

面向 BPA 规划电网短路电流计算一次 设备零序参数的取值方法

何必伦, 曹 炜, 卫皇莅, 桂世成, 王 超

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘 要:目前在电网扩建规划仿真中,新规划元件零序参数的取值范围比较宽泛,具体取值缺乏依据,影响单相短路电流计算结果的可信性。为此,提出一种基于 PSD-BPA 平台用于电网扩建规划的零序参数取值方法,以某地方电网各个分区为典型场景,分析典型场景中 BPA 暂态稳定程序中 500 kV 主变零序参数 XO 卡、220 kV 线路零序参数 LO 卡、220 kV 主变高压侧母线下级等值零序参数 XR 卡值的变动对 500 kV 变电站 220 kV 侧母线单相短路电流的影响;通过误差分析找出关键影响因素,再按照计算误差的要求,抓住主要忽略次要,给出对应零序卡的取值方法建议。实例分析表明:所提方法能够便捷、有效地评估规划年某地方电网 500 kV 变电站 220 kV 侧母线单相短路电流,可应用于工程实际。

关 键 词:单相短路;零序参数;灵敏度;电网规划;PSD-BPA

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.06.017 中图分类号:TM713 文章编号:1673-9140(2022)06-0150-07

Research on BPA oriented short circuit current calculation for zero sequence parameters of primary equipment

HE Bilun, CAO Wei, WEI Huangli, GUI Shicheng, WANG Chao

(Electric Power Engineering of Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: At present, when planning the expansion of power grids, the range of zero-sequence parameter of the new planning equipment is relatively wide and lacks references, which affects the credibility of the result of single-phase short-circuit current. Thus, a zero-order parameter selection method based on the PSD-BPA platform for power grid expansion planning is proposed. Taking each partition of a local power grid as a typical scenario, the influence of the changes of zero sequence parameter XO card of 500 kV main transformer, zero sequence parameter LO card of 220 kV line, and sub equivalent zero sequence parameter XR card value of high-voltage side bus of 220 kV main transformer on single-phase short-circuit current of 220 kV side bus in that scenario of the BPA transient stability are analyzed. The key influencing factors are identified through error analysis, then according to the requirements of the calculation error, give advices to zero sequence of accessor according to the included important factors. An example analysis shows that the proposed method can easily and effectively evaluate the single-phase short-circuit current of bus at 220 kV side of Shanghai power grid 500 kV substation in the planning year, and can be applied to engineering practice.

收稿日期:2020-12-15;修回日期:2021-04-30

基金项目:国家自然科学基金青年基金(51807114);上海电力公司技术咨询项目(SGSHJY00GPJS1900054)

通信作者:曹 炜(1963—),女,副教授,主要从事电力系统分析与控制的研究;E-mail:cw-jenny@163.com

Key words: single-phase short circuit; zero order parameter; sensitivity; grid planning; PSD-BPA

目前,某些地方电网的部分 500、220 kV 变电站存在单相短路电流大于三相短路电流的情况,有些分区 500 kV 主变 220 kV 侧母线单相短路电流非常接近 50 kA,甚至超过断路器的遮断电流 50 kA。因此,单相与三相的短路电流校核一样重要^[1]。

BPA 程序^[2-4]中的电力系统模型参数是否精确对于电力系统的安全稳定运行至关重要,而变压器、输电线路作为联络电网的重要元件,其参数的准确性直接关系到电力系统的分析计算的可靠性与准确性。对于规划网架中单相短路电流接近甚至超过限额的站点,零序参数的取值将直接影响到单相短路电流计算结果的准确性,进而影响规划方案的选择。因此,获取准确的电网扩建规划的一次设备参数具有重要意义。

一般来说,变压器、线路的正序、负序参数比较容易获取,误差也较小,而变压器零序参数涉及主变铁芯类型、接线型式及其中性点接地方式;交流线路零序阻抗参数与线路的架设方式、避雷线设置以及大地电阻等都有关系;未建模的较低电压等级的等值网络零序参数更是与变压器中性点接地点的布置有关^[5]。上述种种因素影响到电网扩建规划中单相短路电流计算值,因此,电网扩建规划中需抓住主要忽略次要问题,给出对应零序卡的取值方法。

本文将理论计算、数据分析分别引入某地方电网分区 500 kV 主变零序电抗的计算和分区内 220 kV 线路阻抗和变压器等值电抗参数测算中,根据某地方电网的实际情况,指出基于 PSD-BPA 平台短路电流计算的电网零序参数取值方法的总体思路及方法。最终,用该方法得出规划电网零序参数值分别填入 PSD-BPA 暂态稳定程序对应的零序参数卡片中,并校核规划年某地方电网的单相短路电流,提出相关建议,具有重要的工程实践意义,该方法对其他地区电网规划仿真零序参数取值方法的研究应用有借鉴作用。

