

配网选线保护与 故障定位

■ 束洪春 著



科学出版社

配网选线保护与故障定位

束洪春 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书结合作者多年的研究积累,主要介绍谐振接地电网暂态分析法单相接地故障选线、配网单相接地暂态量保护原理和直配线路及多分支树型辐射网的行波及其频差法故障定位原理与方法,以及基于故障行波突变能量沿馈线分布特性及其距离标定的直配线及辐射网故障分支识别与定位新方法和诊信注入法馈线故障定位。全书结构力求简练,以阐释方法原理为主线,配有大量算例和效果图,便于读者理解、掌握其要义。

本书可作为电气工程学科、专业的高年级本科生和研究生的研修内容,也可供配电网选线保护与故障定位的研究者和相关科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

配网选线保护与故障定位/束洪春著. —北京:科学出版社,2016.3

ISBN 978-7-03-047313-4

I. ①配… II. ①束… III. ①配电系统-继电保护②配电系统-故障定位
IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 026787 号

责任编辑:张海娜 纪四稳 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年3月第一次印刷 印张:26 1/2 插页:2

字数:520 000

定价:168.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电力系统中性点是指星型连接的变压器或发电机的中性点。确定这些中性点的接地方式是一个复杂命题,关系到绝缘水平、通信干扰、接地保护方式、电压等级、系统接线和系统稳定等很多方面的问题。我国 3~35kV 中压配电网多采用中性点不直接接地方式(小电流接地方式),其中主要有四种,即中性点不接地方式、中性点经消弧线圈接地方式、中性点经高阻接地方式和中性点经小电阻接地方式。中性点不直接接地方式具有能降低短路电流和便于系统熄弧等优势,因此在中压配电系统中得以广泛应用。

配电网是电力系统中与用户联系最为直接的环节,其覆盖范围广泛,运行环境复杂,馈出线分支较多。基于经济建设的历史背景和条件,我国电力系统曾一度存在“重发(电)轻供(电)不管用(电)”及“重输电,轻配电”的现象,因此配电网无论在技术还是装备上都明显落后于输电系统。而配网故障占整个电力系统故障的很大比例,且该比例有逐年增加的趋势。随着城市电缆线路于配网线路占比的增加,馈线充电电容电流增大,因而在发生弧光接地情况下熄弧变得更加困难。经消弧线圈接地方式被广泛采用,利用稳态量“群体比幅比相”的传统选线方法不再适用补偿接地电网。此外,由于架空馈线导线坠地、树木等与架空馈线接触所引起的高阻故障时有发生,实际运行中故障选线频繁出现漏选和误选的情况。同时,由于配电网大多具有“闭环结构,开环运行”的特点,其分支众多、结构复杂,且拓扑结构经常发生变化,即使故障选线正确,也很难进一步确定故障所在的分支和位置(故障定位)。因此技术和经济综合因素决定了配电网故障选线、单相接地保护和故障定位有其特殊性和复杂性,多年以来一直是影响重大而广泛却未解决的技术课题,对此课题仿真研究较多,实际的实体试验和测试研究却很少。架空线路、线缆混合线路的补偿接地电网故障稳态分量甚小,而其行波及暂态量显著,故障信息丰富,应予以足够的关注和重视。应用现代微电子及信号处理技术,可充分利用补偿接地电网故障行波及暂态量所含有的丰富故障信息,构建基于“群体比幅比极性”、暂态零模电流能谱分布、零模电流暂态无功分量检测、模型及其参数匹配原理的暂态分析法单相接地故障选线一系列新算法,利用输电网“方向元件”的概念建立配网单相接地故障暂态量保护原理和算法,以及探析直配线路和多分支树型辐射网的行波及其频差法故障定位方法及其有效性。

传统故障选线装置启动元件是通过检测补偿电网中性点零序电压于一个工频周期的有效值是否超过设定的整定值予以启动的,当零模电压有效值超过整定值时,记录故障前后的数据,进行接地故障检测,其整定值通常设定为 15% 的额定相

电压幅值。为了进一步消除配网三相不对称度对启动量算法计算精度的影响,一般采用相邻两个周期的零序电压变化量作为接地选线的启动判断。当故障初始角较小,或当过渡电阻较大时该启动算法有可能失效,可见该启动方法灵敏度不高,且启动时间相对较长。分别利用零模瞬时电压的采样值突变、零模瞬时电压的高频突变和零模瞬时电压的变化梯度来构造补偿接地电网高阻故障(HIF)检测算法。配网故障与健全是电网的两个模态,馈线故障与健全是馈线的两个模态,因此故障选线属保护命题,亦属快速模式识别命题。通常,由于故障馈线与健全馈线的零模电流突变方向相反,而相同类型的健全馈线零模电流波形之间相似性较高,且故障馈线零模电流为所有健全馈线对地电容电流之和,其能量最大,所以可分别运用小波变换模极大值方法和小波系数相关分析检测故障后各馈出线路零模电流行波首波头的极性,利用 Hough 变换直线检测和直线拟合等来刻画故障初始阶段零模电流的突变方向,继而甄别故障馈线。故障馈线与健全馈线的零模电流之间的时频特征有着显著差异,而健全馈线之间有着很强的相似性,通过比较各馈线之间的时频相关性能够判别出故障线路。

