

基于调匝式消弧线圈的虚幻接地解决措施

袁明哲¹, 马娅妮², 汪祺航¹, 邹经鑫¹, 曹柯¹

(1. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610041; 2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:针对调匝式消弧线圈系统频繁出现虚幻接地的现实情况,考虑消弧线圈设备参数及结构设置对其补偿算法的影响,对虚幻接地产生的原因进行了研究。在对消弧线圈控制原理进行理论分析的基础上,模拟实际运行情况,设计并完成了触发实验和调档实验;进而深入分析并验证了消弧线圈自身装置对虚幻接地的影响,提出了消弧线圈触发装置升级改造的优化结构,并为消弧线圈投运前触发功能检测提供了阈值实验方案。同时考虑多台消弧线圈并列运行的安排策略,有助于保证消弧线圈能够精准补偿系统容流,避免产生虚幻接地,对减少电力调度工作中接地误判有一定的积极作用。

关键词:调匝式消弧线圈; 虚幻接地; 容流补偿算法; 触发装置优化

中图分类号: TM 855 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2022)02-0048-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220210

Solutions for Virtual Grounding Based on Turn-adjustable Arc Suppression Coil

YUAN Mingzhe¹, MA Yani², WANG Qihang¹, ZOU Jingxin¹, CAO Ke¹

(1. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: In view of the reality that virtual grounding frequently occurs in turn-adjustable arc suppression coil system, the causes of virtual grounding are studied considering the influence of equipment parameters and structure settings of arc-suppression coil on its compensation algorithm. Based on the theoretical analysis of arc-suppression coil control principle, the actual operation is simulated, the trigger experiment and shift experiment are designed and completed, and then the influence of arc-suppression coil device on the occurrence of virtual grounding is deeply analyzed and verified, and the optimized structure of trigger device of arc-suppression coil after upgrading is proposed. The threshold test scheme is provided for triggering function detection of arc-suppression coil before being put into operation, and the arrangement strategy of parallel operation of multiple arc-suppression coils is considered, which is helpful to ensure that arc-suppression coil can accurately compensate system capacity flow, avoid virtual grounding, and play a certain positive role in reducing grounding misjudgment in power dispatching.

Key words: turn-adjustable arc suppression coil; virtual grounding; compensation algorithm of capacity flow; optimization of trigger device

0 引言

随着城市电缆的应用量逐渐增多^[1],电力系统中电容电流的影响愈发不可小觑。为降低电容电流在单相接地时引发弧光接地的风险,10 kV配电网

线路大多配备消弧线圈,以补偿容性电流^[2-4]。然而,消弧线圈的应用带来了一定的“副作用”,即虚幻接地的产生。

虚幻接地顾名思义为类似于单相接地的一种不平衡状态,即10 kV母线相电压一相降低,两相升高,中性点电压略高^[5]。其往往是因为系统中发生全补偿,造成串联谐振,致使中性点电压骤升。虚幻

接地发生后,电网监控系统会报出接地信号,并自动启动选线系统,但实际巡线后会发现所选线路并未发生接地故障。这对调度判断系统运行状态、运维人员现场巡视等造成困扰,并且对虚幻接地的相应处理可能会对用户侧造成短时停电,影响稳定供电。