1 基于 PSD-BPA 单相短路电流计算的原理

中性点有效接地系统的单相接地短路电流^[6-8]为

$$I_f^{(1)} = \frac{3U_f}{|Z^+ + Z^- + Z^0|} \quad (1)$$

式中 U_f 为短路发生前故障点的正常工作电压; Z^+ 、 Z^- 、 Z^0 分别为故障点的正、负和零序阻抗,分别代表正、负和零序网络的故障点自阻抗。

Z^+ 、 Z^- 的大小与短路点对电源的电气距离有关,比较容易确定,而 Z^0 的大小则受中性点接地点布置等诸多因素的影响,在电网运行仿真中可根据实际情况确定,而在电网规划阶段却不易确定。

某地电网采取分层分区运行的方式,各分区均为一座 500 kV 站点带一片 220 kV 电网,如图 1 所示。本文重点研究基于 PSD-BPA 平台规划电网分区内零序参数的取值,500 kV 主变的零序电抗远大于零序电阻(3 个数量级),因此忽略主变的零序电阻,如图 2 所示, $X_{TH}^{(0)}$ 、 $X_{TM}^{(0)}$ 、 $X_{TL}^{(0)}$ 为 BPA 暂态稳定程序 XO 卡所对应的 500 kV 主变高、中、低压侧零序电抗值; $Z_{500eq}^{(0)}$ 为 500 kV 侧零序等值阻抗; $Z_L^{(0)}$ 为 BPA 暂态稳定程序 LO 卡所对应的 220 kV 线路零序阻抗。

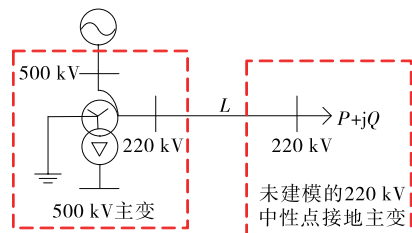


图 1 主网系统接线

Figure 1 Main network system wiring

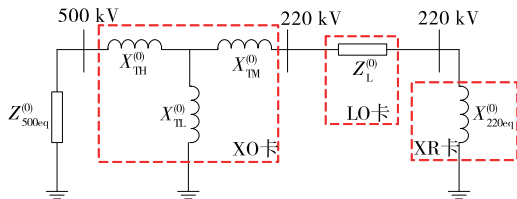


图 2 分区零序示意

Figure 2 Partition of zero sequence diagram

对于未建模的 220 kV 主变,由主变接地产生的零序通路需由 XR 卡模拟。由于下级网络十分庞大,结构复杂,很难对供电区域精确取值,通过大量的调研,结合实际一次接线图,发现下级 110 kV 主变高压绕组中性点几乎不接地;但根据继保需要,安

排少数回路主变中性点高压绕组接地,所以 110 kV 及其下级低压网络零序通路对 500 kV 主变 220 kV 侧影响较小,故 220 kV 主变高压侧对下级零序等值阻抗近似采用变压器高压侧母线加零序电压、中压侧与低压侧开路,所测得的零序电抗值。 $X_{220\text{eq}}^{(0)}$ 为 BPA 暂态稳定程序 XR 卡所对应的分区内 220 kV 变电站高压侧母线零序等值电抗值。

