

10 kV 配电网母线电压异常谐振及消谐措施分析

邓志斌¹, 张强², 王书恒³, 孙扬⁴, 邓志祥³

(1. 国网江西省电力有限公司, 江西 南昌 330077; 2. 阳江核电有限公司电气部, 广东 阳江 529500; 3. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 4. 国网江西省电力有限公司安全督查中心, 江西 南昌 330029)

摘要:对10 kV 配电网母线电压异常谐振的产生原因进行了分析, 结合一起典型案例剖析了10 kV 系统线性谐振及铁磁谐振的激发条件, 梳理了现有消谐方法存在的不足, 提出了配网设备选型、运维的技改措施。基于MATLAB 仿真模型分析验证了所提谐振产生机理的正确性及解决方案的有效性, 为研究10 kV 配电网系统电压谐振的前期预防、故障定位和解决方案提供了参考。

关键词:配电网; 谐振过电压; 铁磁谐振; 消谐

中图分类号: TM 72; TM 864 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-348X(2024)05-0006-07

0 引言

配电网覆盖面积大、线路长、网架结构复杂、寄生参数多, 独特的结构特点使其在实际运行中可能发生电压的异常波动, 对电力设备造成损害, 缩短设备使用寿命, 甚至引发事故。因此, 深入研究配电网电压异常波动的机理与规律, 有助于及时发现并消除潜在的安全隐患, 确保配电网安全稳定运行。

在中性点不接地配电网中存在变压器等电感元件和输电线路等电容元件, 母线上还接有对地绝缘的电磁式电压互感器, 其一次绕组接成星形, 并且中性点直接接地。这些电容、电感元件并联连接, 各自组成独立的振荡回路。在电路运行或发生故障时, 外界电路和振荡回路容易引起谐振, 产生的谐振过电压会在电路中长期存在^[1], 只有在电路结构改变, 破坏谐振产生的条件下才会终止。在电压等级较低的中性点不接地配电网中, 谐振过电压会长期威胁电网的安全稳定运行, 针对谐振过电压的治理方法研究一直没有中断过。

在电力系统中, 电阻与电容为线性参数, 而电感则可能发生线性、非线性或周期性变化。基于此, 电

压谐振被分为三类: 线性谐振、参数谐振和铁磁谐振^[2]。针对危害较高的电压谐振现象, 国内外学者提出了多种消谐方法^[3-4]。这些方法根据其消谐原理, 可以归纳为三类: 一是引入阻尼消耗谐振回路中的能量, 以达到抑制谐振的目的^[5-6]; 二是改变振荡回路的参数, 破坏谐振的参数匹配条件, 达到阻止谐振被激发的效果^[7]; 三是采用电力电子消谐装置吸收特定故障零序能量, 限制中性点位移电压以抑制谐振^[8-9]。这些措施虽在一定程度上提供了帮助, 但是由于电力系统结构复杂、振荡类型差异大, 在实际运行中仍常常发生谐振现象, 对电网的安全运行造成了严峻的考验。

结合配电网的实际运行情况, 文中首先对配电网谐振过电压进行介绍; 再对一起10 kV 母线电压异常谐振典型现象的发展过程及实例波形进行分析, 通过Matlab 仿真分析, 验证对实测波形分析的正确性; 最后, 提出了减少10 kV 系统谐振现象的整改对策, 以提高配网供电可靠及稳定性。

1 配电网母线电压谐振典型案例分析

1.1 故障前运行方式

某220 kV 变电站10 kV 系统侧为单母分段运

收稿日期: 2024-07-16

作者简介: 邓志斌(1973), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为供用电技术。

行,共2段母线,分列运行。10 kV II母接2号主变10 kV侧902开关电源,供L1、L2、L3、L4、L5、L6、L7、L8、L9、L10(未投运)等10条线路,并带一台站用变及母线电压互感器,其中L3和L5为混联线路,其余均为纯电缆线路。此次电压振荡事件发生前,5号、6号、7号、8号电容器处于热备用状态,L9及L10未投运,系统II段母线接线简图如图1所示。

