ 小于 10% 因此是不能被检测到的, 而其他情况故障时在三相上 $|\Delta I_3\%|$ 和 K 的变化均可以满足故障判据的设定值, 这样就能与正常的负荷波动区分开来。

表 7 不同故障位置与时段下 $|\Delta I_3\%|$ 与 K ($\beta=25\%$)

Table 7 $|\Delta I_3\%|$ and K variation with the fault location and time interval ($\beta=25\%$)

T	$ \Delta I_3\% /K$ ($\beta=25\%$)				
	E	D	C	B	A
EM	12.2/-0.95(26.1/4.24)	24.3/-0.94(52.3/4.25)	36.6/-0.96(78.3/4.25)	48.7/-0.95(95.3/-3.87)	60.8/-0.95(69.6/2.26)
MO	18.8/-1.05(21.5/1.92)	37.5/-1.05(41.2/1.85)	56.7/-1.06(61.9/1.85)	73.9/-1.04(81.8/1.83)	90.4/-1.01(97.0/1.72)
NN	28.7/-1.58(17.7/6.72)	56.4/-1.56(35.3/6.71)	81.3/-1.50(52.9/6.71)	97.5/-1.35(70.4/6.67)	84.9/-0.94(87.5/6.69)
AF	14.1/-1.36(20.6/2.63)	28.6/-1.37(41.4/2.63)	42.4/-1.36(60.9/2.59)	56.2/-1.35(77.4/2.47)	69.7/-1.34(81.1/2.07)
EV	29.7/-1.73(17.8/9.70)	59.1/-1.72(35.6/9.70)	87.8/-1.71(53.4/9.70)	80.1/-1.17(71.3/9.71)	50.9/-0.60(89.1/9.70)
NI	14.8/-1.61(21.6/9.43)	29.4/-1.60(43.0/9.33)	43.8/-1.59(63.9/9.21)	57.8/-1.57(82.7/9.0)	70.6/-1.54(84.5/7.34)
ON	15.5/-1.74(17.2/9.27)	30.5/-1.68(34.4/9.28)	43.2/-1.37(51.6/9.27)	57.1/-0.76(68.8/9.12)	72.6/-0.35(85.6/9.23)

表 8 不同故障位置与时段下 $|\Delta I_3\%|$ 与 K ($\beta=50\%$)

Table 8 $|\Delta I_3\%|$ and K variation with the fault location and time interval ($\beta=50\%$)

T	$ \Delta I_3\% /K$ ($\beta=50\%$)				
	E	D	C	B	A
EM	17.2/-0.56(18.7/2.31)	33.4/-0.56(37.0/2.28)	50.1/-0.55(55.3/2.28)	66.7/-0.55(73.7/2.27)	83.5/-0.55(92.0/2.27)
MO	10.6/-0.44(27.9/2.00)	20.3/-0.42(54.8/1.95)	30.4/-0.42(80.33/1.95)	40.7/-0.42(91.4/1.67)	51.0/-0.42(65.8/0.96)
NN	16.2/-0.76(20.5/2.88)	32.9/-0.77(41.7/2.92)	49.0/-0.77(61.8/2.93)	64.4/-0.75(82.0/2.91)	78.6/-0.73(0.91/2.58)
AF	16.5/-0.59(18.5/5.48)	46.25/-0.82(37.1/5.53)	61.9/-0.73(55.75/5.50)	60.87/-0.54(73.7/5.47)	44.7/-0.32(88.6/5.27)
EV	11.5/-0.58(19.9/2.18)	21.7/-0.55(39.5/2.17)	33.0/-0.55(58.9/2.16)	41.9/-0.53(74.5/2.05)	52.8/-0.53(93.7/2.06)
NI	9.4/-0.59(26.5/1.79)	18.4/-0.58(52.0/1.72)	27.4/-0.57(75.3/1.69)	36.3/-0.56(82.8/1.40)	45.0/-0.56(63/-0.85)
ON	14.2/-1.02(20.2/2.37)	27.8/-1.00(40.4/2.37)	40.0/-0.96(60.2/2.35)	50.3/-0.90(79.0/2.30)	57.4/-0.82(86.7/2.03)

表9是不平衡率分别为25%和50%时轻载相和重载相在中性线发生断线故障时的电压值,在仿真分析时采用的电压值为实际测得的额定电压值,约为230 V,从表9来看,在相同的不平衡率下其过电压和欠电压值相差不大,不平衡率越大过电压值越大,对用电设备危害越大,因此在设计过程中应尽量使各相负荷平衡。

仿真分析中等效的阻抗采用的是恒阻抗的负载。如果负载中有少一部分恒功率负载时,由于其欠电压引起其基波电流增大,所以在线路首端检测到的重载相基波电流变化量将会比只有恒阻抗轻载相上 K 的值更大,而不会与正常的情况发生混淆。也就是说对各种负载性质的组合,对本方法仍然适用。

通过以上分析说明,在负载不平衡时,即使不平衡率比较大的情况,本方法仍然能较为准确地判断中性线断线故障。

表9 中性线断线故障下相电压

Table 9 Phase voltages in open-neutral fault conditions

T	$\beta=25\%$	$\beta=50\%$
	$V_{rms.light}/V_{rms.heavy}$ (V)	$V_{rms.light}/V_{rms.heavy}$ (V)
EM	253.6/223.8	277.2/218.3
MO	250.5/217.5	279.8/216.0
NN	254.4/223.5	270.4/216.9
AF	260.1/217.4	279.0/222.6
EV	255.0/224.6	278.1/213.8
NI	260.1/222.1	279.1/212.3
ON	256.5/223.8	278.9/213.0