2 零序参数取值方法分析

2.1 整体研究思路

研究思路如图 3 所示,研究所用数据源由某地方电网已运行变压器的出厂参数、试验数据以及 BPA 中的实测数据组成。

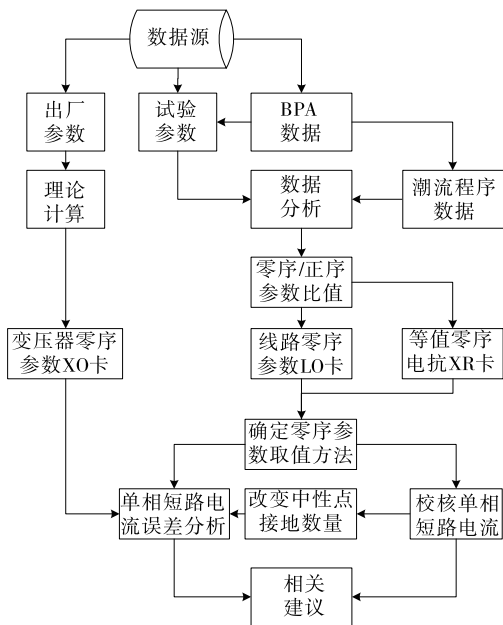


图 3 研究思路

Figure 3 Research framework

对于 500 kV 主变,大部分都采用 3 个单相自耦电力变压器组成的三相变压器组,根据其出厂参数理论计算零序参数,并且填入 PSD-BPA 中相应的 XO 卡中;结合变压器、线路零序参数的影响因素和实际工作经验,对线路、220 kV 主变零序参数取值,基于试验参数进行数据分析,得到线路、220 kV 主变零序/正序参数比值,通过相应的比值分别计算线路零序参数、220 kV 主变高压侧母线下级等值零序电抗,然后填入 PSD-BPA 中相应的 LO、XR 卡中。最终根据确定的电网规划仿真中零序参数的取值方

法,校核规划年某地方电网 500 kV 变电站主变 220 kV 侧母线单相短路电流,并基于 PSD-BPA 平台短路电流计算的电网零序参数取值方法和规划电网单相短路电流校核的结果,给出相关建议和措施。

2.2 某地方电网 500 kV 主变压器零序参数取值方法的确定

根据某地电网未来 2~3 年的 500 kV 输变电项目建设计划,500 kV 变电站的扩建、主变压器的增容等工程既需要增加新的 500 kV 变压器,也需要在 500 kV 主变压器中性点处加装小电抗,来限制规划电网 500 kV 变电站母线单相短路电流的超标。

在实际工作中,面向 PSD-BPA 短路电流计算的电网 500 kV 变压器零序电抗取值大多数是照搬已经运行的同容量变压器参数。随着主变接线运行方式以及主变中性点接地电抗值的变动,以往的做法不再适用。

PSD-BPA 暂态稳定程序中变压器零序参数 XO 卡的填写,首先,应根据变压器的接线方式和铁心结构,计算其零序等值电路和零序参数的标么值,然后,采用本卡填写变压器所有等值支路的参数^[3]。

目前,某地电网每个分区的 500 kV 主变压器都采用 3 个单相自耦电力变压器组成的三相变压器组,其三相绕组的联接形式均为 YNa0d11,其中性点接地方式包括直接和经小电抗接地 2 种。对于由 3 个单相变压器组成的三相变压器组,每相的零序主磁通与正序主磁通一样,都有独立的铁芯磁路,其零序励磁电抗与正序的相等^[7]。因此,根据某地电网 500 kV 主变压器的实际情况,本文采用理论计算的方法求解其零序电抗^[9-11]。

中性点直接接地的自耦变压器的零序等值电路及其参数、等值电路与外电路联接的情况、短路计算中零序励磁电抗的处理等,都与普通变压器的相同^[8]。对于中性点经小电抗接地的自耦变压器,自耦变中性点加装小电抗的等效零序电抗 $X_{\text{TH}}^{(0)}$ 、 $X_{\text{TM}}^{(0)}$ 、 $X_{\text{TL}}^{(0)}$ (标么值)分别为

$$\begin{cases} X_{\text{TH}}^{(0)} = X_{\text{T1}}^{(0)} + 3X_{n0}(1 - k_{12}) \cdot \frac{S_{\text{B}}}{U_{\text{B}}^2} \\ X_{\text{TM}}^{(0)} = X_{\text{T2}}^{(0)} + 3X_{n0}k_{12}(1 - k_{12}) \cdot \frac{S_{\text{B}}}{U_{\text{B}}^2} \\ X_{\text{TL}}^{(0)} = X_{\text{T3}}^{(0)} + 3X_{n0}k_{12} \cdot \frac{S_{\text{B}}}{U_{\text{B}}^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $X_{T1}^{(0)}$ 、 $X_{T2}^{(0)}$ 、 $X_{T3}^{(0)}$ 分别为自耦变压器高、中、低压侧绕组自身的零序电抗,取标么值; X_{n0} 为中性点电抗; k_{12} 为高、中压侧电压比; S_B 为基准容量,取 $100 \text{ MV} \cdot \text{A}$; U_B 为基准电压,取自耦变高压侧额定电压 $U_{HN}^{[12]}$ 。

根据新规划,单相自耦电力变压器容量参考《电力工程设计手册》中规定的标准技术参数,求出新规划的自耦变零序电抗标么值。当主网规划中 500 kV 自耦变的中性点接地电抗发生变化时,也可根据式(2)计算其零序电抗标么值。

2.3 某地方电网 220 kV 主变高压侧母线下级等值零序电抗取值方法的确定

根据某地电网近年来 220 kV 输变电项目的建设计划, 220 kV 变电站的扩建、主变压器的增容等工程既需要增加新的 220 kV 变压器,也需要根据电网的需求改变主变中性点接地方式及接地数量。