文献[6]以消弧线圈自身参数为切入点,通过对电网正常运行及接地故障下改变消弧线圈参数的测试,指出消弧线圈自动调谐装置参数设置不合理会引起虚幻接地,并配合实例计算结果,提出了增大脱谐度、增大阻尼电阻以应对虚幻接地的解决措施;但并未考虑阻尼电阻增大是否有不利影响。文献[7]研究了一起虚幻接地的案例,提出消弧线圈会放大电网不平衡电压;从而导致中性点电压升高并引起虚幻接地的观点,并结合大数据系统查找出不平衡的高压用户,避免了运行人员现场逐一检查,缩小了排查范围。文献[8]分析了消弧线圈放大不平衡电压形成位移电压的原理,提出了采用阻尼措施抑制位移电压的方法;但仅是针对位移电压,对引起虚幻接地的其他原因并不适用。文献[9]通过空充母线时出现的虚幻接地案例,解释了由于变电站母线电压互感器铁芯饱和造成铁磁谐振,从而引发虚幻接地,指出了系统发生铁磁谐振的危害,并给出了投入空载线路以破坏谐振条件的解决措施;但仅是依托空充母线的个例进行分析,并未考虑引发虚幻接地的普遍性情况。文献[10]分析了引起虚幻接地的各种现场情况,针对传递过电压提出了在高压侧避免采用熔断器、尽量避免高压断路器不同期操作等措施,以减少在高压侧出现零序电压的可能性;但所提措施仅作为现场运行的操作建议,并未对消弧线圈设备本身进行改进。文献[11]先是分析了消弧线圈控制算法,然后通过计算不同不平衡度下位移电压的方式,得出了三相负荷不平衡会造成虚幻接地的结论,提出以不平衡电压为参考制定触发电压门槛值的措施。文献[12]针对电压互感器铁芯饱和和引起虚幻接地进行了详细分析,提出了采用电容式互感器或在中性点加装电压互感器的措施;但并未对其所提措施进一步验证其适用于其他虚幻接地情况的可行性。

综上所述,目前针对虚幻接地的研究大多是对生产实践中零散出现的事故进行特定探讨,对其产生原因分析过于单一、不够全面深入,并且所提抑制措施也皆是基于现场故障处理,未能提供可以保证

常态化电网运行维护以及针对消弧装置自身根本性的解决措施。因此,下面围绕 10 kV 配电网调匝式消弧线圈装置展开研究,从装置控制原理及补偿算法入手,分析了消弧线圈致使虚幻接地产生的原因以及在现场运行中可采取的有效解决措施,旨在减少接地故障误报,降低虚幻接地对故障选线造成困难的不良影响,进一步保障电网安全稳定运行。

1 调匝式消弧线圈的结构及原理

1.1 装置结构

调匝式消弧线圈属于预调式,即在正常运行时已经计算出了系统所需补偿的电感电流,在发生单相接地时,由短接开关控制短接阻尼电阻,使得消弧线圈充分补偿系统容性电流^[13]。如图 1 所示,调匝式消弧线圈成套装置由接地变压器 TM、有载消弧线圈 LP 及阻尼电阻 R 构成^[14]。

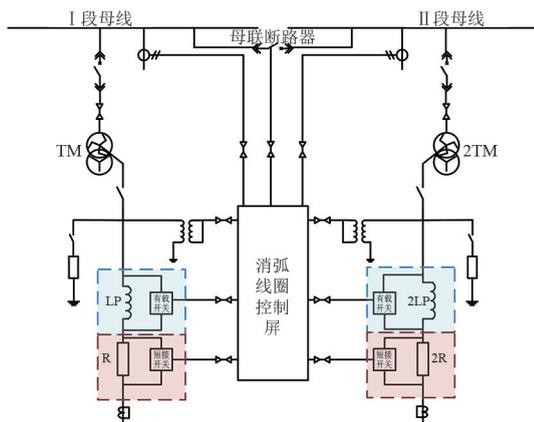


图 1 消弧线圈成套装置结构

消弧线圈需要装设在电力系统的中性点位置,以便在系统单相接地时与对地电容构成接地回路。而变电站变压器大多为 Y/Δ 型接线^[15],低压侧没有中性点。因此,为了人为地构造一个连接消弧线圈的中性点,在 10 kV 母线上连接一台 Z 型接线接地变压器^[16]。Z 型变压器由于其绕线特殊使得零序阻抗很小,空载损耗低,变压器容量可以利用 90% 以上^[17]。而普通变压器零序阻抗大很多,相应的容量利用率低。而消弧线圈容量一般不应超过变压器容量的 20%,因此,零序阻抗越小,消弧线圈可利用的容量越大,所补偿的电感电流也就越大。阻尼电阻两端的保护单元指的是短接开关,由可控硅并联压敏电阻构成,可控硅控制阻尼电阻的短接,压敏电阻用以保护可控硅。

