

文章编号:1005-0523(2011)01-0057-05

非有效接地系统单相接地故障选线技术研究

章勇高,滕锦芬,刘 焕

(华东交通大学电气与电子工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:在非有效接地系统中,单相接地故障是最常见的故障类型,而由于非有效接地系统自身的特点,使得不管稳态分量还是暂态分量,都容易受到系统本身或随机因素的影响。快速寻找出故障线路有利于保证供电可靠性,因此探索出最有效的故障选线方法一直是学者们的目标。该文总结和归纳了现有的故障选线技术,并对这些技术作出了评价,最后提出了关于未来研究方向的思路。

关键词:故障选线;单相接地故障;非有效接地系统

中图分类号:TM773

文献标志码:A

我国中低压配电网的中性点广泛采用不接地、经消弧线圈接地和经高电阻接地这三种非有效接地方式。在发生单相接地故障时,这种系统仍能保证线电压的对称性,且故障点电流比负荷电流小得多,不影响对负荷的连续供电,一般允许继续运行1~2 h。但随着电缆线路占供电线路总长度的比例逐年上升,电容电流加大,长时间运行所产生的弧光过电压会严重威胁甚至破坏系统绝缘,从而导致故障扩大成两点或多点接地故障。在配电网中,单相接地故障率最高,需要尽快选出故障线路,以便运行人员及时采取措施。

但由于非有效接地系统发生单相接地故障时的故障电流很微弱,配电系统的参数和负荷不对称,以及故障点电弧不稳定等原因,目前研制出的接地选线装置运行的可靠性和选线准确性还无法满足现场运行的需要^[1]。随着微机继电保护技术的发展,人们提出了很多单相接地选线的新方案,一定程度上解决了配电网运行人员的难题。目前,非有效接地系统的单线接地故障选线方法主要有:稳态分量法、暂态分量法、综合智能化方法^[2-3]。本文通过比较归纳和总结这几种方法,分析各种方法的可行性。

1 稳态分量法

1.1 只适用于中性点不接地系统

零序过电流法利用故障线路零序电流幅值大于继电器的整定值,能够正确动作并发出报警信号^[4]。但此方法继电器整定困难,动作灵敏度低,易误判或漏判,基本被淘汰。基于此方法中的整定困难,文献[5]提出的零序电流群体比幅法仅需要相对比较,它利用故障线路零序电流幅值等于所有非故障线路零序电流之和,即零序电流值最大的线路就是故障线路。但这个方法不能排除电流互感器(TA)不平衡的影响,以及线路长短、系统运行方式及过渡电阻的影响。幅值法的致命问题是不适用于消弧线圈接地系统,而且故障点电弧不稳定也可能造成选线失败。

零序电流比相法则是利用故障线路零序电流与非故障零序电流方向相反的特点选择故障线路。与幅值法相比,它具有较高的灵敏度,但当故障点离互感器较近或线路很短,或者出现高阻接地故障时,测量到的零序电压($3U_0$)和零序电流($3I_0$)较小,相位判别较困难,可靠性低。在总结比幅法和比相法的优缺点后,文献[6]提出了群体比幅比相法:它先从所有出线选取零序电流幅值最大的三条线路,再对这三条线路进行相位比较,若其中一条线路与其他两条不同,则此条为故障线路;若此三条线路相位都相同,则判为母线故障。该方法解决了比幅和比相法的缺点,在实际应用中较为广泛。但即使是运用比相原理,上述方案都只

收稿日期:2010-12-08

作者简介:章勇高(1975—),男,副教授,硕士生导师,研究方向为电力电子技术 in 电力系统中的应用。

适用于中性点不接地系统,这大大限制了其应用范围。因为在过补偿或完全补偿状态下,故障线路零序电流的方向与非故障线路相同,对间歇性接地故障来说,零序电流畸变严重,难以计算其相位,方向法比幅值法更容易出现误判。