在实际电网中,成千上万的负荷元件连接在 10 kV 及以下电压等级的配网中,但是要详细描述 110 kV 及以下的配网网络势必造成计算速度慢、计算效率低等诸多问题。因此在实际计算中,各网、省公司的规划、运行以及设计部门一般采用一定的等值方法,在较高的电压等级上对下级进行零序等值。在主网规划短路电流计算仿真中,使用 BPA 在 220 kV 主变高压侧母线对下级网络进行零序等值,其零序等值电抗填写在 BPA 暂态稳定程序中的 XR 卡中。

通过对 BPA 稳定文件中各个单位 220 kV 主变零序参数数据整理统计,发现 220 kV 变电站零序通路都只考虑到 110 kV 侧位置为止。在短路计算中,华北等地区电网相关部门将负荷挂在 220 kV 变电站 110 kV 电压等级上,并对 220 kV 变电站中性点接地的主变压器各支路的零序参数详细填写,如图 4 中 A 变电站所示,其中, k_1 、 k_2 为故障发生时复合序网中零序网络接入点;华东等地区电网相关部门将负荷挂在 220 kV 变电站 220 kV 电压等级上,对 220 kV 站主变各支路零序参数并未填写,但会将 220 kV 母线零序通路进行等值计算后挂在 220 kV 母线,如图 4 中 B 变电站所示。

上述 2 种方式都是经过 BPA 数据调研得到的结果。当 220 kV 变压器高压侧对下级零序等值时,通常采用变压器高压侧母线加零序电压、中低压

侧开路测得零序电抗。一般情况下零序参数不方便获取,对于新规划的 220 kV 主变,可通过出厂参数或《电力工程设计手册》得出正序参数,用正序电抗典型参数来替代其零序电抗。

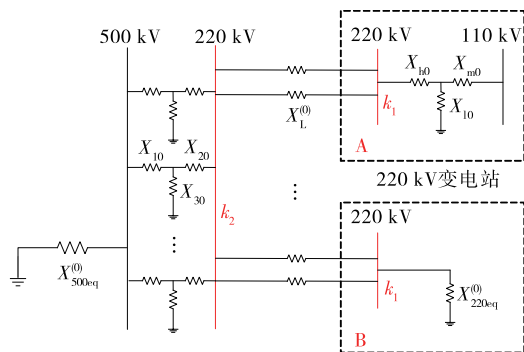


图 4 500 kV 站带 1 片 220 kV 电网的零序网络

Figure 4 A zero sequence network of 500 kV station with one 220 kV power grid

2.4 新规划的 220 kV 线路 LO 卡零序参数取值方法的确定

根据理论计算线路阻抗的特点以及大量阻抗参数实测结果分析,扩建规划的线路零序阻抗参数可参考区域内同一导线型号的同—导体地线、单回和同杆双回架设方式,计算取得零序/正序电抗比值 X_{L0}/X_L 以及零序、正序电阻差 $R_{L0} - R_L^{[13]}$ 。

数据分析技术在商业领域的应用很多,在电力系统领域的应用也逐步开展起来^[14-18]。构建某地电网 220 kV 线路实测零序/正序电抗比值预测方法。虽然其整体分布形态未知,但是根据中心极限定理,只要从总体中抽取的样本容量 n 足够大 ($n > 30$),则由这些样本组成的样本均值的抽样分布都近似于正态分布,即可由此推断一定置信水平下的总体均值 μ 的区间。

总体均值的区间推断理论,可供选择的抽样分布有 Z、T 分布,分析此处的已知条件:样本容量 $n > 30$,进而可以计算出样本均值以及样本标准差 S ,但是总体分布形态位置、总体标准差 σ_z 未知。由此,可以选择 Z 分布来推断总体均值 μ_z 的区间,并且采用样本标准差 S 来代替总体标准差 σ_z 参与计算。

在一定置信水平 $1 - \alpha$ 下,基于 Z 分布的总体均值区间推断公式为

$$P\left(\bar{x} - z_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \leq \mu_z \leq \bar{x} + z_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha \quad (3)$$

式中 \bar{x} 为样本均值(变量为 220 kV 线路实测零

序电抗/正序电抗比值);S 为样本标准差;n 为样本容量; $z_{\alpha/2}$ 为 Z 统计量(基于指定置信水平 $1-\alpha$ 查 Z 分布表获取)。

