消谐失效引发供水系统短时失电机制研究

孙坚伟

（上海浦东威立雅自来水有限公司，上海 200127）

摘要：配电系统中铁磁谐振成因复杂，单一的消谐装置难以满足消谐需求，因此将一次消谐和二次消谐结合起来，提出了一种新型微机消谐装置。该装置在铁磁谐振产生时对于谐振抑制确有效果，由于类型较新，相关运维指导较少，在实际运行使用中出现了较多问题。针对某水厂一起新型微机消谐装置失效引起的失电事件进行研究，分析了造成失电的原因。对于该厂配电网谐振情况以及装置动作情况进行研究，探究系统过电压情况和消谐装置误动作原因，新型消弧消谐装置电压整定和参数配合方案对装置的运行维护具有指导意义。

关键词：铁磁谐振；配电网；消谐装置

Study on a short-term power loss event of water supply system caused by the failure of a new harmonic elimination devicer

SUN Jianwei

(Shanghai Pudong Veolia Water Co., Ltd., Shanghai 200127, China)

Abstract: The causes of ferromagnetic in distribution systems are complex, and a single harmonic elimination device is difficult to meet the harmonic elimination needs. Therefore, a new type of microcomputer based harmonic elimination device is proposed by combining primary and secondary harmonic elimination. This device does have an effect on resonance suppression when ferromagnetic resonance is generated. Due to its relatively new type and limited guidance on operation and maintenance, many problems have arisen in actual operation and use.A power loss event caused by the failure of a new type of microcomputer based harmonic suppression device in a water plant is studied, the reasons for the power loss is analyzed, the resonance situation of the power distribution network and device operation of the plant is studied, the system overvoltage situation and the reasons for the malfunction of the harmonic suppression device is explored. The voltage setting and parameter coordination scheme of the new arc suppression harmonic suppression device has guiding significance for the operation and maintenance of the device..

Key words: ferromagnetic resonance; distribution network; harmonic elimination device; optimal control

0 引言

为对配电网中的电能质量进行监控，电压互感器（PT）被广泛使用[1]。运行中，由于单相接地[2]、操作过电压[3]和切换[4]等原因，将有一定几率激发铁磁谐振，造成熔断器熔断[5]、电压互感器爆炸[6]，严重时甚至会造成配电网失电[7]。据不完全统计，近年来的配电网失电事故有80%是谐振造成的[8]。

为对铁磁谐振进行治理，国内外学者提出了传统的电压互感器中性点接地[9]、在PT开口三角形侧接阻尼电阻[10]、4PT法[11]和更换励磁特性更好的电压互感器[12]等消谐措施。由于不同配电网

类型特点不一样，故在不同配电网中一般选用的消谐装置也不一样，如图1所示。

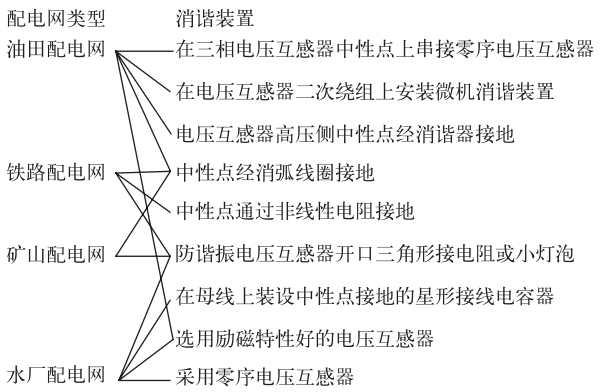

图 1　不同配电网类型常用的消谐装置

Fig. 1 Different distribution network types commonly used harmonic elimination devices

