

配电网中性点接地方式分析

赵冉, 谭伟璞, 杨以涵

(华北电力大学电气与工程学院, 北京 102206)

摘要: 在我国配电网全面改造的今天, 接地方式的选择是建设安全可靠科学电网的重要基础; 电力技术的发展和高质量供电的需求, 需要我们用新的观点去认识、选择它。结合配电网接地方式的发展现状, 介绍了中性点经消弧线圈接地和经低阻接地这两种我国最具代表性的接地方式的特点, 在线路故障、保护、过电压方面结合实际运行数据和理论分析深入探讨了两种接地方式的优劣, 并进行综合比较。最后, 针对配电网中性点接地方式的选择阐明了自己的观点。

关键词: 配电网; 接地方式; 谐振接地; 低阻接地; 线路保护; 过电压

Analysis of neutral grounding operation modes for distribution network

ZHAO Ran, TAN Wei-pu, YANG Yi-han

(College of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Nowadays, distribution network of China is facing to reconstruction. The choice of neutral grounding modes is an element in the construction of a safe, reliable, and scientific network and the development of electric power technology and the needs of improving power quality, makes us understand it with a new view for a better choice. This paper, combining the development actuality of the neutral grounding modes together, introduces characteristics of two representative neutral grounding modes, i.e. arc-suppression-coil-earthed system and low-impedance-earthed system. It details the both modes and makes a comparison between them on the aspects of line fault, protection, and its over-voltage, through actual fault data and theoretical analysis. Finally, it illuminates the writer's viewpoint on the choice of neutral grounding operation modes for distribution network.

Key words: distribution network; grounding modes; resonant earthed system; low-impedance earthed system; line protection; over voltage

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)04-0022-05

0 引言

配电网中性点接地方式经过了一个长期的发展。初期, 电力系统容量较小, 人们认为工频电压升高是绝缘故障的主要原因, 对电流的一系列危害作用、电力设备耐受频繁过电流冲击的能力估计不足, 所以, 中性点最初都采用直接接地方式运行。而后, 电力系统不断扩大, 单相接地故障增多, 线路跳闸频繁, 于是便将直接接地方式改为不接地方式运行。随着电网的继续发展, 传输容量扩大, 线路距离增长, 电压等级升高, 使得线路发生单相故障时, 在故障点产生很大的接地电容电流, 由此形成的电弧很难熄灭, 同时间歇电弧引起的过电压往往使事故扩大, 降低了电网运行可靠性。

为了解决上述问题, 人们采取了两种不同的方法。以德国为代表的欧洲国家采用中性点经消弧线圈

圈接地方式, 自动消除瞬间单相接地故障, 目前在欧洲大陆 3 kV~132 kV 电压等级系统中, 中性点经消弧线圈接地现已发展成为主流的中性点接地方式; 以美国为代表的国家采用了中性点直接接地和低电阻、低电抗等接地方式, 配合快速继电保护和开关装置, 瞬间跳开故障线路^[1-3]。

中性点经消弧线圈接地和经低阻接地是我国配电网两种最具代表性的接地方式。早期配电网主要采用经传统消弧线圈接地, 近些年配电网进行了大规模改造, 有些人认为消弧线圈接地存在的严重问题, 低阻接地可以很好地解决, 更为先进, 于是城网中很多消弧线圈接地被改为低阻接地方式^[4]。电力技术的发展, 出现了消弧装置及其配套的选线技术, 克服了传统消弧线圈接地技术的种种缺点, 取得了巨大进步。在这样的背景下, 为建立一个既高效可靠又满足未来需求的配电网, 探讨配电网中

性点接地方式显得意义深刻。

1 不同中性点接地方式的特点

中性点经消弧线圈接地方式亦称为谐振接地,具有以下优点:1)发生单相接地故障时,消弧线圈产生的感性电流补偿电网产生的容性电流,可以使故障点电流接近于零,一般允许线路带故障运行2h,增强了供电可靠性。2)故障点很小的故障电流,大大降低了故障建弧概率,可以有效阻止瞬时接地向永久性接地故障的演变。对于配电网中日益增加的电缆馈线,虽然接地故障的发生概率有上升趋势,但因接地电容电流得到补偿,所以单相接地故障难以发展成为相间故障。3)可自动消除瞬时性单相接地故障,使跳闸率较低。4)故障电流的减小有利于电磁兼容及人身安全。该接地方式虽然有很多优点,但也存在一些问题:1)系统运行方式发生改变时会因补偿不当引起谐振过电压。2)线路发生永久接地故障时,消弧线圈的补偿和选线功能,不利于快速隔离接地线路,造成故障时间较长,可能使事故扩大,不利于设备安全。