1.2 适用于消弧线圈接地系统

在经消弧线圈接地系统中,由于基波零序电容电流得到有效补偿,使得基于基波零序电气量比较的选线方案失效,于是提出了基于高次谐波特征的选线方法。文献[7]指出接地故障线路的5次谐波零序电流比非故障线路的值都大且方向相反,且消弧线圈对5次谐波的补偿作用可以忽略,从而提出了5次谐波法。但谐波分量较小,不利于检测,而且负荷中的5次谐波源、TA不平衡电流和过渡电阻的大小,都在一定程度上影响选线结果。在文献[8]的基础上,作者提出采用改进的Prony算法提取故障零序电流的谐波分量,通过比较谐波分量的幅值和相位来确定故障线路,但是Prony算法计算量大会影响到选线精度^[9]。零序电流有功分量法^[10-11]的思想与5次谐波法类似,只是将参照量换为零序电流有功分量,其检测灵敏度也很低。为了使选线的准确性不受零序电压与电流相位误差的影响,同时也使零序TA特性的非一致性造成的误差被抵消,作者提出了结合补偿电流和工频稳态分量来确定故障线路的方法^[12-13],即把故障线路和非故障线路的零序电流与补偿电流相加,产生复合电流,与各线路故障时的零序电流比较后,经过一定变换得到故障判断量 P 值,利用 P 值的正负判断故障线路。该方法主要是依据线路的零序测量电流和该电流计算出的故障判断电流相位来判断的,因此零序电流互感器的幅值误差和接地电阻的大小变化对选线的准确性影响很小。

以上几种方法都是利用零序电流作为判别量,还有以中性点电压来判断接地故障^[14]。当中性点电压大于整定门槛时就判定系统发生了接地故障,此种方法过于简单且不可靠^[15-16];文献[17]通过采集三相电压和中性点电压并计算它们之间的相角差,将其经过判别逻辑来进行故障选线。虽然此法判据简单、采集量少,但还是会受到TV饱和、高过渡电阻的影响。而文献[18]根据消弧线圈系统的零序等效模型分析了故障状态与非故障状态的状态,定义了线路的 m 参数(调节前、后系统的零序电流与零序电压的比值),根据故障线路与非故障线路 m 参数值的相对大小构建了两者的特征差异,提出了新型的故障选线方法。该判据不仅对金属性接地故障有效,同时对经高电阻接地故障仍然有效。

2 暂态分量法

利用稳态分量法的选线效果不太理想,一个主要原因是稳态接地电流微弱,故障线路中零序电流仅有几安培,检测起来比较困难,而暂态电流幅值是稳态对地电容电流的几倍到几十倍,充分利用这些暂态分量可以提高检测灵敏度和可靠性。因此,基于暂态分量的检测方法已经成为一个研究的热点。

2.1 首半波法

首半波原理是基于接地故障发生在相电压接近最大值瞬间这一假设,暂态零序电流和零序电压的首半波之间存在固定的相位关系,在故障线路上两者极性相反,非故障线路上极性则相同,由此选出故障线路。但极性关系成立的时间很短,且受线路参数、故障初始角、过渡电阻等因素的影响。

2.2 暂态零模电流方向法^[19]

在一选定的频带(selected frequency band, SFB)内,非故障线路用电容来等效。因此,对非故障线路来说,选定频带内的暂态零模电压 $u_c(t)$ 与电流 $i_{cj}(t)$ 满足

$$i_{cj}(t) = C_{cj} du_c(t)/dt \quad j \neq i \quad (1)$$

而故障线路的暂态零模电压 $u_c(t)$ 与电流 $i_{ci}(t)$ 则满足

$$i_{ci}(t) = -C_{0i} du_c(t)/dt \quad (2)$$

式中: j 代表非故障线路电容; i 代表故障线路; C_{cj} 为第 j 馈出线的非故障相对地电容之和; C_{0i} 为所有非故障线路对地电容之和。定义参量 $q(t)$ 为本线路零模电压与零模电流导数的乘积:

$$q(t) = i_{qf}(t) du_c(t)/dt \quad (3)$$

可以推出参量 $q(t)$ 与本线路容性电流的平方成正比,其极性反映零模电流的方向。非故障线路零模电流 $i_{qf}(t)$ 由母线流向线路,参量 $q(t)$ 为正值;故障线路零模电流由线路流向母线, $q(t)$ 为负值,由此构成选线判据。此方法的两个被比量在任何时间上都极性相反,而首半波法中的判别量仅在故障后一个短暂且不确定的时间内极性相反。因此,此法是对“首半波法”的重大改进。

