

基于IEC 61850及EMD算法的小电流接地故障选线装置设计

为解决配电网小电流接地故障的选线问题，采用EMD算法设计了一种可应对于故障不同短路时刻的选线装置。小电流接地故障电流经EMD分解出的IMF在不同短路角下展现出不同特征，可分别利用在短路时刻低频部分线路单调性与线路电容暂态能量作为判据进行故障选线。在此之上，遵循IEC 61850规约对选线装置各功能建立相关逻辑节点，并介绍该装置实现选线功能的常用服务。最后基于Matlab/Simulink的配电网小电流接地故障仿真验证了该选线方法的有效性。

王 磊 骆 玮 曹现峰/安徽省新能源利用与节能重点实验室(合肥工业大学)

0 引言

现阶段由于城市规划大量使用电缆架空混合线路，在提高用户生活质量的同时，无疑也为故障选线带来了挑战。而其中，小电流接地发生频率最高，也最难确定故障出线。

故障选线的主流算法是针对故障波形进行数学分析。例如，可避免消弧线圈感性电流干扰的零序5次谐波法^[1]可利用FFT分解得到，但却由于幅值过小易造成误判；小波滤波在提出后便有了广泛的应用，然而配电网结构复杂多变，不同时刻故障对应着不同的故障暂态分量，再加上系统不确定的故障振荡和故障噪声，为其可靠应用带来巨大挑战；而较为新颖的数学形态学滤波算法^[2]，也由于其仅适用于小角度故障受到了限制。除此之外，也有论文提出采用零序

能量^[3]等方法，均无法保证在故障任何时刻均适用。

IEC 60870-5系列规约是目前配电网通用规约，但随着配电设备种类增多，智能化程度增高，其功能更多需要设备协同工作，这是传统规约难以支持的。因此，我国现推广一种便于管理和互信的新规约即IEC 61850，它方便了设备与主站之间的信息交互，同时也提高了信息传递的可靠性。智能化设备对IEC 61850规约的支持是发展趋势^[4]。

基于以上几点，本文尝试采用具有自适应性质的经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)替换传统用以分析暂态分量的小波算法进行故障选线。同时提出了选线装置各部分针对IEC 61850需实例化的相关逻辑节点，并介绍了该装置实现选线功能的常用服务。

1 EMD算法

1.1 EMD算法简介

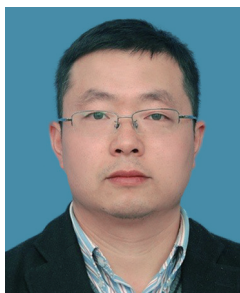
在分析非平稳信号时，系统频率并不唯一确定，傅里叶所定义的频率不再适合，故瞬时频率概念被提出，并引来诸多探讨。

对信号 $x(t)$ 进行Hilbert变换得到表征 $x(t)$ 局部特性的 $\hat{x}(t)$ ，定义其解析信号 $z(t)$ 为

$$z(t) = x(t) + j\hat{x}(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (1)$$

而瞬时频率则可表示为

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (2)$$



王 磊/副教授

关键词/Keywords

小电流接地故障 ·
故障选线 ·
EMD ·
IEC 61850 ·

国家自然科学基金资助项目(51177036)，安徽省自然科学基金资助项目(1408085MKL13)。

式中, $f_i(t)$ 为 t 时刻 i 次瞬时频率。

为获得瞬时频率, 1998年N. E. Huang提出了EMD算法^[5], 他将原信号按照自身性质分解为一系列可转换为具有一定物理意义的本征模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF) 和最后余项, 并发现通过对IMF进行HHT变换可得到响应的瞬时频率, 计算公式为

$$s(t) = \sum_{i=1}^n \text{IMF}_i(t) + r(t) \quad (3)$$

由IMF的特点得出, EMD算法保留原信号的幅值、频率的特征, 并且由于其自适应的分解方法, 避免由于时间或是频带的不确定造成的信息遗漏, 因此应用于诸多领域。与此同时, EMD分解与小波分析、傅里叶分析相比, 更有实际的物理意义。