1.2 补偿算法分析

首先,计算出系统中的对地电容值,然后进行残流限值标准比对,再依照分接头开关挡位选择线圈电感值,随后得到应提供的电感电流,从而对电容电流进行补偿。因此,补偿算法的关键是电容的计算。现场装置大多采用幅值相位法^[18-19],该方法是在谐振点附近,两次调挡测得中性点电流及其相位差。通过两次测量便可得到图 2 的阻抗三角形,接着借助三角关系得出容抗大小^[20]。如图 2 所示,阻抗三角形是根据正常运行情况下,阻尼电阻、消弧线圈及对地电容构成的串联回路所得出的。

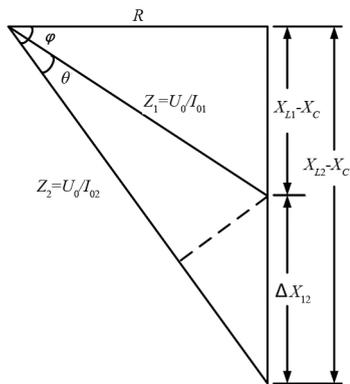


图 2 幅值相位法阻抗三角形

幅值相位法选择在谐振点附近测量的原因:1)中性点电流谐振曲线类似于正态分布,峰值点恰好在谐振点,即在谐振点附近中性点电流变化平缓,较为稳定,便于测量;2)中性点电压谐振曲线与中性点电流曲线相似,幅值相位法所利用的两次阻抗三角关系的前提是中性点电压不变,而在接近于谐振点处,中性点电压达到峰值,相对于峰值前后的升降更为平稳,因此容抗的计算误差更小;3)在接近于谐振点时,串联回路中感抗和容抗近似抵消,因此电抗值仅为阻尼电阻,此时中性点电流较大,测量误差更小。

2 调匝式消弧线圈导致虚幻接地的原因分析

2.1 理论分析

现场运行实践经验表明,在不配置消弧线圈的配电网线路,虚幻接地现象基本消失。因此,究其根本原因还是消弧线圈装置自身的一些问题。现分析可能引发虚幻接地的原因如下:

1) 触发电压的设置:若触发电压设置过小,当

系统因某种原因其不平衡电压较大时,会使得阻尼电阻压降达到触发电压,阻尼电阻会在系统没有接地的情况下被短接,致使串联电路阻尼率下降,中性点电流升高,导致虚幻接地;若触发电压设置过大,会导致一些非金属性接地不能被识别并触发,致使消弧线圈未能发挥补偿作用,除此,会使得阻尼电阻承受过高电压降却迟迟不被短接,导致阻尼电阻过载被烧毁,失去抑制不平衡电压的作用,致使未接地状态下发生串联谐振,也会导致虚幻接地。在实际运行中,因可控硅的触发电压是一定的,对于不同挡位的消弧线圈,触发情况会有所差异。因为在低挡位时,消弧线圈提供的电感电流小,阻尼电阻两侧的电压也自然较小,相似地,在高挡位时,阻尼电阻两侧电压较大。因此存在低挡位不易触发、高挡位易触发的现象,这种不稳定性造成引发虚幻接地的概率增大。

2) 触发阈值的设置:在消弧线圈触发设置中,存在一个参数“阈值”作为消弧线圈重新调挡的条件判据。当电力系统中由于运行方式或其他原因造成电容电流发生变化时,消弧线圈控制系统会检测到中性点电压发生了一定的变化,对此,设定常规阈值 0.04 V 和突变阈值 0.07 V;若中性点电压的变动差值超过 0.04 V,且变动持续时长超过 3 min,消弧线圈会自动计算新的电容电流,进而重新调挡;若中性点电压的变动差值超过 0.07 V,持续时长超过 1 min 后,也会重新计算容流。因此,阈值的设置关系到触发动作的准确性,如果阈值设定有误,会造成未接地时阻尼电阻被短接,进而导致虚幻接地。