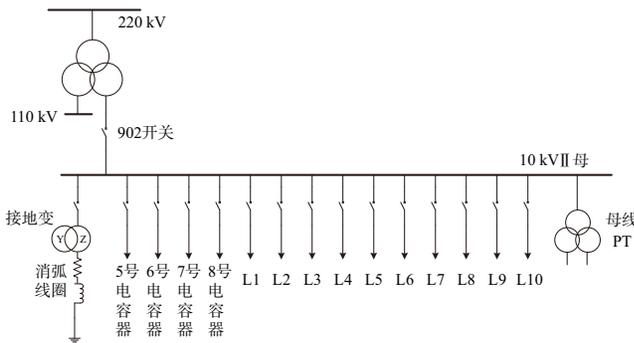


图1 变电站II段母线接线简图

图1中,自动调谐消弧线圈成套装置型号为WX-HK-630型,消弧线圈在运行时,其阻尼电阻为 $10\ \Omega$,电感为 $0.19\ \text{H}$;接地变压器型号为DKSC-1000/10.5-315/0.4;电容器组型号为BAM11/2 $\sqrt{3}$ -334-1W,额定容量为 $334\ \text{kVar}$,电容量为 $212\ \mu\text{F}$;母线电压电压互感器型号为JDZX9-10G;其一次侧直流电阻为 $365\ \Omega$,二次侧直流电阻为 $0.06\ \Omega$,其额定线电压下激磁电抗为 $1.1\ \text{M}\Omega$ 。环网箱PT柜内三相PT型号为JSZW12A-10FR,一次侧直流电阻为 $1.66\ \text{k}\Omega$,二次侧直流电阻为 $0.127\ \Omega$,其额定线电压下激磁电抗为 $1.09\ \text{M}\Omega$,为4PT接线方式。通过查阅相关标准和电工手册^[10-11],可得线路的电阻、电感的正序参数,近似计算三芯电缆线路时,一般可取单位长度零序阻抗 $r_0=10r_1, x_0=3.5x_1$,无架空地线的单回架空线路单位长度零序阻抗 $r_0=r_1+0.15, x_0=3.5x_1$ ^[12],架空线路零序电容值可根据电容电流反推而来,电容电流计算公式为^[13]:

$$I_c \approx 3U \times L \times 10^{-3} \text{ A} \quad (1)$$

式中: U 为架空线路的额定电压,kV; L 为架空线路长度,km。根据 $C=I_c/\omega U$,L3和L5架空线路部分的电容值分别为 $0.228\ \mu\text{F}$ 和 $0.158\ \mu\text{F}$ 。

根据资料与计算,II段母线系统所带线路的主要参数如表1所示。

表1 II段母线10 kV出线参数表

线路	架空线路/km	电缆/km	R_1/Ω	R_0/Ω	L_1/H	L_0/H	$C_1/\mu\text{F}$	$C_0/\mu\text{F}$
L1	0	2.055	0.196 85	1.968 5	0.000 57	0.002 01	0.841 97	0.841 97
L2	0	3.55	0.319 5	3.195	0.000 98	0.003 44	1.469 5	1.469 5
L3	21.77	2.02	5.173 1	11.89	0.027 65	0.096 76	0.723 77	0.723 77
L4	0	11.431	1.234 37	12.343 7	0.003 22	0.011 27	4.213 56	4.213 56
L5	15.02	2.012	3.667 2	9.18	0.019 25	0.067 39	0.706 83	0.706 83
L6	0	3.674	0.368 46	3.684 6	0.001 03	0.003 59	1.499 55	1.499 55
L7	0	3.15	0.283 5	2.835	0.000 87	0.003 06	1.316 7	1.316 7
L8	0	6.45	0.664 5	6.645	0.001 81	0.006 35	2.531 25	2.531 25
合计	36.79	34.342	0.058 03	0.5348	6.000 17	0.000 6	13.303 1	13.303 1

1.2 故障发展过程分析

某日21时30分左右,某变电站II段母线出现接地告警,运维人员发现L5电缆分接箱电缆头烧毁,22:04分拉开L5后,系统B相电压依然较低,仅2 kV,从变电站开始尝试解决,22:33分拉开L8时,B相电压上升至4.9 kV左右,三相电压不平衡程度较高,拉开其他线路时,电压无明显变化;当日23:53:03至次日12:27:55期间,运维人员三次分合消弧线圈,在次日00:28:04重新合上L5线后,于00:50:21在分消弧线圈时开始出现电压振荡,相电压幅值呈现周期性变化,合上消弧线圈则振荡消失,出现三相不平衡,不平衡电压超过限值15 V;至次日12:27:55退出消弧线圈时,振荡一直存在,直至次日13:11:34,L1线路分闸时,电压振荡消失。该次异常事件时序如图2所示。