1.2 EMD分解算法

EMD算法的本质是通过“筛分”获得可得到瞬时频率的窄带分量IMF。为满足具有物理意义的瞬时频率概念, IMF需局部对称于零并有相同的极值和过零点。具体获得步骤如下。

1) 得到待分解波形序列 $s(t)$ 的上下包络线 $E_{\max}(t)$ 与 $E_{\min}(t)$ 及均值 $E_{\text{ave}}(t)$ 。采用区段比较法可得到原信号的极值, 而用合适插值法可得到包络线。其中极值查找算法可根据准确度缩小区段长度, 插值法多采用简便的三样条插值。均值计算公式为

$$E_{\text{ave}}(t) = \frac{E_{\max}(t) - E_{\min}(t)}{2} \quad (4)$$

式中, $E_{\text{ave}}(t)$ 为包络线均值; $E_{\max}(t)$ 为包络线最大值; $E_{\min}(t)$ 为包络线最小值。

2) 由IMF获得条件, 波形需局部对称于0。因此采取了利用原波形减去包络均值得到新的数据序列 $X(t)$, 该序列保留了高频特征, 即

$$X(t) = s(t) - E_{\text{ave}}(t) \quad (5)$$

但是这样的一次处理难以满足条件, 重复上述步骤, 理论需得到局部包络趋于0, 为了使得计算机实现该算法, 多采用标准偏差系数SD作为判据, 但本装置采用Rilling提出的新判据, 经验证

具有更好的均值特性, 其具体内容在文献[6]中提及。

3) 由上述步骤, 即可得到一个中心频带最高的IMF层, 大量实验验证EMD分解具有一定的正交性, 将 $s(t)$ 减去IMF并重复步骤, 直到得到一个常量或者单调的序列, 表示EMD分解结束, 即可得到余下各IMF层及余差RES。

上述分解步骤是按照波形自身特征逐层“筛分”, 这也说明了EMD分解的自适应性。

2 利用EMD进行选线方法

当系统发生小电流接地故障, 其暂态故障波形与短路角有着紧密联系: 短路角较小时, 线路中的电压变化较小, 电容的暂态分量并不明显, 可通过故障首波方向判断出故障线路。而短路角较大时, 线路电容高频暂态分量较多, 电容暂态分量故障线路为其他非故障线路之和, 所以在故障线路检测到的高频暂态电容特征分量远大于非故障线路。

基于以上两点可以得到利用EMD算法对小电流接地故障的一种选线方法。

对各线路故障电流进行EMD分解。通过傅里叶分析可得到各IMF频带中心频率逐渐降低。表征高频衰减的电容暂态电流分量和故障噪声与表征低频的基波故障电流以及电感衰减分量, 均被自适应分解在各IMF层。

在配电网中电容衰减频率范围较宽, 同时因为电网中众多的电缆-架空线混合线路造成了宽频的电容衰减分量。所以选择中心频带包含电容衰减频率的IMF叠加, 求取其电容暂态能量 E_c 计算公式为

$$E_c = P \sum_{f(i) \in f(c)} \text{IMF}_i(n) P^2 \quad (6)$$

式中, $f(i)$ 为该IMF中心频率; $f(c)$ 为暂态电容频率。

在故障点时, EMD算法由于具有很好的局部性, 可检测到故障电流幅值和频率的突变, 这种突变改变了波形走势, 较电容高频暂态属于低频。同时EMD算法也有类似二进滤波的特性, 在

不同线路故障电流流向并不相同，所以故障线路经EMD分解后的低频分量在短路时刻有着不同的单调性。令单调性dir递增为1，递减为0，表征故障时刻相位。

主站根据选线装置上传的判据进行选线判断。在短路角较小时，线路高频暂态电流较小，考虑EMD分解具有一定的混叠性，所以得到的暂态电容能量并不准确；而短路角较大时，由于高频振荡量远大于基波，且波形较为对称，这使得故障方向容易误判，所以需根据短路角的大小来选择相应判据。在短路角较大时，可利用电容暂态能量大小判断；在短路角较小时，EMD算法利用其自适应滤波特性，较好地滤除了高频干扰信号，可由同一出线故障线路与非故障线路故障时刻低频波形单调性进行判断。