2.3 基于小波分析法

具有时频局部特性的小波变换特别适合处理非平稳信号,因此广泛应用于暂态信号的处理^[20]。从幅值上看,非故障线路的电流行波信号的小波变换模极大值比故障线路小,据此构成了选线判据:电流行波信号小波变换模极大值最大的线路为故障线路,但母线接地时该规律不成立^[21]。文献[22]根据小波变换模极大值的大小和极性来判别故障线路,但由于暂态量频率成分复杂导致该选线方法检测灵敏度低。文献[23]发现单相接地故障时,非故障相暂态电流只受自身线路参数等的影响,因此选用了受系统运行方式变化影响小的非故障相作为研究对象,提出了基于非故障相暂态电流模极大值比值的故障选线,仿真表明此方案不受故障条件的影响,能正确选出故障相别。

2.4 基于小波包分析法

小波包分析弥补了小波变换只分解信号低频部分而不再对高频分量分解的缺点,具有更好的分频特性。在分析配网故障特征的基础上,文献[24]提出了一种基于暂态高频零序瞬时功率的故障选线方法,它以幅值最大的高频暂态瞬时功率的符号作为主判据,以大小作为副判据来选出故障线。但作者都是在相同的频率段求零序瞬时功率,受网络参数、故障时刻等影响,要选择一个各线路暂态量都比较集中的频率段进行选线是比较困难的。文献[25]提出了一种基于多频带分析的自适应选线方法,通过比较所有线路在各自特征频段下的小波包分解系数的极性实现故障选线,具有较高的灵敏度和可靠度,但还是会受到故障发生时刻、过渡电阻的影响。为此引入了能量比因子和暂态因子来反映故障条件的随机性对暂态零序信号的综合影响^[26],提出了基于以上两个因子取值的自适应故障选线方法。该方法充分利用了暂态零序信号的低频、工频和高频信息,自适应地选择在特征频段中选线,对母线和高电阻接地有高可靠性和灵敏性。由于暂态零序电流信号的低频部分会发生不同程度的衰减,文献[27]提出了对低频采样点零序电流信号做增强处理,然后利用小波包分析方法对增强的信号进行小波包分解,根据能量最大的原则实现选线,此方法提高了选线准确性。而文献[28]则通过剔除线路谐振状态的频带,在低频段下对各线路的零序电流进行重构,通过比较重构信号实现故障选线。该方法受故障位置、故障时刻、过渡电阻等因素的影响较小。

3 综合智能化方法

3.1 基于模糊理论分析法

模糊理论是现代智能技术中最重要的技术之一,模糊选线则运用模糊理论实现多判据选线信息融合,根据判据规则建立各选线方法的故障测度隶属函数和权系数隶属函数,最后对各个判据的数值属性进行融合,得出一个综合选线结果。文献[29]提出利用暂态分量、零序电流群体比幅、零序功率分量、能量函数四种选线判据构成的综合判据进行模糊决策,并对选线结果进行实时动态的加权评价,提高了选线的可靠性。类似的,文献[30]提出用隶属函数表示各故障选线方法的模糊性,应用加权求和进行运算,实现多种选线方法在馈线保护中的融合。这两种方案能达到高准确度,并不受中性点接地方式、运行方式、出线路数、故障位置的影响。

3.2 基于神经网络分析法

基于神经网络的综合智能方法是采用已有的多种接地保护原理和方法,利用神经网络动态修改它们的权值来保证选线的准确性。BP网络具有良好的模式分类能力,尤其适用于故障选线问题。针对BP网络学习收敛速度慢和易陷入局部最小点的不足,文献[31]提出了一种自适应学习速率动量梯度下降反向传播