3) 阻尼电阻的取值:为了抑制系统串联谐振过电压,在消弧线圈接地回路中串入阻尼电阻。由消弧线圈串联回路可知,中性点电压 U_n 为

$$U_n = K_C U_\phi / \sqrt{(d^2 + \varepsilon^2)} \quad (1)$$

式中: K_C 为系统不对称度; U_ϕ 为系统相电压; d 为系统阻尼率; ε 为脱谐度。

根据中性点电压不可超过 15% 系统相电压的要求,可得阻尼电阻取值为

$$R > (U_\phi \times K_C) / I_{L_{\min}} \times 15\% \quad (2)$$

式中, $I_{L_{\min}}$ 为消弧线圈最小挡补偿电流。

由式(2)可知,如果阻尼电阻过小,会使得中性点电压较高,不能达到 15% 相电压的要求。且如果阻尼电阻过大,会导致中性点电流过小,考虑到调匝式消弧线圈控制器在计算补偿电流时采用的是幅值

相位法,中性点电流过小会导致测量误差增大,进而使得电容电流计算不准确,在补偿过程中容易造成全补偿,导致虚拟接地。

4) 忽略其他电阻的影响:幅值相位法中所用电阻仅考虑了阻尼电阻的作用,忽略了消弧线圈损耗电阻和线路对地泄露电阻,与实际运行情况存在一定偏差。这也会一定程度上导致电容电流计算方法的误差较大,使得消弧线圈不能精准补偿,在系统接地时致使残流过大会烧毁可控硅元件或者发生全补偿,导致虚拟接地。

5) 消弧线圈容量的配置:随着电缆的大规模应用,系统中电容电流愈增,原有的一些消弧线圈容量不足以提供相应的电感电流,使得消弧线圈运行在欠补偿状态下;当线路运行方式调整时,电容电流的变化可能会造成全补偿,导致虚拟接地。

6) 调节开关动作的影响:调匝式消弧线圈控制系统在容抗计算时,需要调整挡位测得中性点电流。因此当系统对地电容发生变化,控制系统便要重新计算容抗。每一次计算均需要调挡两次,因此在系统运行不平稳时,消弧线圈调挡频繁会使得调节开关使用寿命下降,对其动作情况有一定的负面作用。且两次调挡时间间隔会受调节开关固有动作时间影响,有较长的测量周期,使得计算中假定不变的不平衡电压有可能发生变化,对容抗的计算产生一定的误差。因此,有可能导致补偿的电感电流不足进而发生全补偿,引发虚拟接地。

2.2 实验分析

1) 触发实验

选取某 110 kV 变电站的消弧线圈做实验,因该站处于未投运状态,为实验提供了便利条件。消弧线圈设备参数如表 1 所示。

表 1 消弧线圈参数

参数名称	数值
类型	预调式/调匝式
容量/kVA	1000
挡位数	25
补偿范围/A	50~165
阻尼电阻/ Ω	16
触发电压/V	2388

在中性点侧加电压,设置电压从 0 缓慢上升至 6 kV,再从 6 kV 缓慢下降至 0。因控制屏采集数据是间歇性采集,实验中采集了 4 组数据,每组 5 个周

期,每个周期是 20 ms,将 4 组数据绘制于一张图中。实验波形如图 3 所示,a、b、c、d 是 4 组数据的节点,纵坐标没有标注数值是因为控制屏所采集的数据为模拟量,数值是非真实的,仅可代表数值变化趋势。

由图 3 可以看出,触发电流在触发前很小,随着中性点电压的上升,触发电流逐步增大,在 a 时刻后持续呈尖峰脉冲状,即表明可控硅被触发,此时控制屏上显示的中性点电压为 39.43 V,一次侧值即为 2390 V,与其触发电压门限值对应。随着中性点电压在到达 6 kV 后逐步降低,即代表“接地消失”,触发电流逐步减小,恢复非导通状态的正弦波。图中,由 b 到 c 再到 d,触发电流渐变至很小的数值,恢复到触发前的状态。