短路角的选择可根据电网出线长度决定，若总线路较长，必然电容暂态能量较大，可选择较小的短路角。相反，总线路相对较短，可采用较大的短路角，因为线路的短路故障方向明显。

3 IEC 61850实现该选线方法

3.1 选线装置IED信息建模

选线装置根据其功能的划分主要包含下面四部分逻辑节点：

1) 逻辑节点0 (LLN0)，物理装置信息 (LPHD)。LLN0和LPHD是设备基本逻辑节点。LLN0逻辑节点用于访问逻辑装置的公共状态信息和逻辑设备的监控。LPHD用于访问物理设备基本的信息，包括其名称以及健康情况。这两个节点是装置必备节点。

2) 电压互感器 (TVTR) 和电流互感器 (TCTR)。选线装置的实现离不开对电网电气量的采样分析，这依赖于电压和电流互感器的采样值获得。同时在该选线设备里加入互感器逻辑节点也是为了便于对互感器采样数据进行幅值和相角的数据校正。

3) ZBAT电池管理。选线装置在电网正常工作情况下默认使用电压互感器二次侧电压，但

为保证断电情况仍可正常工作，需加入蓄电池模组。ZBAT是针对电池管理而建立的逻辑节点，功能包括电量电压检测以及相关电池高低压警告，便于主站设备对其监控。

4) 小电流接地故障选线逻辑节点 (EMD for Line Selection, RELS)。在IEC 61850规约中并无此逻辑节点，但是为满足主站对EMD算法获得判据进行分析，需根据规约对其拓展，其数据属性均继承于公共数据类。节点内容如表1所示。

表1 含EMD信息的小电流接地故障选线逻辑节点

RELS				
属性名	类型	说明	T	M/O
LNName		逻辑节点名		M
DATA				
公用逻辑节点信息				
继承公用逻辑节点全部指定数据				M
状态信息				
SleFedID	INS	选线装置编号		M
测量信息				
IMF[n]	MV	故障波形分解各层IMF		O
DirIMFLow	MV	故障时低频单调性		M
Flauntang	MV	故障相角		M
TranEngC[n]	MV	电容暂态能量		M
定值				
Flauntangsle	ASG	选择判据相角		M
OSHigh	ING	选定电容暂态频段上界		M
OSLow	ING	选定电容暂态频段下限		M

表1中测量信息为向主站提供的选线所需数据。其中IMF[n]表示该出线电流经EMD分解的各IMF和余项的波形序列，DirIMFLow为低频单调性。Flauntang表示故障相角，TranEngC表示另一判据即电容暂态能量值。定值表示选线设备需要主站确定并修改值。Flauntangsle表示决定判据的相角，该相角直接可决定选线采用低频单调性亦或是电容暂态能量，一般可选取15°。OSHigh为电容暂态频段的上限，OSLow为频段的下限，考虑架空线路和电缆线路，一般选取频段为150～4 000 Hz。

类型MV表示该数据为测量值，ING表示该数据为整数定值，ASG则为模拟定值，它们的具体内容在IEC 61850规约中有详细的定义^[7]。图1为选

线装置各部分结构与部分节点的对应示意图。

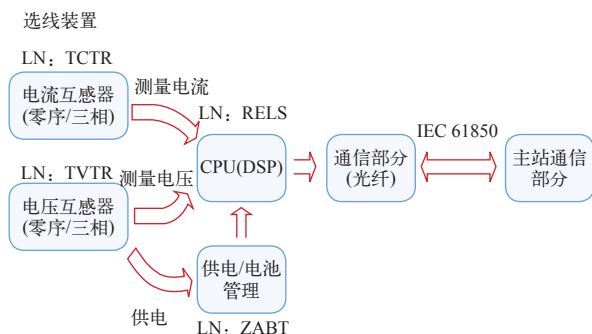


图1 选线装置结构及IEC 61850逻辑节点示意图

3.2 主站与选线设备通信服务

IEC 61850对于互操作等服务采用了通信技术与实现功能分开的方式, 规约设定了详细丰富的抽象通信服务接口 (Abstract Communication Service Interface, ACSI), 而通信技术则可以根据需要采用不同映射方式。