配网中由于电缆馈线的大量使用,配网线路故障后各馈线波形更为复杂,健全馈线(含电缆馈线)之间零模电流波形相似性变差,仅利用零模电流全量的时域相关性的选线方法有可能会失效。而故障发生后,故障馈线零模电流前半波暂态能量最集中,利用小波分析方法求取故障电流全频带内的小波能量熵作为度量故障馈线与健全馈线之间“电气特性”差异的一种测度,由此实现故障线路的辨识。在一定采样率和整工频周期时窗长情况下,通过选取除工频频带能量最大的特征频带(SFB)内的故障信息进行故障选线,可提高选线正确率。有如各馈出线路故障零模电流的形态学峰谷检测、S 变换特征频率幅值及辐角检测的选线方法等。当补偿接地电网三相电流均装设电流互感器(TA)时,可利用故障馈线的故障相突变电流与健全相突变电流相似性较差,而在原三相系统平衡对称的原理性假设下,其健全馈线三相电流突变量属对地电容电流幅值相等、波形一致、相似性极高的这一特点,构建基于特征频带内的三相电流突变量的的小波系数相关分析法故障选线。

当补偿接地电网发生单相接地故障后,以故障附加 u_0 作为激励源,模拟计算各馈线无故障模型下的零模电流响应。若线路未故障,则其模拟计算的零模电流波形与实测波形相一致;若线路故障,则模拟计算的零模电流波形与实测波形不一致,即应用“测后模拟”原理进行故障选线,实属模型及其参数匹配判别方法。将所有馈出线路零序功率作为样本数据进行主成分分析(PCA)的聚类分析,利用第一主成分 q_1 值进行测试,建立 PCA 故障选线元件,甄别出故障馈线。当补偿接地电网相电压过峰值附近发生单相接地故障时,暂态零模电流主要是健全线路电容充电暂态电流,其暂态特征十分明显,借此,可以建立基于健全线路电容充电暂态零模电流相比较的各种分析法故障选线原理;当相电压过零附近发生单相接地故障时,暂态零模电流主要是电感分量,高频暂态特征不明显,由消弧线圈引起的故障

馈线衰减直流分量较大,健全馈线衰减直流分量较小,只流过故障馈线而不流过健全馈线。借此,可以通过馈线零模电流衰减直流分量的大小,或通过形态谱的分布规律来识别小角度故障情况下的故障馈线。可以估算故障初始相角,并以故障初始相角的大小为融合依据,重点阐述利用形态学峰谷检测和形态谱检测选线算法的可拓融合、利用零模电流特征频带下的连续小波变换(CWT)系数均方根(RMS)值与衰减直流分量选线算法的可拓融合、利用零模电流进行 PCA 聚类 and D-S 证据理论相结合的连续选线,以及利用各馈线零模电流特征频带内幅值、相位信息与人工神经网络(ANN)相结合的故障选线等原理和方法。

补偿电网脱谐度表示电流谐振等值回路的不同工作状态和偏离谐振的程度。当电流谐振回路恰好在谐振点工作,即全补偿状态时,残流中仅含有有功分量,此残流幅值最小,且与零序性质的中性点位移电压同相位。当电流谐振回路在欠补偿状态下工作时,残流中不仅含有有功分量,同时含有容性无功电流分量,其幅值明显大于全补偿状态时的幅值,残流的相位领先于零序性质的中性点位移电压。当电流谐振回路在过补偿状态下工作时,残流中不仅含有有功分量,同时含有感性无功电流分量,同样其幅值明显增大,相位滞后中性点位移电压。然后,谐振接地系统全补偿易产生谐振过电压,欠补偿在系统有线路退出时,可能会跨越谐振点,易产生谐振过电压,因此通常采用过补偿。借此,提出基于各馈线暂态电流的无功功率大小比较的故障选线方法。

传统配电网络多为单电源直接面向用户供电的系统,当发生三相或两相短路故障时,由于其任意相电流明显高于负荷电流,易确保过流保护动作。补偿接地电网发生单相接地故障后,虽然检测到的故障稳态电流很小,但可利用故障行波及暂态量构造方向继电器实现配电网单相接地故障保护,有望与重合闸配合建立补偿接地电网发生单相接地故障自动重合闸技术。引入电压后的功率继电器具有方向性。利用馈线零模电压、电流行波相关分析、SOD 变换、电压方向行波积分值比较,可构建馈线行波方向保护;利用短窗零模电压电流暂态量工频频带上突变方向的直线拟合、SOD 变换、暂态能量,以及基于电压方向行波积分值比较式行波保护原理,可构建馈线单相接地暂态量保护。由仿真获得的补偿接地电网馈线正向故障和反向故障的历史电流样本数据进行 PCA,建立暂态量方向保护的 PCA 聚类空间,形成 PCA 故障识别元件。当故障发生后,根据故障零模电流数据在 PCA 空间的聚类结果,分别应用 q_1 值判别、最小欧氏距离判别和主成分分析-支持向量机(PCA-SVM)判别机制来判断馈线是否发生故障,实现馈线单相接地故障暂态量保护。如果将配网馈线历史实际故障数据作为样本复用来增加 PCA 聚类点簇,则可进一步完善 PCA 故障识别元件。诚然,单端量保护存在不能兼顾选择性和速动性的矛盾,此外,补偿电网还存在单相故障分量小等特殊问题。