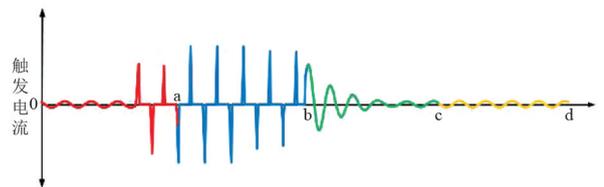


图 3 触发电流波形

分析触发实验可知,在可控硅导通前,阻尼电阻承受功率随着中性点电压的增大也逐步增大,触发电压越高,阻尼电阻承受功率和能量越大。因此,触发电压不可一味提高。除此,触发电压若设置过低,会造成频繁虚拟接地,引起调度人员误判。结合现场工作经验及资料参考^[16],非金属性接地中性点电压约为 2000 V。因此,实验设备的触发电压设置合理,满足运行要求。

2) 跟踪调挡实验

在中性点处加入 50 V 电压源,即代替正常运行情况下串联回路中的不平衡电压,为消弧线圈补偿提供电流。回路中分次串联不同大小的电容,观察消弧线圈控制屏能否跟踪电容电流的变化相应地改变补偿电流值。设置电容分别为 8 μF 、16 μF 、30 μF 、40 μF 、65 μF 、80 μF 、90 μF ,实验结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出,在电容值为 8 μF 、16 μF 、90 μF 时,由于电容电流没有达到消弧线圈的最低调节值 50 A 或是超过最高调节值 165 A,挡位始终运行在极限挡,并且控制系统报出“容量越限”的告警信号,此时计算误差较大。在电容值为 30~80 μF 时,消弧线圈控制系统均可正常调挡补偿容流,虽存在一定的计算误差,但均满足残流 5~10 A 的要求。

对跟踪调挡时有载开关的动作时间进行统计,从 1 挡调至 25 挡用时 296 s,调挡次数为 24 次,平

表 2 跟踪调档实验结果

实验电容值/ μF	控制屏显示参数					计算参数	
	电容值/ μF	电容电流/A	中性点电压/V	中性点电流/A	挡位	理论计算容流/A	误差/%
8	15.6	0.30	0.147	越限	1	15.2	2.6
16	30.2	0.99	0.477	越限	1	30.4	0.7
30	56.3	2.14	1.323	65.2	4	57.0	1.2
40	75.2	1.83	1.443	84.5	8	76.0	1.1
65	121.0	1.08	1.276	132.0	18	123.5	2.0
80	156.8	0.98	1.173	162.5	24	161.5	2.9
90	165.5	0.91	1.102	越限	25	171.0	3.2

均每次调档用时约 12~13 s。可以看出,有载调压开关动作时间较长,对补偿电流的计算误差存在一定的影响,验证了前面所述的原因分析。

3 针对虚幻接地的改进措施

关于所提出的导致虚幻接地的原因,结合现场实际运行,提出以下抑制措施:

1) 针对不同挡位触发电压存在差异的情况,提出一种“自适应”触发装置,设置触发电阻 R_1 和 R_2 ,使得可控硅能够灵活应对不同挡位有效触发,避免高挡位容易触发引发虚幻接地。原理如图 4 所示,图中: R_1 、 R_2 为触发电阻; R 为阻尼电阻; K 为反向并联可控硅,有双向导通的作用,适用于大电流回路。