在选线装置的通信模型传输及主站对选线设备的监管和一些定值的维护等服务可采用常用的MMS通信方式。其中可用到的ACSI有Associate等服务, 用于双边应用关联确保了数据可靠传输。而GetDataSetValues、GetDataSetDirectory、GetDataValues和SetDataValues等服务用于监测

数据读写。当选线装置入网时, 发送GOOSE命令至主站, 本装置直接采用GetFile、SetFile、GetFileAttributeValues和DeleteFile等文件服务用于SCL文件的传输, 避免了SCL文件层层读取的冗余性。对于线路发生故障后, 选线设备经过EMD算法得到相关判据, 则采用更为精简快速的GOOSE报文实现。

GOOSE服务支持由数据集组而成的公共数据的交换, GOOSE服务的信息交换基于发布/订阅机制, 采用ASN.1编码, 不经过TCP/IP协议, 直接在以太网的链路层传输。所以相对MMS映射方式, 传输数据更为迅速, 适合变电站突发信息传递。

根据IEC 61850 Server端 (选线装置) 通过GOOSE的发送信息同样需基于ACSI服务, Client端 (主站) 通过GetGoCBValues、SetGoCBValues命令读写GoCB的属性表示是否接受GOOSE命令。而Server端需要发送的DATA-SET包括暂态高频量和故障点低频单调性等判据信息, 按照格式编码后通过SendGOOSEMessage发送至主站, 主站收到GOOSE报文解析并处理。除此之外还有一些包含读取GOOSE索引等服务, 在IEC 61850-7-2中有着详细的定义。其具体故障检测流程图如图2所示。