低阻接地方式应符合零序电阻 R_0 与其电网正序阻抗 X_1 之比小于等于1,接地故障电流通常为200~1000A。其优点如下:1)利于限制过电压水平,系统单相接地时,健全相电压升高持续时间短,对设备绝缘等级要求低,一次设备的耐压水平可按相电压水平来选择,对设备安全有利。2)单相接地时,由于流过故障线路的电流较大,零序过流保护有较好的灵敏度,易于快速检出并隔离接地线路,减小接地故障时间,防止事故扩大,保护方法简单易行、动作准确。但也同时存在一些缺点:1)接地故障电流较大,零序保护如不及时动作,将危害故障点附近的绝缘,导致相间短路故障,并危及人身安全。2)数百安培的短路电流会带来电磁环境恶化,对附近的通信线路产生较大干扰。3)过大的故障电流会在故障点产生大量电离气体,建立持续的电弧,该条件下故障的自动清除是不可能的。这导致线路发生可恢复的瞬时性故障时容易跳闸,线路跳闸率较高^[5,6]。

2 接地故障分析

资料一:根据某石化厂1976年5月~1986年5月十年的统计结果,在大部分为电缆线路的35kV谐振接地电网中,共发生单相接地故障65次,其中瞬间接地故障44次,占67.7%;在纯电缆的10kV谐振接地电网中,共发生单相接地故障37次,其

中瞬间接地故障21次,占56.8%^[7]。

资料二:2001年,在某市中心区有10个采用低阻接地方式的变电站,共有173条10kV出线,纯电缆出线127条,10kV线路总长度为658.8km,其中电缆560.6km(占总线路长的85.1%)。全年共计跳闸132次,其中永久故障57次,重合闸或强送成功的瞬间故障75次。这132次跳闸中单相故障78次,单相瞬间故障47次,占单相故障的60.3%。若考虑由于单相瞬时故障而引起的单相和相间永久故障,这个比率会更高。

资料三:某低阻接地的10kV变电站,配电线路条件较好,2001年共有24条较新出线,线路总长94.0km,其中架空线34.8km,电缆线路59.2km(占线路总长的63.0%),2001年共有单相故障20次,其中重合或强送成功14次,瞬时故障占单相故障的70%^[8]。

资料四:某变电站10kV出线10条,其中架空线路215km,电缆11.2km(占线路总长的5.0%),计算电容电流20.09A,该变电站2000-11至2002-04单相接地故障仅16次,永久性和瞬时性故障各占50%。其中8条城区线路(架空线126.1km,电缆11km),发生7次单相接地故障,瞬时接地故障2次,仅占28.6%;两条农村线路(架空线89.4km,电缆0.2km)发生9次单相接地故障,瞬时接地故障6次,占66.7%^[9]。

从现场运行情况还可以得出以下结论:

1)资料一、二、三提到的系统都有大量的电缆线路,电缆线路与架空线路不同,线路自身故障相对较少,大多数故障发生在线路末端和中接头。但无论是谐振接地系统还是低阻接地系统,在单相接地故障中,单相瞬时故障保守估计占50%以上。

2)资料二、三、四中,电缆占线路总长的百分比分别是85.1%、63.0%、5.0%,每年每条线路发生单相瞬时故障相应为0.27次,0.58次,0.8次,说明电缆比例越高的电网,单相瞬时故障越少。

3)资料四进一步说明,城市电网的瞬时故障发生率远低于农村电网,这个原因主要是因为农村电网输电环境差,线路易受雷击和其他外力的破坏。

综上分析线路的故障率主要取决于配电线路条件,与配电网中性点的接地方式并没有直接关系。瞬时故障占单相接地故障的50%以上,与线路条件无关。不同的接地方式决定了故障发生后的事故处理方式,通过下面的分析可以进一步了解中性点谐振接地方式与低阻接地方式在处理瞬时故障

上有明显的差别。

3 线路保护分析

在线路保护方面,两种接地方式各有其特点:在瞬时性单相接地故障的处理上,谐振接地方式过程为:故障→补偿→清除;低阻接地方式过程为:故障→跳闸→重合→清除;在永久性单相接地故障处理上,谐振接地方式过程为:故障→补偿→选线→跳闸;低阻接地方式过程为:故障→跳闸→重合→跳闸。在此,通过对重合闸和选线技术的分析,对这两种接地方式进行比较。