由此,在置信水平等于 $1-\alpha$ 的情况下,总体均值 μ_z 的置信区间为 $[\bar{x}-z_{\alpha/2}S/\sqrt{n}, \bar{x}+z_{\alpha/2}S/\sqrt{n}]$ 。考虑线路参数数据地域等其他因素,在给定显著水平 0.05 下、置信度 95% 的估计区间计算衍生变量作为预测结果,以实际电网中 220 kV 线路厂测参数和零序试验参数为基础,预测零序/正序电抗比值。

对于新规划的 220 kV 输电线路,可通过出厂参数或《电力工程设计手册》计算其正序参数,并根据总体均值 μ_z 的置信区间区间求出其零序电抗,最后填写到 BPA 仿真软件暂态稳定程序 LO 卡中。

3 零序参数取值方法误差分析

3.1 XO 卡取值方法替换前后误差分析

对于已经投入运行的 500 kV 主变,用出厂参数计算出的变压器零序电抗替换 PSD-BPA 暂态稳定程序中已投入运行的变压器实测的零序参数 XO 卡值,并计算某地电网分区 500 kV 变电站 220 kV 侧母线单相短路电流,然后,与 XO 卡替换前分区 500 kV 变电站 220 kV 侧母线单相短路电流比较,其单相短路电流误差如表 1 所示,可以看到单相短路电流最大的误差不超过 0.746%,小于常规短路电流计算的允许误差。因此,在电网的规划阶段,500 kV 主变零序参数采用理论计算值代替实测值是可行的。

表 1 各分区 500 kV 变电站 220 kV 侧母线单相短路电流误差(XO 卡)

Table 1 Single phase short circuit current error of 220 kV side bus in a 500 kV substation of each partition (XO card) %

220 kV 母线	电流误差	220 kV 母线	电流误差	220 kV 母线	电流误差
JA	0.015	XY	0.024	HD	0.341
YH12	0.246	SJ	0.233	TW	0.120
YH34	0.743	LT	0.003	GL12	0.252
SL	0.005	XH12	0.256	GL34	0.204
NQ	0.273	XH34	0.239	YG	0.746

3.2 LO 卡取值方法替换前后误差分析

以某地电网多个分区为典型场景,使用 PSD-SCCP 分析 14 个典型场景的 BPA 暂态稳定程序中 500 kV 主变 220 kV 侧线路零序参数,某种 220 kV 线路零序与正序电抗的比值如图 5 所示,除少部分误差数据,可以看到大部分的比值都落在 2~3 之间,这与理论计算相符。

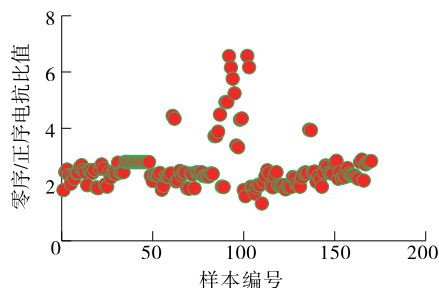


图 5 某种 220 kV 线路零序/正序电抗比值

Figure 5 Zero/positive sequence reactance ratio of a 220 kV transmission line

考虑线路参数数据地域等其他因素,在给定显著水平 0.05 下、置信度 95% 的估计区间计算衍生变量作为预测结果,以某地电网 220 kV 线路厂测参数和零序试验参数为基础,预测同杆双回、单回线路零序/正序电抗比值,使用 SPSS 软件分析的结果如表 2 所示。

表 2 基于 Z 分布的 220 kV 同杆线路实测零序/正序电抗比值

Table 2 Measured zero/positive sequence reactance ratio in 220 kV circuit transmission lines on the same tower based on Z-distribution

线路	样本数量 n	零序/正序电抗比值		
		平均值	平均值的 95% 置信区间	
			上限	下限
双回	216	2.639 057	2.785 357	2.492 758
单回	184	2.478 545	2.668 065	2.289 025

从表 2 可以看出,无论是同杆双回还是单回线路,其零序/正序电抗比值的上、下限不会超出平均值的 $\pm 10\%$ 。因此,以某地电网为例,将各个分区的 LO 卡值变动 10%,计算 500 kV 变电站 220 kV 侧母线单相短路电流,计算结果如表 3 所示,可以看出单相短路电流误差最大不超过 0.81%,小于常规短路电流计算的允许误差。因此同杆双回线路和单回线路零序电抗与正序电抗的比值一般就取平均值。

对于新规划的 220 kV 输电线路,可通过出厂参数或《电力工程设计手册》计算出正序参数,并根据上述比值求出其零序电抗,最后填写到 BPA 仿真软件暂态稳定程序 LO 卡中。