配电网电压等级较低,其馈出线路通常不交叉换位、不架设避雷线,馈线一般较短且长短不一。补偿接地电网发生单相接地故障时,非故障相对地电压升高,发

生间歇性弧光接地时,会引起弧光过电压,系统绝缘受到威胁,易发展为相间短路。补偿接地电网的单相接地故障不形成大电流短路回路,只有线路分布电容耦合成分布参数电路,其故障定位难点在于如下几点:①单相接地故障稳态电流微弱,故障特征不明显,故障电弧不稳定;馈出线路故障尤其是高阻故障行波突变微弱,难以捕捉。②配电网拓扑经常改变。③往往仅在变电站侧单端可测,多分支使得辐射网故障行波(群)波形复杂、突变微弱、不易标定和辨识,分支识别和故障定位难度大。通常,配网可利用的故障行波信号分为下列情况:①零模行波的应用。在单相金属性短路接地故障模式下,故障初始行波易于检测,后续波头也清晰可辨,零模行波宜用于单相接地故障测距。②线模行波的应用。单相接地故障的线模行波明显,多相接地故障的线模行波更为明显。在三相电流可测条件下应用较为稳定的线模电流行波测距。③在单相接地弱故障模式下,仍可应用线、零模波到时差和波速曲线迭代方法进行定位,此方法抗过渡电阻能力强。④电压行波、电流行波的选用。对于母线结构为单出线的故障馈线,量测端检测到的电流行波微弱,电压行波明显,宜用电压行波进行故障测距;对于母线结构为多出线的故障馈线,量测端检测到的电流行波明显,相对易于检测标定,宜使用电流行波进行测距。

以直配线路拓扑结构为例,应用小波变换模极大值检测架空线路和电缆线路的线、零模传播速度存在差异,不同尺度下检测到的波速不尽相同,尤其在近端误差最大。同时,于故障点处注入的线、零模行波组合使得零模波速被提速,较理论波速稍微偏大。应用线、零模波速差的方法进行直配架空线路单相接地故障定位,精度较高,但对近端故障存在一定死区,而对远端故障其定位精度下降。分别利用电压方向行波、馈线末端反射波、构造电流方向行波及健全线路的暂态电流行波来提高故障点反射波辨识的可靠性。基于测后模拟原理及波到时序匹配、群体比幅比极性及“相减相消”原理实现故障点反射波的辨识,继而实现直配架空线路的单端行波故障定位。由于配网自身的特殊性,单端可测情况下辨识故障点反射波较为困难,故而寻求利用行波频差来进行故障定位,该方法不依赖于故障点反射波辨识的准确性,在直配架空线路和电缆线路多相接地故障及单芯电缆单相接地故障的情况下,频差法定位结果精度较高。配网线缆混合线路发生故障时,借助 PCA 方法进行故障区段辨识后,根据母线系统结构、可测端及故障类型的差异进行故障行波暂态及频谱分析,利用行波信息或频差进行故障定位。测后模拟原理结合时域波形相关分析或结合波到时序匹配的方法对线缆混合线路进行故障定位,原理上无须进行故障区段的识别,具有一定可靠性。这些基于行波的测距方法关键是故障点反射波明显,能够确保故障点反射波的准确检测标定和识别。

对于多段线缆混合线路,故障行波经各个连接点的多次折射后到达量测端时可能已经衰减殆尽,加上行波采集装置二次信号电缆引线波阻抗不连续和雷击串扰引起的行波振荡、背景噪声和量化噪声等的影响,单端故障行波定位方法在多段线缆混合线路的有效性难以保证。利用 k 最邻近分类算法(k -NN 近邻法)对线缆

混合线路进行故障测距,同样无须进行混合线路区段的识别,在同一位置故障,故障过渡电阻不同时,量测端检测到的行波波形相似度最高,因此可直接利用高速采集的行波数据或其小波分解系数进行波形相似度匹配后,利用回归方法得出故障距离,但该方法受样本密集度的影响,若故障发生于多个线缆连接点之后,行波传播至量测端后奇异点不明显,使得波形差异性有所降低,此将影响 k -NN 近邻法的有效性。提出双端行波测距应用于线缆混合线路,只需检测故障初始行波到达线路两端的时差,无须考虑后续折、反射问题,测距结果更为可靠,但若混合线路段数较多,初始行波衰减严重也可能导致方法的精度下降甚至失效。