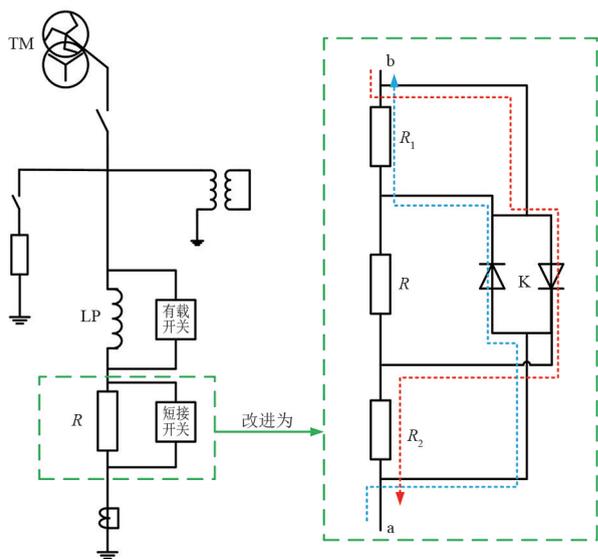


图 4 “自适应”触发装置原理

常规触发装置中,当中性点电压升高,阻尼电阻两侧电压达到触发电压值,即触发可控硅短接阻尼电阻。在原有阻尼电阻两侧加入串联的触发电阻,使得当阻尼电阻连同两个触发电阻两侧电压达到触

发电压值时,触发动作。已知中性点电压为交流正弦波,当其在正半波时,触发通路如图中红色线标注;当其在负半波时,触发通路如图中蓝色线标注。在挡位较低时,消弧线圈提供的电感电流小,若电压为正, a 侧为低电位,则 R_2 两侧的电压较小,即 $(U_n - U_{R_2})$ 较大,能够容易达到触发电压;若电压为负, b 侧为低电位,则 R_1 两侧的电压较小,即 $(U_n - U_{R_1})$ 较大,同样能够容易达到触发电压。在挡位高时,消弧线圈提供的电感电流大,类似地, R_1 、 R_2 两侧的电压较大,即 $(U_n - U_{R_2})$ 和 $(U_n - U_{R_1})$ 较小,能够避免高挡位易触发的弊端。

因此,触发装置中触发电阻的存在,可有效降低不同挡位触发难易不同造成虚幻接地的风险,为消弧线圈触发机构的设置提供新的思路。其参数整定方法可参考文献[21],但需依照具体消弧线圈参数计算。

2) 关于所述触发阈值影响补偿准确性的问题,提供了一种实验方法用于检测阈值设置的正确性,可消除阈值对系统出现虚幻接地的不良影响。

与前述调档实验类似,在中性点侧加一定的电压,分次串入不同大小的电容,观察消弧线圈控制系统的变化。

消弧线圈在重新调档时,前提条件是容性电流的变化大于设备每一级挡位间的级差电流,否则会维持原有挡位继续运行。因此,实验选取的两次电容差值应与级差电流对应。以触发实验所用设备为例,设备的级差电流为 4.8 V,对应电容差值应为 2.5 μF 。

除此,实验选取的电容应大于消弧线圈调整下限值 50 A 对应的电容值,即 26.3 μF 。实验可安排选取 27 μF 和 29.5 μF 的两个电容,分别串入消弧线圈回路中,若消弧线圈控制系统在电容变为 29.5 μF 后,及时重新计算容性电流且正确升一挡,则阈值设

定正确;若消弧线圈控制屏参数始终未发生变化,则阈值设定过高,不能有效应对容性电流的微小变化,计算不够准确。

阈值的设置也不能过低,否则使得系统中过于微小的容性电流变化均会引起重新计算。而如前所述,容性电流的每次计算均需要调挡,频繁计算导致频繁调挡,对消弧线圈有载开关的寿命会造成一定的影响。

3)在同一个变电站存在多台消弧线圈并列运行时,涉及到消弧线圈通信配合及容量承受两方面问题。

以某110 kV变电站为例,其接线方式如图5所示,有3台消弧线圈分别连接在不同段的母线上。正常运行方式是901、902、904、903断路器为合位,912、934断路器为分位,3台消弧线圈各自独立运行。