算法,对神经网络进行训练并应用于配网故障选线,试验表明该方法是有用的。运用相同的思想,作者提出了蚁群算法和神经网络相结合的选线方法^[32-33],它通过对各线路的零序电流信号进行小波变换和傅里叶变换,将提取的故障特征作为神经网络的输入,利用蚁群算法对神经网络进行训练,训练完成后即可故障选线。

鉴于小波变换对暂态信号及微小信号变化很敏感,学者们也研究了小波技术和神经网络相结合的选线方案。文献[34]应用小波变换技术对故障信号进行预处理,滤除工频分量以外的故障信息并构成神经网络的训练样本集,通过构建小波神经网络实现配网故障类型的识别。而文献[35]则通过小波变换提取故障时各出线零序电流信号中的故障特征作为神经网络的输入向量,并用改进的BP弹性算法训练网络。这两类网络的训练速度快,且不受随机因素影响。

4 结论

基于稳态量的非有效接地系统的单相接地故障选线方法灵敏度低、易受间歇性电弧的影响,且不适用于消弧线圈接地系统。利用故障初瞬的暂态分量与相关的处理技术相结合,能明显提高选线精度,特别是目前对暂态分量的高速采样、记录和分析已经很容易实现,大大促进了暂态接地选线技术的发展。但任何单一选线方法很难完全适应各种电网结构与复杂的故障状况,通常单一选线方法所利用的故障特征有限,而且这些故障特征容易受到电网结构、接地方式、线路长短、互感器误差等诸多因素的影响,降低了选线可靠性。

为此,对于非有效接地系统单相接地故障选线的方案,一方面可以研究不同的故障选线方法的融合处理,以得到一个综合选线结果;另一方面可以研究非有效接地系统中不同测量点的各种故障判别量的融合处理,利用更多的故障判别量进行综合故障选线,以减小其他因素的干扰,提高选线的准确性;此外,单一的现代智能技术也有自己的优缺点,如果能把多种现代智能技术有机整合,则可解决单一现代智能技术无法解决的许多复杂问题,将各种现代智能技术整合应用于非有效接地系统的故障选线中也是一个研究方向。

参考文献:

- [1] 孔瑞忠,董新洲. 基于电流行波的小电流接地选线装置的实验[J]. 电力系统自动化,2006,30(5):63-66.
- [2] AGGARWAL R K, XUAN Q Y, DUNN R W. A novel fault classification technique for double-circuit lines based on a combined unsupervised/supervised neural network[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(4): 1250-1255.
- [3] THOMAS DALSTEIN, BEMD KULICKE. Neural network approach to fault classification for high speed protective relaying [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(2): 1002-1010.
- [4] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [5] 潘贞存. 比相式和比幅式非有效接地系统接地选线保护[J]. 山东电力技术,1991(3):60-64.
- [6] 郝玉山,杨以涵,任元恒,等. 小电流接地选线的群体比幅比相原理[J]. 电力情报,1994(2):15-19.
- [7] 郝玉山,齐立芳,严永生,等. 零序网络中的谐波电流分布[J]. 华北电力学院学报,1995,22(3):12-17.
- [8] CHAARI O, BASTARD P, MEUNIER M. Prony's method: an effect tool for the analysis of earth fault currents in Petersen-coil-protected networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(3): 1234-1241.
- [9] 李晶,谷彩连. 非有效接地系统单相接地故障选线的算法研究[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报,2008,13(1):1-5.
- [10] 杜丁香,徐玉琴. 消弧线圈接地电网有功选线[J]. 继电器,2002,30(5):33-36.
- [11] 张慧芬,潘贞存,桑在中. 一种中低压配电网单相接地故障选线新原理[J]. 电网技术,2005,29(3):76-80.
- [12] MA CHUNYAN, GONG YING, HOU MAJUN. Faulty line selection of compensation power network based on synthetic steady components[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 89-92.
- [13] BENMOUYAL G, MAHSEREDJIAN J. A combined directional and faulted phase selection element based on incremental quantities[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(4): 478-484.
- [14] 刘和平. 新型快速可调消弧线圈系统研究[D]. 重庆:重庆大学,2004.