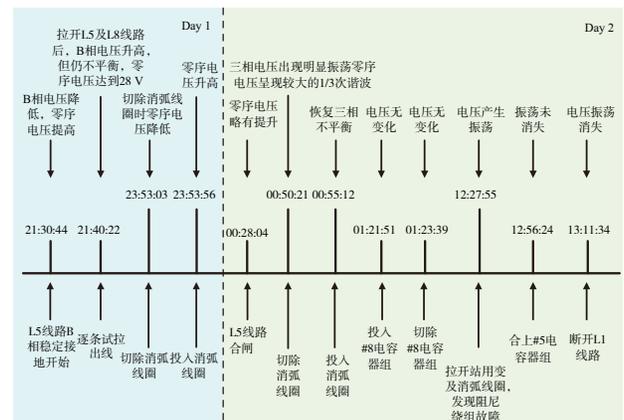


图2 异常事件时序

1.3 实例故障原因分析

10 kV系统谐振过电压主要包括:线性谐振及非线性谐振过电压两类。线性谐振过电压主要由不带铁芯的电感元件或励磁特性接近线性的带铁芯电感元件和系统电容元件形成,典型代表有消弧线圈补偿网络引起的线性谐振过电压,谐振频率主要为电源频率,一般为基频;非线性谐振过电压主要由带铁芯的电感元件(如电磁式电压互感器)和

系统的电容元件组成,由于铁芯电感元件的饱和现象,电感参数呈现非线性特征,谐振频率可能是基频、倍频和分频,主要类型包括断线谐振过电压,及电压互感器饱和引起的谐振过电压。此次事件呈现分频谐振特征,加之现场排查无断线情况,可排除断线谐振过电压的原因,可基本锁定为电压互感器饱和引起的谐振。

在中性点不接地电网中,母线上接有对地绝缘的电磁式电压互感器,其一次绕组接成星形,并且中性点直接接地。因此,网络对地参数除了电力设备和导线的对地电容之外,还有电压互感器的励磁电感,它们通过并联连接,各自组成独立的振荡回路。

由于铁磁谐振现象在零序回路内产生,所以导线的相间电容、改善功率因数用的电容器组、电网内的负载变压器及其有功和无功负荷,对于谐振过程不起任何作用^[14],系统 PT 铁磁谐振回路可简化为图 3 所示回路。

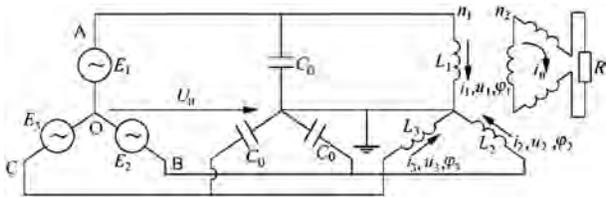


图3 电压互感器导致铁磁谐振回路

根据图 3,可以得到电源中性点电压为:

$$E_0 = \frac{\frac{E_1}{\omega L_1} + \frac{E_2}{\omega L_2} + \frac{E_3}{\omega L_3}}{3\omega C_0 - \left(\frac{1}{\omega L_1} + \frac{1}{\omega L_2} + \frac{1}{\omega L_3}\right)} \quad (2)$$

当系统在正常运行情况下,PT的工作点处在非饱和区,各相励磁电感相同,即 $L_1=L_2=L_3$,系统三相平衡,根据上式可以得知,此时位移电压 E_0 为零。但是当系统中出现某种扰动时,例如:电源突然合闸,电网中电压互感器突然投入,线路发生单相接地(包括弧光短路接地)、合空载母线、雷击等,可能使一相或两相的对地电压瞬间提高,三相对地负荷不平衡,使中性点位移产生零序电压,导致线路电流持续增大,从而使得电压互感器铁心逐渐磁饱和,励磁电感逐渐减小,当电容和电感的参数匹配时,就可能激发串联谐振,引起过电压。

常见的电压互感器饱和的情况包括:电压互感器突然合闸,使一相或两相绕组内出现巨大的涌流;线

路单相弧光接地,使健全相电压突然升至线电压,而故障相在接地消失时又可能有电压的突然上升,在这些暂态中也会有很大的涌流。

为抑制电压互感器饱和引起的铁磁谐振,一般可在互感器一次侧中性点经电阻或者 4PT 接地,也可在二次侧剩余绕组经电阻短接,这些措施在一定程度上可以抑制铁磁谐振。研究表明,一次侧中性点经 PT 接地应用效果较其它手段更佳^[15]。