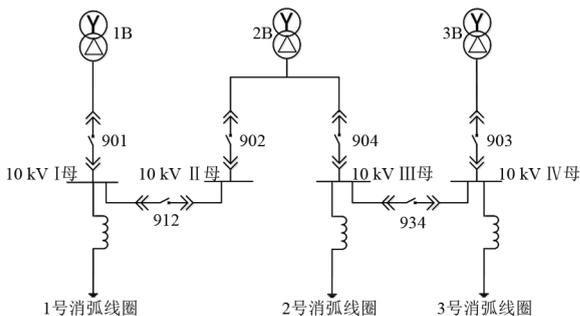


图5 某110 kV变电站一次接线

若3台变压器任一台故障时,为合理分配负荷,使得剩余两台变压器各带两段母线负荷,导致1号消弧线圈单独运行,2、3号消弧线圈并列运行。因此,需要考虑1号消弧线圈容量是否满足对应的I、II段母线上对地电容电流要求,能否在容性电流很大时提供相应的补偿电流。除此,还需考虑2、3号消弧线圈主从设置,保证及时供应电感电流。

若3台变压器任两台变压器故障时,剩余一台变压器需带全站负荷,此时,则需考虑3台消弧线圈同时并列运行的问题。一般情况下,设定两台消弧线圈为主机,另一台为从机。对于主机定挡在哪个挡位以及从机满挡后另两台主机怎么再次分配,都会影响到对容性电流的补偿是否准确。

综上所述,针对多台消弧线圈运行的问题,提出了在投运前需根据不同运行方式,设定消弧线圈的运行策略,避免消弧线圈因运行方式改变导致其容量不能承受变化后的容性电流,进而补偿不准确,引发虚幻接地。

4 结论

通过对消弧线圈控制原理的分析及消弧线圈内部各参数设置的探讨,归纳总结了生产实践中引发虚幻接地的众多原因,并通过实验进一步深入分析上述原因的影响。针对触发电压存在的现实问题,创新性地提出了触发结构的改造升级,可有效抑制虚幻接地的产生,并对触发阈值的检验及消弧线圈并列运行策略的制定提供了参考方案,具有一定的工程实践意义。

参考文献

- [1] 王宾,崔鑫.中性点经消弧线圈接地配电网弧光高阻接地故障非线性建模及故障解析分析[J].中国电机工程学报,2021,41(11):3864-3873.
- [2] 贾晨曦,杨龙月,杜贵府.全电流补偿消弧线圈关键技术综述[J].电力系统保护与控制,2015,43(9):145-154.
- [3] 付余民,姜涛,姜禹谦,等.消弧线圈接地系统继电故障电压异常分析[J].山东电力技术,2019,46(3):37-40.
- [4] 吴文晓,许燕,杨学君,等.配电网消弧线圈优化控制策略[J].浙江电力,2018,37(3):48-52.
- [5] 束洪春.谐振接地系统虚幻接地的辨识和综合选线方法[J].电力自动化设备,2016,36(6):122-129.
- [6] 王恒山,杨文陵,王门鸿,等.中性点经消弧线圈接地系统虚幻接地故障分析[J].供用电,2012,29(5):49-51.
- [7] 钱学成,陈宇超,尹燕霖,等.不平衡用户引起配网虚幻接地的探讨及处理[J].农村电气化,2021(1):41-42.
- [8] 顾精彩.消弧线圈系统位移过电压的危害及其限制措施[C]//全国电网中性点接地方式与接地技术研讨会论文集.杭州:中国电机工程学会,2005:57-58.
- [9] 徐炜彬,温涌泉,修孟懿.66 kV空母线铁磁谐振造成“虚幻接地”现象的分析[J].中国电机工程学报(技术版),2011(5):13-17.
- [10] 王晓玲,王红梅,李广华.电网几种“虚幻接地”情况的分析[J].科技创新导报,2011(19):68-70.
- [11] 黄驾驾,刘东红.中性点经消弧线圈接地系统虚假接地的原因浅析[J].浙江电力,2013,32(1):14-16.
- [12] 杨晟,张剑彪,杨凯.中性点非直接接地系统的虚幻接地现象探讨[J].山西电力,2013(6):18-21.
- [13] 卢成楠,邹经鑫,何振宇,等.预调式消弧线圈自动控制装置的现场调试方法[J].四川电力技术,2019,42(6):71-77.