对于多分支辐射网单相接地故障,利用“测后模拟”原理得到多个模拟故障距离,通过波到时序匹配方法筛选真实故障距离。多相接地短路故障还可应用频差法进行故障定位,即利用幅值次大的频率与幅值最大频率之差建立故障数据信息表,进行分支识别后,再利用幅值最大的频率通过查询故障信息表进行故障测距,效果可靠。多分支线路故障行波折反射的时空分布使得量测端故障行波(群)波形更加复杂,衰减更加严重,多分支辐射网的单相接地故障行波过程复杂,行波检测、表征、标定和辨识更为困难。利用非对称接地故障行波线、零模分量到达量测端的时差进行单端行波故障定位,无须辨识后续行波,仅利用故障初始行波到达量测端的时间信息及事先建立好的大于供电半径的线、零模波速曲线迭代求解故障位置。该方法对于近端故障测距误差大,不能识别故障分支。若在配网两侧分别使用线、零模波速曲线迭代方法进行故障测距,不需要双端数据同步,可以克服近端故障测距误差大的缺点,能够有效识别故障分支。在辐射网中应用 k -NN 近邻法进行单相接地故障测距,原理上在样本密集度足够高的情况下效果好,精度高,故障分支识别准确。对辐射网故障定位的各种方法的有效性进行分析:应用线、零模波速差的方法不适用于节点规模较大的辐射配网;而对分支节点较多的大型辐射状配网,若故障位于多个分支节点下游,利用 k -NN 算法进行故障测距时,会出现精度不高或者方法失效的情况。

从沿馈线行波能量分布不连续的突变入手,提出一种新型的单端行波测距方法,本质是利用贝杰龙线路模型具有沿线长维度上的高通滤波器作用,其算法是将行波沿线路自近端至远端传播过程中的突变能量分布,即于全线长观测范围 $[0, l]$ 内,取用两个相继的行波观测时窗 $[t_0, t_0 + l/(2v)]$ 和 $[t_0 + l/(2v), t_0 + l/v]$ 内的行波数据,推求沿线传播的正、反方向行波乘积的突变分布,建立其测距函数 $f_u(x)$, 获取反映故障位置和对偶故障位置的突变点 $A(x)$ 和 $B(x)$, 并采用行波路径长度匹配判别式 $A(x) + B(x) = l$ 进行协同判断和辨识,剔除健全线路末端反射波的干扰影响,根据行波路径匹配、沿馈线突变点 $A(x)$ 和 $B(x)$ 的突变极性和幅值三个维度可能利用的信息,甄别 $A(x)$ 和 $B(x)$ 。对于线缆混合线路,采用 PCA-SVM 故障段辨识模型和算法先行识别故障区段,继而在故障馈线段确定两个相继行波数据时窗长,建立其测距函数 $f_u(x)$, 以获取行波突变点 $A(x)$ 和 $B(x)$ 。对于多分

支辐射网馈线:采用辐射状配电网单相故障初始行波曲线簇的 PCA-SVM 模型和算法先行对下游故障分支割集进行识别,利用观测时窗内的行波数据逐段向下游分支进行传递,短路点逐段向下游分支进行搜索,在下游故障分支割集中辨识故障分支,如果能甄别测距函数 $f_u(x)$ 沿线分布的 $A(x)$ 和 $B(x)$,即可实现故障定位。此外,在辐射型多支馈线中,最长馈线 l_{\max} 对下游支路具有行波信息全覆盖特性,故障行波信息传递至馈线 l_{\max} ,即可于最长馈线上施行基于行波突变沿线分布和距离标定的行波测距。

小接地电流系统发生单相接地短路故障,根据规程规定,有足够的时间判断和处理馈线故障;如果属于永久性故障,那么馈出线路必须拉闸停供,给离线外加入检测信号提供了前提条件,因此采用离线的诊信注入法对配网馈线进行短路点支路识别和故障定位,亦具有实用价值。对于直配线单相接地短路点定位,在离线情况下,建立音频稳态线路测距函数和方程,将馈出线始端三相馈线短接在一起后接检测电源,这样处理可将引出线受外界电磁干扰对测距精度的影响减小到最低程度,有利于提高测距精度。对于多支辐射状馈线的任一支路,建构三相馈线单相短路点定位的测距方程,讨论在某一检测频率下对任意支路试探性地故障定位时,可能产生等效故障的原因,继而提出辐射转馈线单相短路点定位的双频激励 (BFE)法和双频激励法测距结果的 $(\Delta x_j, \Delta R_j)$ 测后模拟 (SAT)法,基于这两种方法,可实现辐射状配电网线路的故障分支识别和短路点定位,某油田井区实际辐射型配网馈线的模拟故障测距试验表明,该方法有效。

本书结合作者多年的研究成果,主要介绍谐振接地电网暂态分析法单相接地故障选线、配网单相接地故障暂态量保护原理和直配线路及多分支树型辐射网的行波及其频差法故障定位原理与方法,以及基于故障行波能量突变沿馈线分布特性和距离标定的直配线和多支线故障定位新方法和诊信注入法馈线故障定位。全书结构力求简练,以阐释方法原理为主线,配有大量算例和效果图,便于读者理解掌握其要义。全书内容以作者的研究成果为主,并吸纳同行研究成果作为一定补充,以便全书完整,以飨读者。

本书的相关研究得到云南省重点新产品开发科技计划项目“10~35kV 电网选线技术开发及接地故障监测设备”(2011BA004)的资助,谨致谢忱。

本书旨在为配电网选线保护与故障定位的研习者和相关科技工作者提供参考,由于作者的水平有限,书中难免存在疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2016年1月