该系统共有三相电压互感器 17 只,其中 2 只 PT 为中性点直接接地方式,其余互感器中性点均经 4PT 接地。

站内的消弧线圈处于过补偿状态,消弧线圈感抗 X_1 小于线路容抗 X_c ,感性电流大于容性电流,但是消弧线圈的脱谐度不大,一般为 5%~20%,即正常运行时零序回路的自振频率与电源频率接近。因此,在网络有零序电压时,会出现消弧线圈与系统电容的串联谐振,造成中性点较大的电压偏移。消弧线圈回路可串接或并联阻尼电阻,以限制这种中性点偏移。

如图 4 所示,中性点电压 U_n 为:

$$U_n = I_0 (R + jX_1) = \frac{U_0 (R + jX_1)}{R + j(X_1 - X_c)} \quad (3)$$

式中: X_1 为消弧线圈的感抗; X_c 为系统容抗; R 为消弧线圈的阻尼电阻。从上式可以看出,即使系统发生谐振(即 $X_1=X_c$),若阻尼电阻取适当值,可以将中性点位移电压控制在允许值(相电压的 15%)范围内。而当阻尼电阻损坏时,零序电压 U_0 将明显放大,导致中性点电压产生较大偏移。

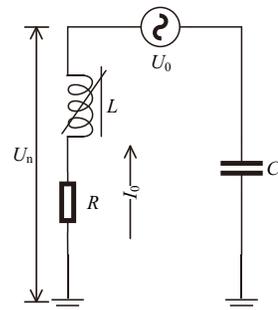


图4 消弧线圈串阻尼电阻

中性点经消弧线圈接地的零序网络图如图 5 所示。图 5 中 L 为消弧线圈等效电感, R_L 为阻尼电阻, L_0 为接地变零序阻抗, L_p 为电压互感器等效电感, C_0 为线路等效电容。由于消弧线圈及接地变的零序等效电感很小,远小于电压互感器的电感,电压互感器

的零序电感相当于被短接,使系统的电感参数与电容参数难以配合,谐振难以发生。

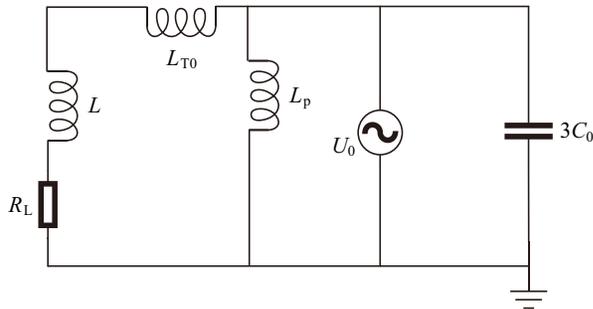


图5 消弧线圈补偿网络零序回路

但也有研究指出,某些消弧线圈补偿网络在其退出运行时也会激发铁磁谐振^[6],现有文献尚未报道相关案例和机理分析。该案例中3次切除消弧线圈,为铁磁谐振的激发创造了条件。

1) 根据事件的详细经过、铁磁谐振的产生机理以及消弧线圈的特点,分析现场主要存在3个问题:

(1) 2条存在接地故障的线路拉开后,系统仍然存在较大的三相不平衡,零序电压达到28 V。

(2) II段母线电压在分站用变及消弧线圈的时刻,由三相不平衡的工频正弦电压突变为幅值规律性变化的交流电压。通过零序电压分析,振荡时零序电压包含1/3次谐波,呈现分频谐振的特征,但谐振产生的原因不清楚。

(3) 运维人员试图通过投切站内电容器组改变系统参数,破坏谐振条件,但是对消除电压振荡未起到任何作用。

一般而言,在采用了消弧线圈接地的情况下,由于消弧线圈的感抗 X_L 很小,远小于电压互感器的电抗 X_{Lp} ,电压互感器的感抗 X_{Lp} 相当于被短接,电压互感器饱和程度的变化难以激发铁磁谐振,而切除消弧线圈为铁磁谐振创造了条件。

根据系统参数,电压互感器在线电压下的感抗为1.1 M Ω ,经统计,母线及线路上共有17只三相PT,系统的等效感抗 $X_{Lp}=21.5$ k Ω ,系统的容抗 $X_C=81.6$ Ω 。在含有非线性电感元件的回路中,产生 n 次谐波谐振的必要条件是: $1/n\omega C < n\omega L_p$,即 $X_C/n < nX_{Lp}$,该系统的参数满足1/3次谐波产生的必要条件。

2) 针对上述3个问题,结合上述分析与现场检查情况分别分析如下:

(1) 经过现场检修发现,消弧线圈阻尼电阻的可

控硅损坏,导致阻尼电阻无法投入。阻尼电阻损坏后,将无法抑制中性点电压偏移,反而可能引起消弧线圈与系统电容的线性谐振。在当日23:53:03第一次拉开消弧线圈时,系统零序电压反而从21 V下降至11 V,23:53:56合上消弧线圈,系统零序电压又恢复至22 V,与分析结果相符。

根据计算,消弧线圈及接地变的零序感抗 $X_L=63.9$ Ω ,系统零序电容为 $X_C=81.6$ Ω ,因此当阻尼电阻损坏时,系统的零序电压最大可增大3.61倍(阻尼电阻 $R=0$ 时),即 $U_n=3.61 U_0$,因此导致系统零序电压产生较大幅度的增长。

(2) 该谐振的发生在切断消弧线圈的时刻产生,呈现1/3次分频谐振的特点。断开前,系统零序电压较大,主要原因是退出消弧线圈时,系统的零序电压较大,三相电压不平衡度较高;切断消弧线圈后,零序电压在系统的零序网络中激发铁磁谐振,三相电压重新分配,产生振荡,在此过程可能在三相电压互感器饱和程度不同,激发铁磁谐振过电压。该激发过程与单相接地故障消失时铁磁谐振过电压的产生机理类似。

消弧线圈投入时,零序电流主要在线路电容与消弧线圈回路流通,电压互感器等效电感上的电流很小;切除消弧线圈时,线路电容与消弧线圈的回路被切断,线路电容与电压互感器励磁电感构成回路,由于电压互感器感抗与消弧线圈感抗差距很大,必将导致电压重新分配,电容两端的电压发生急剧变化,导致回路电流明显增大,造成互感器饱和。

结合该案例,对消弧线圈退出运行时引发铁磁谐振的机理分析如下:消弧线圈的切除过程中,当三相电压不平衡度很小时,切除消弧线圈造成的电压波动很小,难以引起电压互感器饱和。当系统的三相电压本身不平衡度较大,或者阻尼电阻损坏导致三相电压不平衡度较大,切除消弧线圈将引起零序电压的重新分配,导致零序电压明显振荡,可能在电压互感器中引起较大涌流,使得电压互感器饱和,进而激发铁磁谐振。

(3) 变电站内电容器组一般用于无功补偿,改善电网的功率因数,一般是星形连接,其中性点一般不接地,主要是因为中性点接地会造成电容器组受谐波影响大,且在单相接地故障点处的电流增加。因此,星形连接的电容器组对系统的零序网络没有影响,投切电容器组无法改变系统零序参数,对消除铁

磁谐振没有作用。

为进一步验证上述分析并探索可能的抑制措施,将进一步开展仿真分析进行验证。

1.4 仿真分析

根据上述理论分析,利用MATLAB建立该变电站II段母线及馈线的仿真模型,如图6所示。由于谐振过电压由零序电压引起,只取决于零序回路参数,所有导线的相间电容、改善功率因数用的电容器组、两相电压互感器、负载变压器及其有功、无功负荷对过电压不起任何作用,因此在建模时不考虑上述元件。

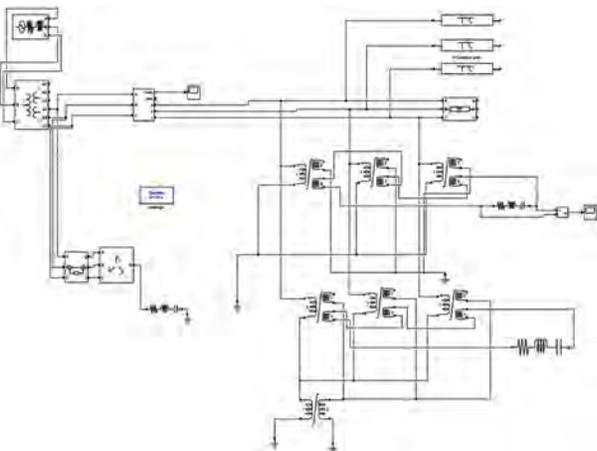


图6 基于MATLAB的II段母线及馈线仿真模型

搭建模型主要包括主变、接地变、消弧线圈、线路、三相电压互感器。

经统计,II段母线系统共有三相电压互感器20个,其中母线电压互感1个,其余电压互感器均分布在线路环网箱和配电室中,其中母线电压互感器和环网箱互感器均在电压互感器一次侧中性点接有PT,属于4PT接线方式,具有一定的抗谐振能力;仍有配电室2台PT没有采取4PT接线方式,电压互感器采用饱和变压器模型,输入绕组连接方式、额定电压、直阻、漏感、励磁特性等参数;同时,在系统中分别建立3PT和4PT的互感器模型,通过改变互感器励磁电流,改变电压互感器的等效电感,实现多要并联互感器的模拟。3PT和4PT的模型分别如图7、图8所示。