表 3 LO 卡变动 10% 时各分区 500 kV 变电站 220 kV 侧母线单相短路电流误差

Table 3 Single phase short circuit current error of 220 kV side bus in a 500 kV substation with

10% variation of LO card				%	
分区	电流误差	分区	电流误差	分区	电流误差
JA	0.01	SJ	0.52	GL34	0.53
YD	0.16	LT	0.06	YG	0.09
SL	0.07	HD	0.26	WJ1	0.31
NQ	0.21	TW	0.11	WJ2	0.32
XY	0.08	GL12	0.81		

3.3 XR 卡取值方法替换前后误差分析

当 220 kV 变压器高压侧对下级零序等值时,通常采用变压器高压侧母线加零序电压、中低压侧开路测得零序电抗。假设所统计的 220 kV 联结组标号为 $Y_n/Y_n/D$ 、 Y_n/D 变压器高压绕组中性点均接地,分析上海电网 220 kV 主流变压器零序/正序电抗比值的离散程度,双绕组变压器零序/正序电抗比值如图 6 所示,其比值主要分布在 0.80~1.05 之间;三绕组变压器零序/正序电抗比值如图 7 所示,其比值主要分布在 0.95~1.05 之间。

为了分析上述不同比值所对应零序电抗对 500 kV 站 220 kV 侧母线单相短路电流的影响。将全部挂在 220 kV 变电站的高压侧母线的单台双绕组变压器零序阻抗变动 20%,三绕组变压器高低压侧零序电抗之和变动 10%,基于 PSD-BPA 平台分析 500 kV 站 220 kV 侧母线单相短路电流误差,如表 4 所示,500 kV 站 220 kV 侧母线单相短路电流变化率最大值为 1.780 2%。考虑到实际规划新加的 220 kV 中性点接地主变的数量占比小,220 kV 双绕组、三绕组中性点接地主变采用正序电抗代替其零序电抗,故此处零序电抗的变动值和数量均小于上述情况,其误差见表 4,最大值为 0.362 5%,满足评估规划电网单相短路电流水平的可信度。因此,对于电网新规划、未知的单台 220 kV 中性点接地主变,可以用正序电抗典型参数代替其零序电抗。

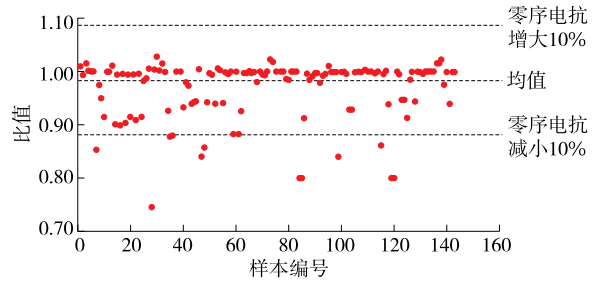


图 6 双绕组变压器零序/正序电抗比值

Figure 6 Zero/positive sequence reactance ratio of double winding transformer

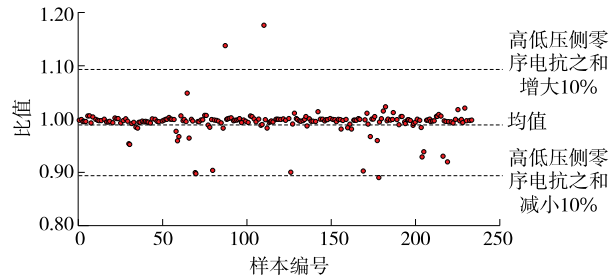


图 7 三绕组变压器高低压测零序/正序电抗比值

Figure 7 Zero/positive sequence reactance ratio of high-low voltage sides in a three winding transformer

表 4 500 kV 站 220 kV 侧母线单相短路电流误差

Table 4 Single phase short-circuit current error of 220 kV side bus in a 500 kV substation

条件	电流误差/%		
	最大值	最小值	平均值
双绕组主变零序电抗变动 20%,三绕组主变高低压侧零序电抗之和变动 10%	1.780 2	0.116 0	0.850 3
中性点接地主变采用正序电抗代替其零序电抗	0.362 5	0.019 4	0.124 2

4 结语

1)某地电网 500 kV 系统主变全部采用 3 个单相自耦变组成的三相变压器组。由于主变的扩建或其中性点接地电抗的变动,故新规划 500 kV 主变在 BPA 暂态稳定程序 XO 卡中的填写值取主变零序参数理论计算值。

2)对于 220 kV 部分扩建规划的线路零序阻抗参数,可参考区域内同一导线型号在同一导体地线、单回和同杆双回架设方式,计算取得零序/正序电抗比值 X_{L0}/X_L 、零序、正序电阻差 $R_{L0} - R_L$ 。通过数据分析,预测出 220 kV 单回和同杆双回线路零