3.1 接地故障的重合闸

3.1.1 重合闸对设备的影响

低阻接地方式下,根据供电运行的实际统计,速断保护在中低压线路的跳闸中占到50%左右,根据前面分析的瞬时故障率可知速断跳闸后重合到永久故障上最多可占速断跳闸的50%,由此可推断引起速断跳闸的短路电流对变压器的二次冲击可以占到全部跳闸故障的25%。随着电网的发展,大中型变压器的低压侧短路容量逐年提高,保护重合闸带来的二次冲击对变压器的危害越来越大,必须采取保护措施^[10]。

通常采取的措施主要有:出线1.5 km范围内10 kV架空线路全部采用绝缘线、主变低压侧的母线绝缘包覆;或直接退出重合闸。现场采取的这些措施虽然有效,但对事故的防范仍然是被动的,可能会增大线路的跳闸时间。

3.1.2 重合闸对用户的影响

计算机等设备的应用使用户的负荷特性发生了变化,对供电可靠性变得越发敏感,一个瞬时断电便会导致这些设备出现异常,严重时会造成数据丢失,导致难以预料的损失。如今对高质量供电的需求,使得我们衡量一个配电网络是否可靠,不仅要考虑对用户的断电时间CML(Customer Minutes Lost),而且还应该考核断电次数。

电能质量对瞬时断电是这样定义的,单相或多相导线在某段时间内彻底失电(或低于0.1倍的额定值),其持续时间在10 ms至3 s之间^[11]。

重合闸时间一般整定为1.5 s。在线路发生单相瞬时性接地时,从保护动作出口切除故障到恢复送电,时间在2.5 s之内。

基于上述概念,重合闸的成功与否对用户来说都是一次断电,它对用户的影响将会越来越大。

3.1.3 降低重合闸的影响

上述中压配网重合闸存在的一些不良影响变得日益突出,而尽可能地减少跳闸次数是降低其不良影响的最直接有效的办法。低阻接地方式下的配电网络,是依靠重合闸来清除线路瞬时故障,势必造成线路跳闸次数增多。而谐振接地系统依靠消弧线圈的补偿来清除瞬时故障,单相接地电流小,瞬时故障自恢复的概率很大,使线路跳闸次数大大降低。虽然消弧线圈的响应时间最快也要20 ms,仍然不能避免瞬时断电,但与1.5 s的重合闸时间相比,已经在很大程度上减小对负荷的影响。所以说系统采用谐振接地方式可以有效降低重合闸带来的不良影响。

3.2 接地故障选线方式分析

接地故障的过渡电阻值,对谐振接地系统中的单相接地选线保护和低阻接地系统中的单相接地零序保护的影响,有很大差异。

在低阻接地的大电流系统中,以电流定值整定的各类保护装置,不同程度地受到这一电阻值的影响。为此,该保护装置多采用增大动作值和提高灵敏度系数的办法,来增强保护的可靠性。对于电缆线路,其各类故障主要发生在端部,尽管其过渡电阻值也不尽相同,但由于电缆的输电环境相对良好,通过实际实验可以得到该值的分布情况,由此对保护进行整定;对于架空导线,接地情况会变的非常复杂,导线断线后与沥青路面接触,与土壤接触,接触面是否有水,都会大大影响过渡电阻值,且其时变性也很强^[12]。此外,断线落地后,有时因张力不均因素,导线芯会缩入外层绝缘里去,这种情况更令保护装置无能为力。因此,这给以电流为定值的各类保护装置的正确动作带来不可避免的影响。

谐振接地系统发生单相故障时,由于消弧线圈的补偿作用,虽然使故障线路的故障电流大幅度降低,但可以通过单相接地选线装置提取故障信息,仍可在不同过渡电阻值下正确选线。如今选线装置日趋成熟完善,其选线方法主要有突变量法、能量法、谐波比幅比相法、稳态小波法、暂态小波法和首半波法。众多方法的使用可适应各种单相故障情况,使得选线成功率达到98%以上。单相故障跳闸不再依赖低阻接地方式下的继电保护装置,无需电流整定,单相故障处理方式灵活,适应复杂的现场情况。

所以说在接地故障选线方面,带有新型选线装

置的谐振接地系统有着低阻接地系统无法比拟的优势。

4 配电网过电压问题分析

4.1 谐振接地系统的过电压

谐振接地系统过电压现象主要有：①消弧线圈与线路电容形成的铁磁谐振过电压；②配电变压器高压绕组接地过电压；③弧光接地过电压；④断线谐振过电压等。

谐振接地系统的零序回路中消弧线圈的感抗与电压互感器的励磁电抗是并联关系，而消弧线圈的感抗要比电磁式电压互感器励磁电抗小得多，因此电磁式电压互感器的励磁感抗也就被消弧线圈的感抗所制约，电网中因电磁式电压互感器的饱和引起的三相不平衡，就不会产生铁磁谐振过电压。