研究发现煤矿供电线路由于雷击造成单相接地故障和断线故障频繁，经常会发生由电磁式电压互感器饱和引起的铁磁谐振，消谐方法多采取防谐振PT开口三角形接电阻，消弧线圈串并电阻等方法；油田配电网大多用户无备用电源，消谐时多采用励磁特性好的电磁式PT、限制负荷侧PT数量和中性点经消弧线圈接地；大型水电厂配水过程为保证用户节点的可靠供水，用于加压供水的水泵会耗费大量电能，消谐时多采用母线上装设星形接线的电容器组、励磁特性好的电压互感器等方式。目前在配电网中常用的消谐装置分为一次、二次和微机消谐装置三类，装置接入点分为中性点和VT二次开口三角形绕组两种，然而单一的消谐措施应用效果有限，难以达到较好地治理铁磁谐振的目的。基于此，提出了一种新型微机消谐装置，将一次消谐和二次消谐结合起来，即在中性点接一次消谐器，VT二次开口三角形绕组接二次消谐器，当判断谐振发生时，先投入一次消谐，再投入二次消谐，可以很好地治理铁磁谐振。但由于新型微机消谐装置操作复杂，日常运行过程中出现了较多问题，因此需要对该装置运行动作情况进行研究，为日常运行维护提供指导。

本文以某水厂的一起新型微机消谐设备失效导致的供水配电系统短时失电事件为例，通过电磁暂态仿真软件仿真了6 kV配电网发生铁磁谐振后系统过电压情况，对于新型微机消谐装置的误动作情况进行研究，提出了消谐装置运行时的注意事项，对于消谐装置的日常运维具有指导意义。

1　事件发生经过及原因分析

2020年5月15日，某水厂在完成停役6 kV Ⅱ段进线、合闸6 kV母联开关后，恢复Ⅱ段6 kV开关柜，合6 kV开关柜（132G）时，压变消弧避雷柜（109G）内消谐装置损坏，引起Ⅰ段6 kV进线开关跳闸，出水机泵跳车。主接线如图2所示，采用单母分段带备用接线方式。事件造成电压互感器6 kV进线熔断器熔断，电压互感器及微机消谐装置均有火烧痕迹。事故原因分析认为，合闸132G开关柜时发生谐振接地，消谐装置未正常启动发挥保护作用，造成大电流烧毁压变柜；谐振的产生导致压变柜真空接触器C相触点咬死，引起装置本身发生故障，两相短路引起熔断器烧毁，并引起了Ⅰ段6 kV进线断路器跳闸。