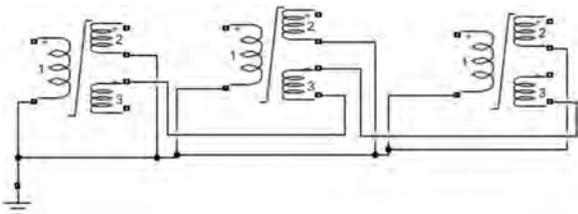


图7 3PT仿真模型

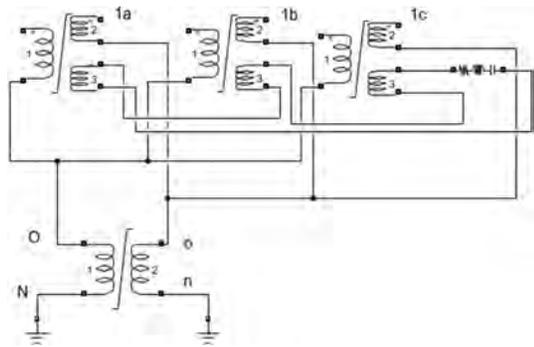


图8 4PT仿真模型

单台互感器的励磁特性如表2所示。

表2 PT磁链-电流数据

i/A	0	0.005	0.01	0.015	0.02	0.025	0.04
φ/Wb	0	8.5	17.8	25.9	31.1	33.4	35.0

设置好各项参数后,利用一个时控开关控制消弧线圈的投切,设置在2.0s时控开关断开,消弧线圈被切除,模拟计算该暂态过程。

计算消弧线圈切除的过程,并取零序电压和相电压进行分析。计算结果表明,系统零序电压(二次侧)在消弧线圈切除处发生突变,周期由0.02s变化为0.06s,呈现明显的1/3分频的特征,且该零序电压能一直维持在28V左右,呈现谐振特征,相电压在三个基波周期内轮换升高,与实际振荡情况相符,如图9、图10所示。

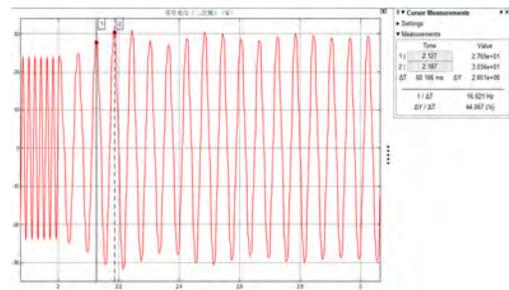


图9 零序电压波形

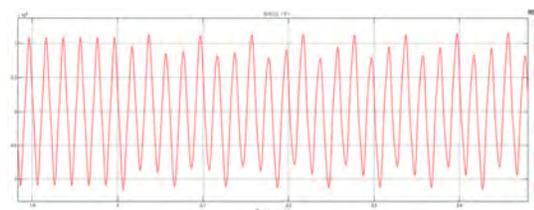


图10 相电压波形

该次谐振是在消弧线圈阻尼电阻失效、线路参数与电压互感器饱和参数匹配等多个条件同时满足的情况下产生的。因此修复阻尼电阻、改变系统线路参数、改善电压互感器接线方式都可能破坏谐振条件。