中性点消弧线圈的励磁电感 L 可看成低压侧的等值电感，变压器等效电容为 C_{12} ，如图 1 所示。当高压侧单相接地时，若消弧线圈为过补偿，低压侧可能出现串联谐振传递过电压，使 U_L 显著增大^[13]。如今，消弧线圈通常采用自动跟踪补偿功能，该现象难以发生。

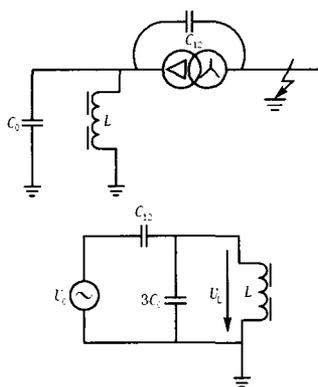


图 1 高压绕组接地过电压接线图和原理图

Fig.1 Over-voltage of grounding fault in high-voltage winding

配电网中性点经消弧线圈接地，特别是经自动跟踪补偿消弧装置接地，由于消弧装置始终把接地残流控制在 10 A 以下，再加上消弧装置可减缓弧道恢复电压的上升速度，有利于电弧可靠熄灭，避免重燃。另一方面，串接在电抗器与地之间的阻尼电阻起着吸收能量和阻尼的作用，有效地抑制弧光接地过电压的幅值。稳定电弧过电压一般为 $2.3U_{\phi m}$ ；间歇性电弧过电压一般为 $3.0U_{\phi m}$ ，在脱谐度大于 10% 时，可达 $3.5U_{\phi m}$ ，在大多数情况下，可被限制在 $2.3U_{\phi m}$ 以下。消弧线圈的存在，大大降低了出

现过电压的概率。出现 $3.0U_{\phi m}$ 的概率仅为 2%^[14,15]。

另外，对于断线引起的谐振过电压，其过电压幅值与消弧线圈运行状态有关，一般情况下消弧线圈处于过补偿运行方式，当发生任何断线故障时，电网中性点位移电压都不会高于相电压值。

4.2 低阻接地系统的过电压

中性点低阻接地可有效抑制大多数谐振过电压，能把弧光接地电压限制到 $1.9U_{\phi m}$ 以下。对于断线故障，能够限制电源侧过电压，保护电源侧的易损设备。

在这里值得一提的是，由于低阻接地系统故障接地电流很大，转移过电压问题便会越发突出。该问题主要有两个方面：

- 1) 接地故障点对地电位显著升高。
- 2) 变电所接地电阻上的电位升高。此电压将直接传递到低压侧的中性导体 (N) 和保护导体 (PE) 上，引起低压侧过电压，给低压用户带来威胁。

4.3 过电压问题综合比较

中性点谐振接地要比低阻接地在过电压方面存在更多的问题，但如今的消弧线圈控制技术完全可以在很大程度上避免过电压的发生。直流偏磁式消弧线圈、高短路阻抗消弧线圈、调容式消弧线圈以及主从式消弧线圈，采用电子开关控制技术，使得消弧线圈在系统正常时远离谐振点运行，单相故障时迅速调整消弧线圈到全补偿点，能很好地解决过电压问题。而低阻接地方式虽然从原理上就可以较好地抑制过电压，对接地网却有很高的要求。

5 结论

通过对线路故障、保护和过电压等方面问题的分析，可以得出以下结论：

1) 从线路故障方面考虑，对于瞬时故障发生次数较多的配电网（通常是以架空线路为主的农村电网）优先选择中性点谐振接地方式。对于配电环境好，瞬时故障发生次数低的配电网（通常指城市的以电缆为主的电网）谐振接地并无优势。