目 录

前言

第 1 章 谐振接地配电网单相接地故障暂态过程分析	1
1.1 自动跟踪消弧线圈补偿特性	2
1.2 虚幻接地与单相接地故障的辨识	7
1.3 接地故障电流暂态特性分析.....	19
1.4 单相接地故障电磁暂态仿真分析.....	23
1.5 零模电流倒相过程.....	28
1.6 本章小结.....	29
第 2 章 配电网故障选线	31
2.1 补偿接地电网高阻故障检测算法.....	33
2.2 利用故障电流突变方向的故障选线.....	36
2.3 基于零模电流幅值频率特性的故障选线.....	61
2.4 基于分形和小波能量相对熵的综合选线.....	67
2.5 利用零模电流 S 变换辐角检测的故障选线	77
2.6 基于相电流突变量的故障选线.....	82
2.7 利用无功检测的选线方法.....	91
2.8 利用测后模拟原理的故障选线.....	97
2.9 利用零序瞬时功率曲线进行 PCA 聚类分析的选线方法	101
2.10 基于融合原理的故障选线.....	106
2.11 本章小结.....	128
第 3 章 配电网单相接地行波及暂态量保护	129
3.1 基于暂态能量的单相接地保护	130
3.2 基于零模电压电流行波小波系数相关分析的单相接地保护	132
3.3 基于零模电压电流行波工频频带突变量直线拟合的单相接地保护	134
3.4 基于电压电流 SOD 变换的单相接地保护.....	137
3.5 基于方向电压行波积分值比较的单相接地保护	139
3.6 基于方向行波积分值比较原理的暂态量保护	141
3.7 基于 PCA 聚类分析的暂态量保护	143
3.8 本章小结	151

第 4 章 直配线路故障定位 ·····	152
4.1 直配线路接地故障暂态行波理论分析 ·····	152
4.2 直配架空线路故障暂态行波仿真分析 ·····	156
4.3 接地故障暂态行波在采用模极大值标定下的波速讨论 ·····	164
4.4 直配架空馈线单端行波故障定位 ·····	175
4.5 直配线路故障行波频谱分析及频差法定位 ·····	194
4.6 线缆混合直配线路单端故障定位 ·····	210
4.7 线缆混合直配线路双端行波法故障测距 ·····	250
4.8 本章小结 ·····	255
第 5 章 多分支辐射状配网故障定位 ·····	257
5.1 辐射网架空馈线故障行波传播特性及其频率特性分析 ·····	257
5.2 基于频差的辐射网架空馈线多相接地故障定位 ·····	276
5.3 基于线、零模波到时差的辐射网单相接地故障行波定位·····	279
5.4 基于波形相似性的故障测距 k -NN 算法 ·····	287
5.5 多分支辐射状配网故障定位方法的有效性分析 ·····	290
5.6 本章小结 ·····	296
第 6 章 基于故障行波沿馈线突变分布特性的配电网故障定位 ·····	297
6.1 利用故障行波沿线突变分布特性的直配线路故障定位原理分析 ···	298
6.2 基于沿线方向行波分解及行波突变距离标定的直配架空 线路行波测距 ·····	309
6.3 基于沿线方向行波分解及距离标定的线缆混合直配 线路行波测距 ·····	323
6.4 辐射状配网下游故障支路割集的认识 ·····	342
6.5 基于行波信息逐段传递和故障逐段搜索的辐射网行波测距 ·····	345
6.6 基于最长支路对其下游馈线具有行波信息全覆盖 特性的行波测距 ·····	358
6.7 本章小结 ·····	375
第 7 章 配网短路点定位的诊信注入法 ·····	377
7.1 架空馈线波参数测试 ·····	378
7.2 直配线两相间短路点定位 ·····	379
7.3 直配线两相间短路定位精度讨论 ·····	381
7.3.1 相位测量误差 ·····	381
7.3.2 电压幅值测量误差 ·····	384
7.4 直配线单相接地短路点定位 ·····	386
7.5 直配线单相接地短路点定位精度讨论 ·····	389

7.5.1 相位测量误差	389
7.5.2 电压幅值测量误差	391
7.6 辐射状配电线路单相接地短路点定位	394
7.6.1 辐射型分布参数网络化简运算	396
7.6.2 单相短路点定位方程	396
7.6.3 单相短路点定位方程输入参数	398
7.7 双频激励故障测距方法	399
7.8 馈线短路点定位的测后模拟法	404
7.9 本章小结	406
参考文献	408

第 1 章 谐振接地配电网单相接地故障暂态过程分析

配电网接地方式的问题在世界各国是一个很有争议的热点。为了减少单相接地故障造成的危害,各国采用了不同的方法。

第一次世界大战时期,德国人彼得逊(W. Peterson)于 1919 年首先提出并发明了消弧线圈,提出了经消弧线圈接地的电力系统谐振接地方式,于是当时该国在各种电压等级的电网中性点广泛地采用了经消弧线圈接地方式,电网电压范围为 30~220kV,后因 220kV 电网中事故较多,19 世纪 60 年代初就不再应用消弧线圈。在柏林市的 30kV 电网中,共有电缆 1400km,其电容电流高达 4kA,也采用了经消弧线圈接地方式。