分别仿真计算投入阻尼电阻、将所有电压互感器

改为4PT接线、切除一条线路等方式下的电压变化,发现均破坏了谐振条件。

1) 投入阻尼电阻

根据消弧线圈说明书,阻尼电阻为 $10\ \Omega$,零序电压变化如图 11 所示。

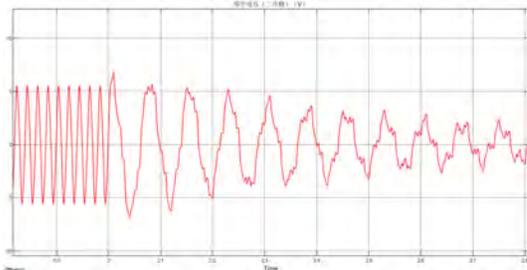


图 11 投入阻尼电阻时的零序电压波形

可以看出,当阻尼电阻正确投入时,当消弧线圈退出时,系统的零序电压不会被放大,经过低频振荡,逐渐衰减。

2) 将电压互感器改为 4PT 接线

将两台 3PT 的电压互感器改为 4PT 接线,零序电压变化如图 12 所示。

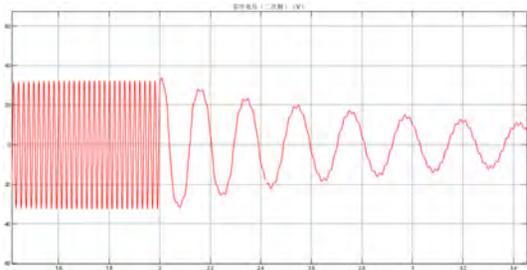


图 12 4PT 接线时的零序电压波形

所有互感器都接成 4PT 时,在阻尼电阻损坏的情况下,切除消弧线圈时,系统零序电压产生低频振荡,但会逐渐衰减至限值以下。

3) 切除一条线路

在该次事件中,切除其中一条电缆线路,零序电压变化如图 13 所示。消弧线圈退出时,零序电压会产生低频振荡,但是逐渐衰减,不会产生谐振。

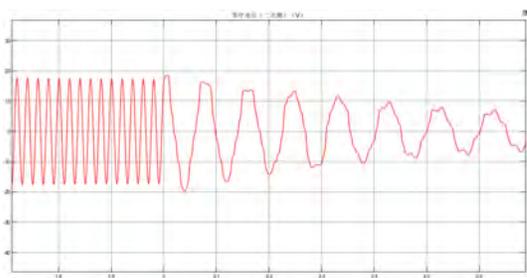


图 13 切除一条线路时的零序电压波形

需要指出的是,投切变电站内的电容器组对消除这种铁磁谐振过电压并不起作用,这是因为电容器组采用星型接线,中性点不接地,不参与零序网络,其参数改变对零序网络没有影响,因此投切电容器组对消除铁磁谐振是没有作用的。

综合上述分析,投入消弧线圈阻尼电阻、更改 PT 接线方式为 4PT,以及切除一条线路都可以破坏谐振条件。采取临时措施时,可优先切除或投入一两条线路。

2 配电网母线电压异常谐振处理方法

2.1 10 kV 系统谐振主要原因

根据上述分析,该次故障可归结为线性谐振期间退出消弧线圈,导致电压互感器饱和并引起了铁磁谐振。为减少 10 kV 系统谐振现象,现总结了配网线性谐振和铁磁谐振的主要原因、现象特征,如表 3、表 4 所示。

表 3 10 kV 系统线性谐振原因及特征

原因	原因分析	现象与特征
限压电阻未及投入	单相接地时,限压电阻短路,消弧线圈补偿电容电流。接地消失后,限压保护持续发出零序电压越限告警电阻若因可控硅或机构故障未投运,警和单相接地告警信号将引发线性谐振,抬高中性点电压	
消弧线圈额定容量不足	当消弧线圈容量不足时,将处于欠补偿状态,系统断线故障时,对地电容减小,可能造成消弧线圈电感与对地电容匹配,形成串联谐振	1. 中性点电压超限 2. 三相电压不平衡
	在对空母线充电时,母线上三相对地电空母线充容不平衡度较大,中性点位移电压较高,一相电压降低电时投入高,超过消弧线圈的启动整定值,系 2. 保护装置发出母线接地信号消弧线圈误判为单相接地,限压电阻被短 3. 送出一两条线路后,接地自动接,造成线性谐振,中性点电压增大 消失,三相电压恢复正常	

表 4 10 kV 系统铁磁谐振原因及特征

原因	原因分析	现象与特征
弧光接地故障	不接地系统单相接地故障消失时,暂态能量经电压互感器中性点释放,引发 PT 暂态电流致绕组饱和。弧光接地反复加剧此过程,暂态能量累积加重饱和,进而诱发铁磁谐振	1. 中性点电压升高至线电压 2. 母线电压同时升高 3. 三相电压中高频含量较高
单相接地故障消失	不接地系统单相接地时,非故障相电压升至线电压;故障消失后,电压回落到相电压,部分重分配电荷经电压互感器的电压表计以低感下降,引发铁磁谐振	1. 中性点电压升高至线电压 2. 母线电压升高 3. 电压互感器的电压表计以低感下降,引发铁磁谐振
断路器频繁三相不同期分闸	断路器不同期分闸致 PT 一次绕组过电压,分闸后重分配电荷经 PT 中性点入地,致其饱和,励磁电感下降,诱发铁磁谐振	1. 中性点电压升高 2. 电压互感器的电压表计以低感下降,引发铁磁谐振
不平衡电	10 kV 消弧线圈接地系统中,在电压较大时电压不平衡度大时切除消弧线圈,切除消弧线圈分配电荷会经 PT 绕组致其饱和,励磁电感下降,产生铁磁谐振	1. 中性点电压升高 2. 三相电压交替升高