2) 在保护方面，谐振接地比低阻接地更能保证供电可靠性，对于供电可靠性要求很高的用户，应优先考虑谐振接地方式。

3) 在过电压方面，谐振接地虽能解决该问题，但对控制的要求较高。对于绝缘成本高的电缆网络，可优先考虑低阻接地方式。

综上所述，随着电网规模的增大，人们对供电质量要求的提高，以及对配电环境影响等方面的重

视, 谐振接地方式的优势更加突出, 是未来发展的方向。但对于当今城市电缆网络来说, 低阻接地方式仍是一种有效实用的接地方式。

参考文献

- [1] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. Resonant Earthed System [M]. Beijing:China Electric Power Press, 2000.
- [2] Burke J, Marshall M. Distribution System Neutral Grounding [J]. IEEE.2001.
- [3] Newbould, Chapman K. Improving UK Power Quality with Arc Suppression Coil[A].In:Conference on Developments in Power System Protection[C].2001. 478-490.
- [4] 徐纪法. 城市中低压配电网及其发展理念[J]. 中国电力, 2001, 34 (2) :43-45.
XU Ji-fa. Low and Medium Voltage Distribution Network and Its Development Comprehension in Urban Area [J]. Electric Power, 2001, 34(2):43-45.
- [5] 刘明岩. 配电网中性点接地方式的选择[J]. 电网技术, 2004, 28 (16): 86-88.
LIU Ming-yan. Selection of Neutral Grounding Modes in Power Distribution Network [J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 86-88.
- [6] 陆国庆, 姜新宇, 等. 一种新型配电网中性点接地方式的研究与实践[J]. 电力设备, 2005, 6 (4): 8-9.
LU Guo-qing, JIANG Xin-yu, et al. Study and Practice of a New Kind of Neutral Grounding Operation Mode for Distribution Network [J]. Electrical Equipment, 2005, 6(4): 8-9.
- [7] 要焕年, 曹梅月. 电缆网络的中性点接地问题[J]. 电网技术, 2003, 27 (2) :84-89.
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. On Neutral Grounding Modes of Cable Network [J]. Power System Technology, 2003, 27(2):84-89.
- [8] 李有铖, 廖建平. 10 kV 小电阻接地系统运行分析与评价[J]. 中国电力, 2003, 36 (5) :80-81.
LI You-cheng, LIAO Jian-ping. Practice and Evaluation of Low Resistance Grounding in 10 kV Power Distribution System [J]. Electric Power, 2003, 36(5): 80-81
- [9] 平绍勋, 石健. 10 kV 配网小电阻接地运行分析[J]. 高压电压技术, 2002, 28 (9) :51,55.
PING Shao-xun, SHI Jian. Practice of Low Resistance Grounding in 10kV Power Distribution System [J]. High Voltage Technology, 2002, 28(9):51,55.
- [10] 罗思需, 高梯才. 对 35 kV 及以下线路保护重合闸方式的改进方案[J]. 继电器, 2006, 34 (2) :88-89.
LUO Si-xu, GAO Ti-cai. Reformative Scheme of Protection Reclosure Mode for 35 kV Line and Its Lower Line [J]. Relay, 2006, 34(2):88-89.
- [11] 许海文, 李庚银, 彭咏龙. 用户电力技术与暂态电能质量的改善[J]. 华北电力大学学报, 2002, 29 (4): 30-31.
XU Hai-wen, LI Geng-yin, PENG Yong-long. Custom Power Technology and Improvement of Transient Power Quality [J]. Journal of North China Electric Power University, 2002, 29(4): 30-31.
- [12] 曹承宗. 城网 10 kV 系统中性点接地方式若干问题的探讨[J]. 电器技术, 1995, (3) .
CAO Cheng-zong. Discussion of Some Questions Concerning Neutral Grounding Modes in Urban 10 kV Power Network [J]. Electric Equipment Technology, 1995, (3).
- [13] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.77-81.
LI Fu-shou. The Operation of Ineffective Earthed System [M]. Beijing:Hydraulic and Electric Power Press, 1993.77-81.
- [14] 李润先. 中压电网系统接地实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社,2001.121-126.
LI Run-xian. Practical Technology of Grounding in Medium Voltage Network [M]. Beijing:China Electric Power Press,2001.121-126.
- [15] 陈维贤. 内部过电压基础[M]. 北京: 电力工业出版社, 1981.167-172.
CHEN Wei-xian. Basic of Internal Over Voltage[M]. Beijing:Electric Power Industry Press, 1981.167-172.

收稿日期: 2006-09-04; 修回日期: 2006-11-23

作者简介:

赵冉(1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: inspire_zhao@163.com

谭伟璞(1963-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力电子及其在电力系统中的应用;

杨以涵(1927-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制、数字电力系统等。

许继集团被评为“信息产业科技创新先进集体”

日前, 从河南省信息产业厅召开的省软件工作会议上传来喜讯: 许继集团公司坚持科技创新, 在实现电信强国、电子强国的战略目标中争先创优, 建功立业, 做出了突出贡献, 被国家信息产业部评为“信息产业科技创新先进集体”, 河南航天金穗电子有限公司总经理陆振华被评为“信息产业科技创新先进工作者”。