原苏联曾规定 3~66kV 电网中性点采用经消弧线圈接地方式,莫斯科市配电网网络至今仍是中性点经消弧线圈接地的运行方式。

美国于 20 世纪 20 年代中期~40 年代中期,在 22~70kV 电网中,中性点直接接地方式所占比例高达 72%,且发展很快,逐步取代了中性点不接地的运行方式,一直延续至今。

英国 66kV 电网中性点采用电阻接地方式,而对 33kV 及以下由架空线路组成的配电网,中性点逐步由直接接地方式改为中性点经消弧线圈接地方式;由电缆组成的配电网,仍采用中性点经小电阻接地方式。

日本 20kV 电缆和架空线路混合电网,1950 年以来一直采用中性点不接地方式,随着电缆的增加,为防止接地继电器的误动、拒动和中性点位移,采用经 40~90 Ω 低值电阻器接地方式。1969 年改用经 40~460 Ω 电阻器接地方式,0.7s 短接 460 Ω 电阻器确保迅速准确选线断开单相接地故障线路。据 1975 年统计,11~33kV 配电网中性点不接地占 40%,经消弧线圈接地占 28%,经电阻接地占 30%,直接接地占 2%。其采用电阻接地方式一般限制接地电流数值为 100~200A。东京电力公司所属配电网,其中性点接地方式为 66kV 电网分别采用中性点经电阻、电抗和消弧线圈接地;22kV 系统采用中性点经电阻接地方式。

法国电力公司(EDF)从 1962 年开始将城市配电网的标称电压定为 20kV,其接地方式采用中性点经电阻或经电抗接地,故障线路要求快速跳闸,但不考虑故障发生到故障切除这段时间的接触电压和跨步电压。至 20 世纪 80 年代,法国电力公司对 20kV 配电网中性点接地方式提出新要求,即瞬时性接地故障电流应降低到 40~50A,同时要求考虑接触电压、跨步电压和对低压设备绝缘危害等问题。对 20kV 电网对地电容电流小于 50A 时,采用中性点经 120 Ω 电阻器接地方式,对电

容电流为 50~200A 则在电阻器旁并联补偿电抗器,即消弧线圈。随着并联补偿电抗器技术的改进,即自动跟踪调节系统的应用,已将最大接地电流降至 40A,其中 20A 是阻性电流供零序有功功率继电器工作使用。

意大利、加拿大、瑞典、日本和美国等在中压电网升压运行后,大部分都采用电网中性点直接接地的运行方式。

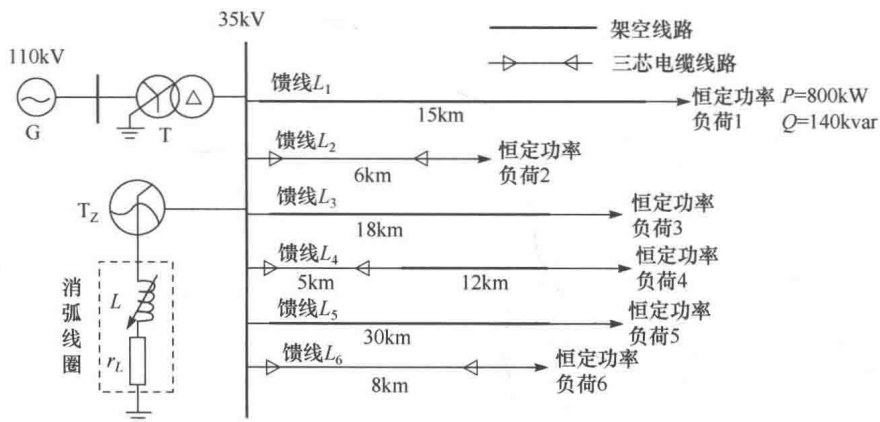
世界各国的配电网中性点在 20 世纪 50 年代前后,大都采用不接地或经消弧线圈接地方式;到 60 年代以后,有的采用直接接地和低电阻接地方式,有的采用经消弧线圈接地方式。

在对接地方式的选择上引起了我国专家的争论。有的大城市已局部将配电网的中性点不接地方式改为小电阻接地方式,以消除弧光接地过电压的产生,减少异相接地的发生。有的改为大电阻接地方式,以消除谐振接地过电压的危害。但大部分仍主张改为经消弧线圈接地方式,补偿系统的电容电流,使得单相弧光接地时,故障点电流减小,降低故障相电压的恢复速度,有效地降低电弧的复燃,从而避免单相瞬时性接地故障的跳闸,提高配电系统运行的可靠性,在配备可靠灵活的小电流接地选线及跳闸装置后,能够有效切除永久性故障。