2.2 10 kV 系统谐振对策

针对上述 10 kV 系统谐振现象,可通过设备选

型、消弧线圈运维等方式减少谐振的发生。

1) 应选用励磁特性饱和点较高的,在 $1.9U_m/\sqrt{3}$ 电压下铁芯磁通不饱和的电压互感器。

2) 禁止性能不满足要求的断路器同期投入运行。一般要求分闸不同期时间不大于 3 ms,合闸不同期时间不大于 5 ms。

3) 系统内所有三相 PT 均需采取抗谐振措施,同一母线出线上的 PT 应尽可能少。

4) 当系统所有线路的接地点消除后,若系统零序电压较故障前大幅增加,且难以消除,应检查消弧线圈阻尼电阻的运行状态。

5) 加强消弧线圈的运维,重点关注其残流、脱谐度等参数是否符合运行要求,减少非必要的退出;透过观察窗,查看阻尼电阻有无电阻丝脱落,断裂,停电检修时应检查可控硅、压敏电阻的状态。

6) 合闸空载母线后,若系统零序电压较大,应通过投入出线线路使其在允许范围后再投入消弧线圈;在切除消弧线圈时,若系统零序电压较大,应通过投切一两条线路,使零序电压在允许范围内,再切除消弧线圈。

7) 在新建工程设计时,应充分考虑消弧线圈容量,避免超容设计,造成消弧线圈欠补偿运行;对于消弧线圈容量不足的变电站,应进行增容改造。

8) 当出现谐振时,可通过投切一两条线路的方式,改变系统参数,使系统脱离谐振条件;应避免切断消弧线圈、投切中性点不接地电容器组等无效方式。

3 结语

文中通过对一起 10 kV 母线电压异常谐振典型现象的发展过程及实例波形进行分析,探讨 10 kV 系统发生谐振过电压的主要原因和特征现象;利用 MATLAB 搭建 10 kV 母线及馈线仿真模型分析,验证了所提理论的有效性;并针对不同原因导致的系统电

压谐振,通过在设备选型、系统运维等方面提出对应整改措施,为今后研究 10 kV 系统电压谐振故障定位和解决方案提供了参考。

参考文献:

- [1] 张纬钺,何金良,高玉明.过电压防护及绝缘配合[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [2] 杨志强.浅谈电力系统谐振过电压[J].现代信息科技,2019,3(14):49-50+53.
- [3] 柯红海,冯小兰,金辉,等.10 kV 配电网铁磁谐振过电压柔性抑制方法[J].电工电气,2022(4):26-31.
- [4] 丁瑞,徐楠,朱佳佳.电磁式电压互感器铁磁谐振的消谐措施[J].电工技术,2023(18):192-194.
- [5] 姚创,魏菊芳,于顺智,等.基于流敏电阻的电磁式电压互感器高压侧消谐技术研究[J].广东电力,2023,36(12):97-105.
- [6] 杨鑫,陈欣刚,孙浩天,等.采用间隙和电阻串联的配网 PT 铁磁谐振消除方法[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(5):84-93.
- [7] 杜严行.配电网母线电压异常现象分析及处理方法探讨[J].供用电,2017,34(1):42-45.
- [8] 卢盼,王文,刘鹏飞,等.抑制铁磁谐振的柔性接地装置最佳消谐电流计算与实现方法[J].中国电机工程学报,2023,43(4):1438-1449.
- [9] 吉全全,朱仰贺,韩国正,等.中压配电网低频振荡仿真分析及消谐措施[J].电网技术,2016,40(8):2451-2455.
- [10] 刘介才.供电工程师技术手册[M].北京:机械工业出版社,1998.
- [11] 张海浪.基于信号注入法的中压配电网电容电流测量[D].西安:西安科技大学,2019.
- [12] 何仰赞,温增银.电力系统分析(上册):第3版[M].武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [13] 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.
- [14] 解广润.电力系统过电压[M].北京:水利电力出版社,1985.
- [15] 宋伟.中低压配电网电磁互感器引起的铁磁谐振研究[D].西安:西安石油大学,2021.
- [16] 胡成.配电网的铁磁谐振机理和消谐措施的研究[D].成都:西南交通大学,2010.