- [15] 曾祥君,于永源,周有庆,等. 配电网谐振状态与单相接地状态的辨识[J]. 电力系统自动化,1998,22(8):41-43.
- [16] HUANG W Y, KACZMAREK R, BASTARD P. An efficient treatment of transient residual currents in distribution networks grounded with Petersen coil[C]// Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection, Amsterdam; Netherland, 2004:685-688.
- [17] 邝冶,雷鸣. 一种配电网故障类型及相别的判别方法[J]. 低压电器,2009(17):13-15.
- [18] 江渝,冉立,刘和平,等. 可调节消弧线圈接地系统单相接地故障的辨识和选线[J]. 电工技术学报,2007,22(8):101-107.
- [19] 薛永瑞,徐丙垠,冯祖仁,等. 非有效接地故障暂态方向保护原理研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(7):51-56.
- [20] CHAARI O, MEUNIER M. Wavelets: a new tool for the resonant grounded power distribution system relaying[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3):1301-1308.
- [21] SU QIANLI, DONG XINZHOU, SHI SHENXING, et al. A new principle of fault line selection for distribution[C]// Developments in Power System Protection Conference, IEE, 2001.
- [22] JIA QINGQUAN, LIU LIANGUANG, YANG YIHAN, et al. Abrupt change detection with wavelet for small current fault relaying[J]. Proceeding of the CSEE, 2001, 21(10):78-82.
- [23] 吴谢东. 基于小波变换的配电网故障选线的研究[J]. 电力科学与工程,2006(2):21-24.
- [24] KANG ZHONGJIAN, YU WEI. Method of distributed power system fault line selection based on transient high frequency instantaneous zero-sequence power[J]. RELAY, 2007, 35(1):21-25.
- [25] 戴剑锋. 基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(5):44-47.
- [26] ZHANG YANXIA, WANG QINGLIANG. New method for single-phase-to-ground fault feeder selection based on analysis of fault transient characteristics[J]. Automation of Electric Power System, 2009, 33(16):76-80.
- [27] 庞清乐,孙同景,孙波,等. 基于小波包分析的配电网故障选线新方法[J]. 电力自动化设备,2007,27(4):19-22.
- [28] 赵艳. 基于小波分析的配电网故障选线方法研究[J]. 江西电力职业技术学院学报,2009,22(3):1-4.
- [29] 叶雷. 模糊数学在配电网故障选线中的应用[J]. 大众科技,2005(2):46-47.
- [30] KANG YI, LIU PEIYUE, WANG JUNFEN. Application of fuzzy set theory to single-phase-to-ground fault line detection[J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(3):6-10.
- [31] CHENG PENGBO, YUAN FUKU, LIU Canping, et al. Application of an improved BP network calculation to the fault diagnosis of distribution network [J]. RELAY, 2007, 35(12):27-31.
- [32] 庞清乐,孙同景,孙波,等. 基于蚁群算法的神经网络配电网故障选线方法[J]. 继电器,2007,35(16):1-6.
- [33] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics: Part B, 1996, 26(1):29-41.
- [34] ZHAO ZHI, WANG YANSONG, BAO BING, et al. Fault type identification in distribution network based on wavelet neural network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(6):93-96.
- [35] 郝金陵,袁振海. 基于小波神经网络的非有效接地选线的研究[J]. 电测与仪表,2007,44(11):1-5.

The Singal-phase-to-earth Fault Location Technology in Neutral Ineffectively Grounded Systems

Zhang Yonggao, Teng Jinfen, Liu Huan

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The phase-to-earth fault is the most common fault in ineffectively grounded systems. However, due to their own characteristics, all the steady-state or transient components in these systems are affected by themselves or other random factors. Finding out the fault position quickly can guarantee reliability of power supply. Therefore, exploring effective fault location methods has been one of the most important goals to researchers. This paper summarizes and concludes the existing fault location technology. Finally, future researching orientation is proposed.

Key words: fault location; single-phase-to-earth fault; ineffectively grounded systems