5 结论

本文提出了一种基于谐波的中性线断线故障检测方法,检测装置可以置于线路首端,大大节省了投资与维护成本,其核心思想是采用断线前后的谐波特性来识别故障。文中分别对负荷平衡和不平衡时的系统做了理论研究,得到适用于各种负载情况的故障检测判据,同时对本方法的灵敏度做了分析,最后给出了依据实验数据的对中性线断线故障的仿真分析,证明了方法的有效性。

本方法的缺点在于不适用于计算电流较小的线路,末端故障可能得不到全面保护。

参考文献

[1] SWINT M. Open neutral detection circuit: United States, US20070236845[P]. 2007-10-11.
 [2] JONES N, MONTGOMERY S. Method and apparatus

for open neutral fault detection: United States, US20070258175[P]. 2007-11-08.
 [3] 刘子衿, 刘威, 王春丽. 一种新型的低压断路器的中性线断线保护模块: 中国, CN20 1020553735[P]. 2010-09-10.
 LIU Zi-jin, LIU Wei, WANG Chun-li. A new open-neutral protection accessory for low voltage breaker: China, CN20 1020553735[P]. 2010-10-09.
 [4] PEARSE J N. Extension cord having open neutral during fault detection trip: United States, US20060198067[P]. 2006-09-07.
 [5] GERSHEN B J, CAMPOLO S. Leakage current detection interrupter with open neutral detection: United States, US20050243485[P]. 2005-11-03.
 [6] 尹忠东, 张国安, 刘立新, 等. 电流注入式中性线断线检测装置及方法: 中国, CN2007 10062678[P]. 2007-11-27.
 YIN Zhong-dong, ZHANG Guo-an, LIU Li-xin, et al. Open-neutral detection device and method by injecting current: China, CN2007 10062678[P]. 2007-11-27.
 [7] 刘东超, 李铁仲, 张哲, 等. PT 中性线断线的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 73-76.
 LIU Dong-chao, LI Tie-zhong, ZHANG Zhe, et al. Research on PT neutral line failure[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 73-76.
 [8] 朱玲玲, 李长凯, 张华中, 等. 配电网单相断线故障负序电流分析及选线[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 35-38.
 ZHU Ling-ling, LI Chang-kai, ZHANG Hua-zhong, et al. Negative sequence current distributing and single-phase open-line fault protection in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 35-38.
 [9] YONG Jing, ZHOU Cheng-li, YANG Ben-qiang, et al. A harmonic-based approach for open-neutral fault detection in low voltage systems[C] // IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Hong Kong, China: IEEE, 2012: 53-58.
 [10] Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks, part I: concepts, models, and simulation techniques[J]. IEEE Trans on Power Del, 1996, 2(1): 452-465.
 [11] AHMED E E, XU W, ZHANG G. Analyzing systems with distributed harmonic sources including the attenuation and diversity effects[J]. IEEE Trans on Power Del, 2005, 20(4): 2602-2612.
 [12] CUNILL-SOLIL J, SALICHS M. Study and characterization

- of waveforms from low-watt (25 W) compact fluorescent lamps with electronic ballasts[J]. IEEE Trans on Power Del, 2007, 22(4): 2305-2311.
- [13] TANG Jiong, DORAISWAMI R, DIDUCH C P. Identification of a linear model for nonlinear systems[C] // IEEE International Conference on Control and Automation, Christchurch, New Zealand: IEEE, 2009: 1036-1042.
- [14] NASSIF A B, YONG Jing, XU W. Measurement-based approach for constructing harmonic models of electronic home appliances[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(3): 363-375.
- [15] KIM T J, LEE W C, HYUN D S. Detection method for open-circuit fault in neutral-point-clamped inverter systems[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2009, 56(7): 2754-2763.
- [16] LEVEY L, BELLCORE. Computation of fault currents and voltages along a multigrounded neutral power line having multiple phase conductors[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(4): 1541-1548.
- [17] E Da-zhi, ZHAO Chang-zheng, DI Man, et al. Research on the fault of neutral line in the power system[C] // Control and Decision Conference (CCDC), Mianyang, China, 2011: 3672-3676
- [18] 陈艳, 周林, 雷建, 等. 基于微分几何的微网 Z 源逆变器并网控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 17-23.
CHEN Yan, ZHOU Lin, LEI Jian, et al. Research on the Z-source inverter grid-connected control of micro-grid system based on differential geometry[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 17-23.
- [19] 谢莉, 雷银照. 电气系统中多导体传输线的瞬态电磁响应[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 190-194.
- XIE Li, LEI Yin-zhao. Transient electromagnetic response of multiconductor transmission line in electrical system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 190-194.
- [20] 李艳, 阮新波, 杨东升, 等. 无缓冲单元的多输入直流变换器电路拓扑[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 73-79.
LI Yan, RUAN Xin-bo, YANG Dong-sheng, et al. Multiple-input DC/DC converters without buffer cells[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 73-79.
- [21] 谢秉鑫, 王宗, 范士林. 分布式电源对于配电网谐波特性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 116-119.
XIE Bing-xin, WANG Zong, FAN Shi-lin. Influence on harmonic characteristics of distributed network with distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 116-119.
- [22] 郑连清, 吴萍, 李鹏. 电力系统中谐波源的建模方法[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 41-45.
ZHANG Lian-qing, WU Ping, LI Kun. Modeling approaches of harmonic sources in power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 41-45.

收稿日期: 2013-12-30; 修回日期: 2014-02-18

作者简介:

雍 静(1964-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为电气安全、电能质量; E-mail: yongjingcq@163.com

周 浩(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电气安全、电能质量。