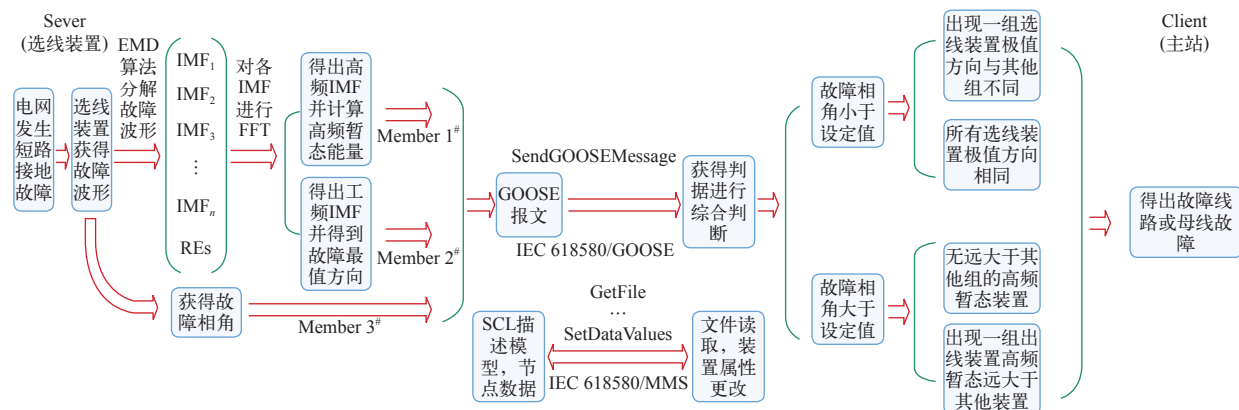


图2 故障检测流程

4 EMD选线方法仿真验证

4.1 仿真模型

为验证本文所提故障定位方案的可行性, 本文利用Matlab/Simulink仿真软件建立如图3所示

的10 kV配电网线路单相接地故障仿真模型。配电网采用消弧线圈过补偿方式, 补偿度取8%, 四条线路长度均如图3所示。模拟出线3的4 km处发生A相接地故障。

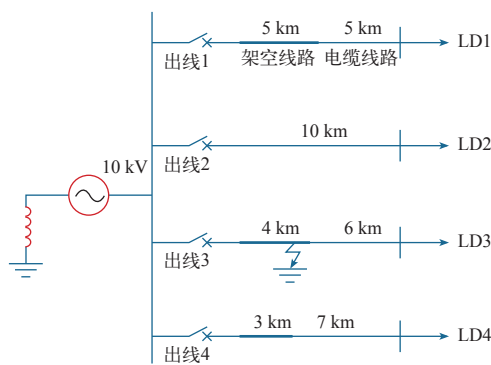
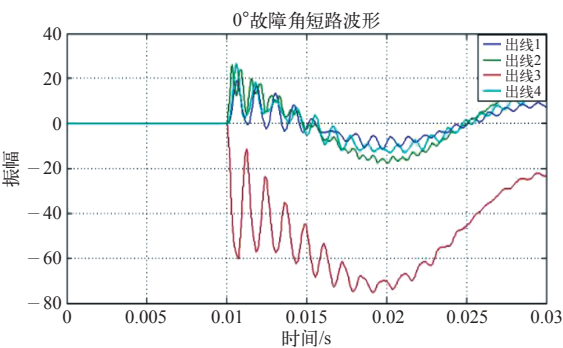


图3 小电流接地故障仿真示意图

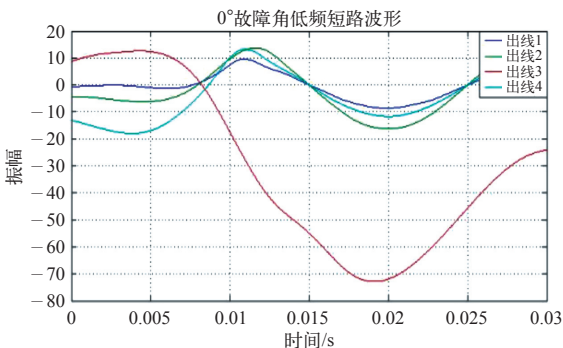
4.2 对小电流接地故障选线仿真及数据处理

对上述模型在故障发生在0°，30°，60°，90°进行仿真，设0.01 s发生单相接地故障，采集各线路故障前半半个工频周期及故障后一个工频周期的零序电流，对各出线电流进行EMD分解。按预设小于15°的相角采用故障时刻波形单调性进行判别，所以按要求得到短路角为0°各出线短路波形及经过EMD算法滤除高频分量后的低频短路波形，如图4所示。

从图4可得出在0.01 s附近及短路时刻，故障出线3和非故障出线的单调性相反，出线3为单调递减，而其他出线为递增。这种判别方式避免了



(a) 出线波形



(b) 低频短路波形

图4 0°短路角下各出线波形及其低频波形

在故障时刻短路电流振荡造成的故障方向判别错误。

在仿真的其他短路角情况下，均通过暂态电容能量的大小进行判别分析，数据如表2所示。

表2 不同短路角各出线电容暂态能量及其中心频率

支路	30°短路角		60°短路角		90°短路角	
	电容暂态能量	中心频率/Hz	电容暂态能量	中心频率/Hz	电容暂态能量	中心频率/Hz
1	450 210	850 700	1 322 900	850 700	1 749 600	950 700
2	229 570	1 700	725 610	1 600 700	934 010	1 600 700
3	1 533 900	800 500	4 530 500	800 500	6 007 100	800 500
4	293 440	950	1 103 800	950 700	1 465 100	950 700

表2中数据表明故障出线3的电容暂态能量远大于其他线路，可以用来作为判据，同时配电网线路通常为辐射式、多出线，随着出线数目的增多，通过短路点的暂态分量越显。

5 结束语

本文设计了一种利用EMD算法的自适应性的判别电网发生小电流接地故障出线的选线装置，并根据设备具体的功能和工作方式提出了其对IEC

61850规约的支持方式和设备与主站的通信方式及其相关ACSI服务。本装置可利用GOOSE报文上传选线判据，主站根据上传信息结合电网实际情况可快速确定故障线路。

EMD算法不同于小波算法需确定分解层数和小波函数，它不依赖于电网结构，可自适应地分解出电容暂态能量，滤得电网低频分量。仿真结果验证了本文所述选线方式可行，可为配电网自动化选线完善提供了一种可行的方案。