序/正序电抗比值,LO卡取其正序电抗标么值与零序/正序比值样本均值的乘积。

3)针对电网新规划、未知的单台 220 kV 中性点接地主变,其高压侧对下级零序等值通常采用变压器高压侧母线加零序电压、中低压侧开路,将所测零序电抗填入 XR 卡中,可以用正序电抗典型参数代替其零序电抗。

通过对短路电流误差的分析,证明以上 3 种取值方法有足够的精度,是完全能够满足工程要求的。

参考文献:

- [1] 邓成江,李海锋,曾德辉,等.含逆变型分布式电源的不平衡配电网短路电流计算方法研究[J].智慧电力,2021,49(2):39-46.
DENG Chengjiang, LI Haifeng, ZENG Dehui, et al. Calculation method of short-circuit current in unbalanced distribution network with inverter-based distributed generation[J]. Smart Power, 2021, 49(2): 39-46.
- [2] 印永华,卜广全,汤涌,等.PSD-BPA 潮流程序用户手册[EB/OL].<https://max.book118.com/html/2015/1109/29022006.shtm>,2015-11-10.
- [3] 汤涌,卜广全,印永华,等.PSD-BPA 暂态稳定程序用户手册[EB/OL].<https://www.doc88.com/p-1714305395184.html>,2014-03-13.
- [4] 康卓然,张谦,陈民权,等.适用于电力系统暂态稳定分析的网络电压解析算法研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(3):32-38.
KANG Zhuoran, ZHANG Qian, CHEN Minquan, et al. Research on network voltage analysis algorithm suitable for power system transient stability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 32-38.
- [5] 符金伟,史常凯,尹惠,等.基于综合特征矩阵的配电网故障判别方法[J].中国电力,2021,54(11):125-132.
FU Jinwei, SHI Changkai, YIN Hui, et al. Distribution network fault type identification method based on feature-summarizing matrix[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 125-132.
- [6] 汪洋,任振宇,朱旭东,等.LCC-FHMMC 换流阀出口交流单相接地故障特性分析及保护方案设计[J].高压电器,2022,58(7):18-27.
WANG Yang, REN Zhenyu, ZHU Xudong, et al. Characteristic analysis and protection scheme design of AC single phase grounding fault for LCC-FHMMC converter valve exit[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 18-27.
- [7] 吴春阳,倪良华,汤智谦,等.基于动态模式匹配距离的配电网单相接地故障选线研究[J].电网与清洁能源,2022,38(2):1-9.
WU Chunyang, NI Lianghua, TANG Zhiqian, et al. A study on single-phase grounding fault line selection of distribution network based on dynamic pattern matching distance[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(2): 1-9.
- [8] 刘健,张小庆,权立,等.单相接地故障处理的现场系统测试[J].供用电,2022,39(2):36-41.
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, QUAN Li, et al. Filed systematic tests of single-phase grounding fault handling[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(2): 36-41.
- [9] 王翠霞.关于 220 kV 三圈变压器零序参数的特殊算法[J].电气传动自动化,2010,32(6):51-54.
WANG Cuixia. Special algorithm about zero sequence parameters of 220 kV three-turn transformer[J]. Electric Drive Automation, 2010, 32(6): 51-54.
- [10] 王莉,刘明予,张予鄂,等.电网中常用变压器零序阻抗计算方法及实例[J].电力系统保护与控制,2008,36(24):118-120.
WANG Li, LIU Mingyu, ZHANG Yube, et al. Calculation method and examples of zero sequence impedance of common transformers in power grids[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(24): 118-120.
- [11] 李文平.变压器零序阻抗工程算法[J].变压器,1998(11):9-12.
LI Wenping. Calculation for zero-sequence impedance of transformer[J]. Transformer, 1998(11): 9-12.
- [12] 李汉香,刘丽平.具有非标准变比变压器的参数计算[J].电网技术,1999(12):39-42.
LI Hanxiang, LIU Liping. Parameter calculation of transformers with non-standard ratio[J]. Power System Technology, 1999(12): 39-42.
- [13] 施家博,苗虹,曾成碧.基于复合型虚拟阻抗与自适应下垂控制的并联逆变器功率均分策略[J].电测与仪表,2022,59(12):77-82+88.
SHI Jiabo, MIAO Hong, ZENG Chengbi. Power sharing strategy of parallel inverter based on complex virtual impedance and adaptive droop control[J]. Electric Measurement & Instrumentation, 2022, 59(12): 77-82+88.