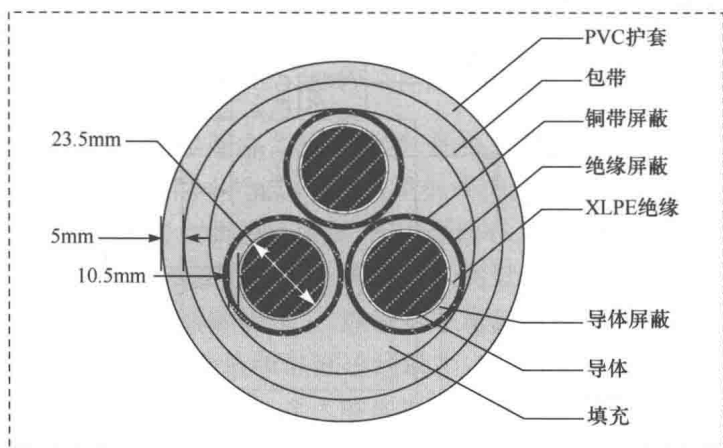
随着现代城市配电网容量的扩大、电缆线路所占比例增加,线路充电电容电流增大,接地故障情况下故障点熄弧变得更加困难。最新颁布的电力行业相关标准规定,故障短路电流大于 5A 的配电网均要求装设消弧线圈补偿装置。近年来配电网中性点接地技术已获得长足的进步,以原有无自动跟踪补偿功能的消弧线圈为基础开发成功的自动跟踪补偿消弧线圈成套装置及技术,极大地改进了消弧线圈对含电缆配电网单相接地故障电流的补偿效果,更好地发挥并展现了谐振接地方式的优势,在我国配电网中获得越来越广泛的认同和普遍应用。

1.1 自动跟踪消弧线圈补偿特性

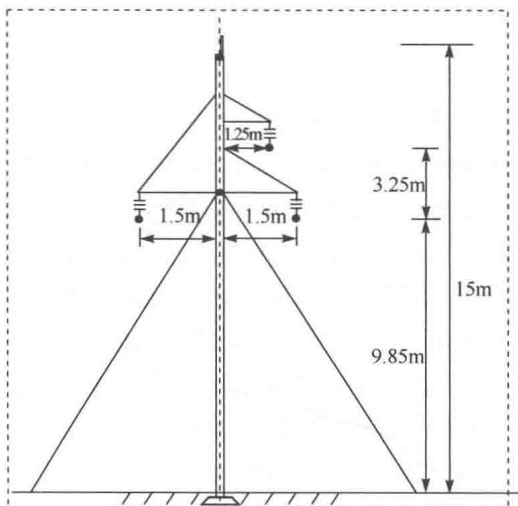
现构建由 6 条馈出线路组成的 35kV 中性点经消弧线圈接地的配网如图 1-1(a)所示,配网架空线与电缆参数如图 1-1(b)和(c)所示,T 为主变压器,变比为 110kV/35kV,联结组别为 YN/d11;我国配电网主变压器配电网电压侧一般为三角形联结,系统不存在中性点,当系统采用谐振接地方式时需取得可供消弧线圈接地的中性点,增设接地变压器就是最佳的办法,此处 T_z 是供补偿接地电网接地专用的 Z 型变压器,其绕组接线、绕组矢量关系及模型分别如图 1-1(d)~(f)所示; L 为消弧线圈, r_L 为消弧线圈的阻尼电阻。线路模型采用架空线路、架空线-电缆混合线路和电缆三种馈出线路,负荷选用恒定功率负荷模型。