参考文献

- [1] 刘兴艳,董洋洋.基于五次谐波电流变化特征的单相接地故障选线方法[J].电子质量,2010,(3),35-37.
- [2] 张霖,吕艳萍.一种基于多分辨率形态梯度技术的小电流接地电网单相接地故障选线新方法[J].电气应用,2008,27(6):4-7.
- [3] 田书,何金朋,梅广勇.一种改进的配电网故障选线方法研究[J].电气应用,2012,31(9):58-61.
- [4] 韩国政,徐丙垠.小电流接地故障选线和定位装置的IEC 61850信息建模[J].电力系统自动化,2011,35(5):58-60.
- [5] Huang N E, Zheng S, Steven R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1998, 454 : 903-995.
- [6] 黄骏,何永勇.经验模态分解停止准则及在故障诊断中的应用[J].机械强度,2011,33(5):655-699.
- [7] IEC. Communication networks and systems for power utility automation-part 7-3: basic communication structure-common data classes [S]. 2010.
- [8] 李天云,赵妍,季小慧,等.HHT方法在电力系统故障信号分析中的应用[J].电工技术学报,2005,20(6):87-91.
- [9] 李天云,王飞,祝磊,等.基于固有模态能量熵的配电网单相接地故障选线新方法[J].电网技术,2008,32(增刊):128-132.
- [10] 王德文,邸剑,张长明.变电站状态监测IED的IEC 61850信息建模与实现[J].电力系统自动化,2012,36(3):81-86.

(收稿日期:2015-03-15) **EA**

信息动态

魏德米勒仪表接线箱在惠州炼化二期项目中的应用

惠州炼化二期200万t/年炼油改扩建及100万t/年乙烯项目,是中国海洋石油总公司投资建设的大型炼化一体化项目,位于广东省惠州市大亚湾经济技术开发区石化工业区。惠州炼化二期项目建成后,中国海洋石油总公司下游产业链将进一步完善,惠州炼化基地将被打造成具有国际先进水平的炼化一体化基地。

凭借魏德米勒公司优质的产品,完善的售后服务体系为惠炼一期项目现场危险区域提供成熟、稳定和安全可靠的解决方案,深受业主信任及认可,魏德米勒公司再次成功赢得了惠州炼化二期项目。

石化行业是一项高危的行业,具有易燃、易爆、有毒、强腐蚀性和连续生产等特点,一旦发生火灾、爆炸等事故,往往会造成难以预料的伤亡和财产损失。因此,石化和天然气行业对生产设备的制造、维护和保养的要求十分严格。魏德米勒接线箱在品质和可靠性上均处于世界领先地位,其Klippon® CB系列防爆接线箱广泛应用于惠炼

项目中。魏德米勒Klippon® CB系列防爆接线箱在正常运行条件下不会产生电弧、火花,可以有效确保现场电气联接的安全性。此外,魏德米勒Klippon® CB系列接线箱还具有高强度、耐冲击、设计讲究、注重细节、便于安装、防锈、防尘和防水等特点。魏德米勒接线盒多种表面处理,亦可为客户量身定制,真正做到为客户提供个性化的解决方案和服务。

除了Klippon® CB系列防爆接线箱,魏德米勒还为该项目提供了一体化电联接解决方案,包括魏德米勒PROmax系列开关电源、W系列端子以及为客户量身定制的接口板等产品,主要用于横河DCS控制系统、康吉森的SIS控制系统柜中。

安全可靠的开关电源对于系统的可靠性是非常重要的,一旦开关电源发生故障,若不能及时发现,将会带来严重的后果。魏德米勒PROmax系列开关电源在DCS和SIS系统柜中得到全面广泛的应用,为其中的用电设备供电。