- [8] 刘宗杰,赵锐,刘玉玲,等.配电网有功泄漏电流实时测量方法[J].电力科学与技术学报,2019,34(2):28-32.
LIU Zongjie,ZHAO Rui,LIU Yuling,et al.A method of real time measurement for active leakage current in distribution network[J].Journal of Electrical Power Science and Technology,2019,34(2):28-32.
- [9] 何宁辉,王世杰,刘军福,等.基于深度学习的航拍图像绝缘子缺失检测方法研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(12):132-140.
HE Ninghui,WANG Shijie,LIU Junfu,et al.Research on infrared image missing insulator detection method based on deep learning[J].Power System Protection and Control,2021,49(12):132-140.
- [10] 万收兰,程养春,李成榕.基于人工神经网络的零值绝缘子诊断[J].高电压技术,2002,28(6):6-7+10.
WAN Shuolan,CHENG Yangchun,LI Chengrong.Diagnosis of faulty porcelain insulators based on artificial neural network[J].High Voltage Engineering,2002,28(6):6-7+10.
- [11] 刘丰,曾祥君,谷应科,等.基于行波技术的电力线路绝缘预警系统及其现场试验[J].南方电网技术,2019,13(6):24-29.
LIU Feng,ZENG Xiangjun,GU Yingke,et al.Traveling wave based insulation faults early warning system and its field test[J].Southern Power System Technology,2019,13(6):24-29.
- [12] 赵庆喜,蔡夏诗,盛从兵,等.基于行波理论的电力线路绝缘故障预警系统[J].电力科学与技术学报,2014,29(3):66-72.
ZHAO Qingxi,CAI Xiashi,SHENG Congbing,et al.Traveling wave based insulation faults pre-warning system for transmission line[J].Journal of Electrical Power Science and Technology,2014,29(3):66-72.
- [13] 姚陈果,李璟延,米彦,等.绝缘子安全区泄漏电流频谱特征提取及污秽状态预测[J].中国电机工程学报,2007,27(30):1-8.
YAO Chenguo,LI Jingyan,MI Yan,et al.Abstracting frequency spectrum characteristics of insulators leakage current in safety zone to forecast the contamination condition[J].Proceedings of the CSEE,2007,27(30):1-8.
- [14] 李泽文,曾祥君,夏翊翔,等.高压交流输电线路故障行波定位技术综述[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(3):104-121.
LI Zewen,ZENG Xiangjun,XIA Yixiang,et al.Review of traveling wave fault location technology for high voltage AC transmission lines[J].Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science),2022,19(3):104-121.
- [15] 曾祥君,尹项根,林福昌,等.基于行波传感器的输电线路故障定位方法研究[J].中国电机工程学报,2002,22(6):43-47.
ZENG Xiangjun,YIN Xianggen,LIN Fuchang,et al.Study on fault location for transmission lines based on the sensor of traveling-wave[J].Proceedings of the CSEE,2002,22(6):43-47.

(上接第 156 页 Continued from page 156)

- [14] 张东霞,苗新,刘丽平,等.智能电网大数据技术发展研究[J].中国电机工程学报,2015,35(1):2-12.
ZHANG Dongxia,MIAO Xin,LIU Liping,et al.Research on the development of smart grid big data technology[J].Proceedings of the CSEE,2015,35(1):2-12.
- [15] 薛禹胜,赖业宁.大能源思维与大数据思维的融合(一)大数据与电力大数据[J].电力系统自动化,2016,40(1):1-8.
XUE Yusheng,LAI Yening.Integration of macro energy thinking and big data thinking part one big data and power big data[J].Automation of Electric Power Systems,2016,40(1):1-8.
- [16] 刘科研,盛万兴,张东霞,等.智能配电网大数据应用需求和场景分析研究[J].中国电机工程学报,2015,35(2):287-293.
LIU Keyan,SHENG Wanxing,ZHANG Dongxia,et al.Research on big data application requirement and scenario analysis of intelligent distribution networks[J].Proceedings of the CSEE,2015,35(2):287-293.
- [17] 葛磊蛟,王守相,瞿海妮.智能配用电大数据存储架构设计[J].电力自动化设备,2016,36(6):194-202.
GE Leijiao,WANG Shouxiang,QU Haini.Design of big data storage architecture for intelligent power distribution[J].Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):194-202.
- [18] 郝然,艾芊,肖斐.基于多元大数据平台的用电行为分析构架研究[J].电力自动化设备,2017,37(8):20-27.
HAO Ran,AI Qian,XIAO Fei.Research on power consumption behavior analysis framework based on multivariate big data platform[J].Electric Power Automation Equipment,2017,37(8):20-27.