(a) 配电网系统



(b) 电缆模型



(c) 杆塔模型

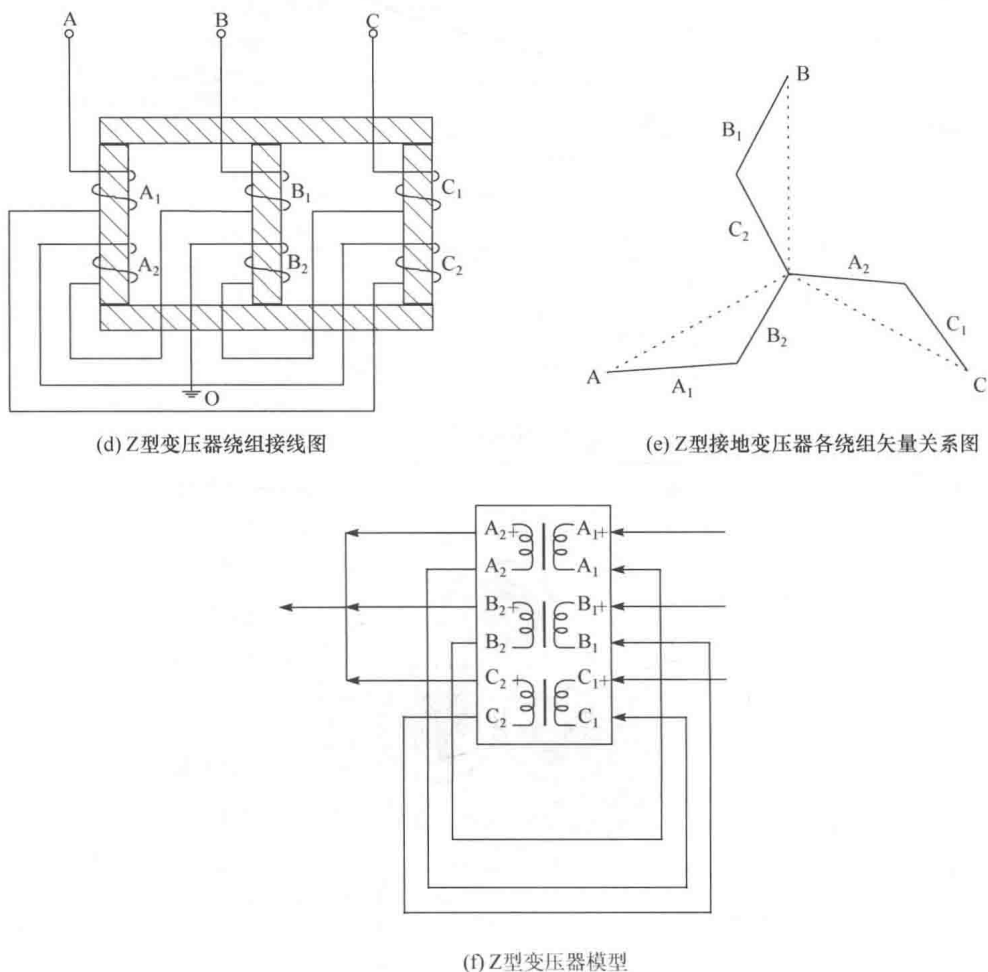


图 1-1 配电网电路模型

目前常见的自动跟踪补偿线圈按照跟踪调谐模式的不同,可分为预调式调谐消弧线圈和随调式调谐消弧线圈。预调式在系统正常时测量系统的电容电流,并将消弧线圈调节到对应位置,即调节至串联谐振状态。为了限制中性点电位升高,中性点需串入阻尼电阻。当接地故障发生时,消弧线圈零延时进行补偿,可利用机械调节或电气调节至设定的补偿状态,同时退出阻尼电阻,输出预设的补偿电流。故障解除后需要再接入阻尼电阻。预调式调谐线圈的优点是发生单相接地故障瞬间即可直接起到补偿作用,缺点是易引起中性点电位升高。随调式在系统正常运行时测量系统的电容电流,当发生单相接地故障后,根据测量的系统对地电容电流大小,自动调节至对应的补偿状态,减小补偿接地电网接地故障电流,以达到熄弧的目的。当接地故障解除时,又立即将其调节到远离补偿工作点。由于在系统正

常运行时消弧线圈处于远离谐振点运行的状态,所以可以避免串联谐振的发生,不需要设置阻尼电阻。随调式调谐线圈的优点是正常运行时中性点偏移电压较低,缺点是该类消弧线圈在系统发生单相接地故障之后才启动调谐。这里介绍随调式自动调谐消弧线圈,设消弧线圈为调匝式消弧线圈,随调式调匝消弧线圈的结构如图 1-2 所示。

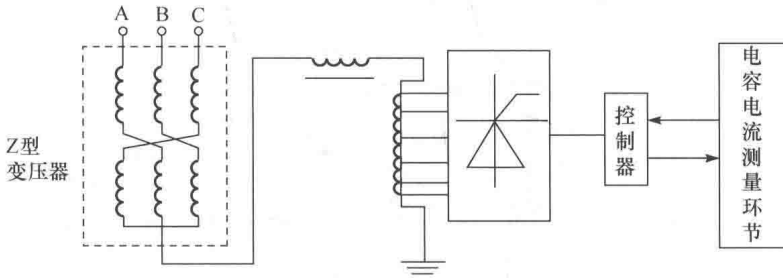


图 1-2 随调式调匝消弧线圈

随调式调匝消弧线圈主要由 Z 型变压器、消弧线圈、电容电流测量环节组成。Z 型变压器用于引出配电网中性点;调匝式消弧线圈的消弧线圈具有多级抽头,利用电力电子开关完成消弧线圈的匝数调节,实现电感量的多挡调节;电容电流测量环节在正常运行情况下,消弧线圈感抗调节至远离谐振点,电网处于失谐状态,中性点电位较低。单相接地故障情况下,控制器在毫秒级时间内根据预测电容值调节至设定的补偿状态,使接地故障电流达到最小,实现最佳补偿,从判断装置发生了接地故障到完全补偿需要 3~5 个工频周期。为阐述配网馈线接地故障情况下,自动消弧线圈的动态补偿过程,假设图 1-1 所示配电网馈线 L_1 上距母线 5km 处于 0.0231s 发生 A 相接地故障,故障初始相角为 60° ,过渡电阻为 $R_f = 20\Omega$ 。母线零模电压 $3u_0$ 波形、故障馈线 L_1 零模电流 i_{01} 波形、故障馈线故障点注入电流 i_{af} 波形如图 1-3 所示。配电网发生单相接地故障情况下,零模电压满足故障启动条件后,经过自动跟踪补偿消弧线圈的多次调节,达到预设的补偿电感值 $L_{\max} = 1.173\text{H}$,可调节至约 15% 的过补偿度。

消弧线圈补偿过程中,补偿电感 L 值的变化波形如图 1-4(a) 所示,触发脉冲信号如图 1-4(b) 所示,接地故障发生,满足启动条件后,根据预设值开始调节消弧线圈补偿值,从启动到消弧线圈开始起作用至少需要 20ms 的时间,补偿电感调节期间需要经过多次调节方能达到预设补偿值,实现最佳补偿效果。如图 1-4 所示,从发生接地故障到补偿电感调节结束整个过程持续大约 50ms,本次调节结束,等待下次启动。可见,保守而言,故障后至少 1 个工频周期内,消弧线圈尚未动作,即该时间段内故障暂态量不受消弧线圈调节控制的影响。