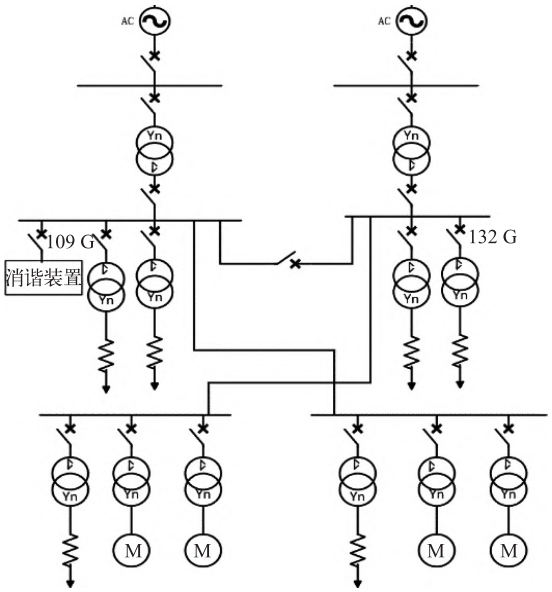

图 2　某水厂主接线

Fig. 2 The main wiring of a water plant

2　消谐装置工作机理及开箱检查

2.1　装置工作机理

新型微机消谐装置组成如图3所示。

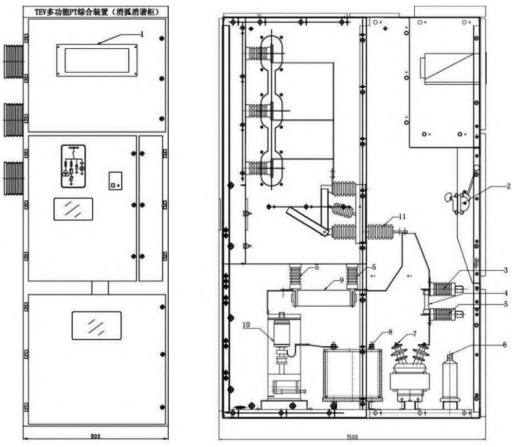

图 3　设备组成电路图

Fig. 3 Circuit diagram of equipment composition

1—智能控制器TWK　2—辅助开关　3—高压传感器
4—高压熔断器　5—高压绝缘子
6—组合式过电压保护器TE—ZGB　7—电压互感器TV
8—高能电压限制器FR　9—高压限流熔断器FU
10—快速直空接触器KA、KB、KC　11—高压隔离开关

当系统中产生操作过电压时，组合式过电压保护器动作限压，以保护系统绝缘[13-14]。当系统发生接地故障时，控制器采集信号，根据系统的三相电压特征值判断故障性质[15-16]。装置在不同类型故障下的动作流程如图4所示。

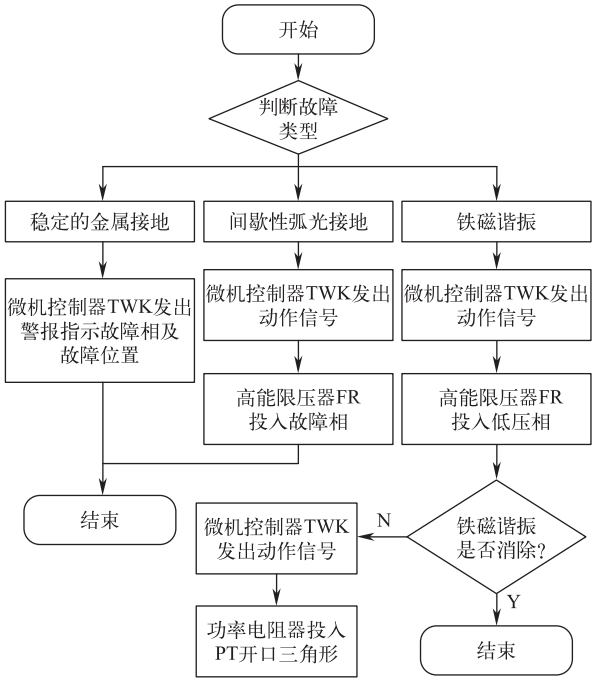

图 4　新型微机消谐装置动作流程图

Fig. 4 Action flow chart of a new type of microcomputer harmonic suppression device

由图4可知，新型微机消谐装置主要依靠真空接触器投入高能限压器FR以限制电压、释放电能，达到消除弧光接地和铁磁谐振的目的。

2.2　开箱检查

对密封的高能限压器进行了现场开箱研究，如图5所示。

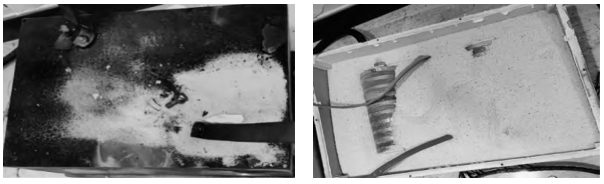

图 5　消谐装置开箱检查

Fig. 5 Detuning device unpacking site

箱中柱状物体为避雷器绝缘阀片，对箱中沙样物体进行取样，进行成分化验可知其成分主要为SiO_2。SiO_2的熔点为（1 723 ± 5）℃，沸点为2 230 ℃，具有较好的绝缘性能、化学稳定性与耐火性，可很好地提升高能限压器的可靠性。

3　系统谐振过电压情况仿真分析

3.1　仿真模型

采用PSCAD搭建水厂主接线，如图6所示。

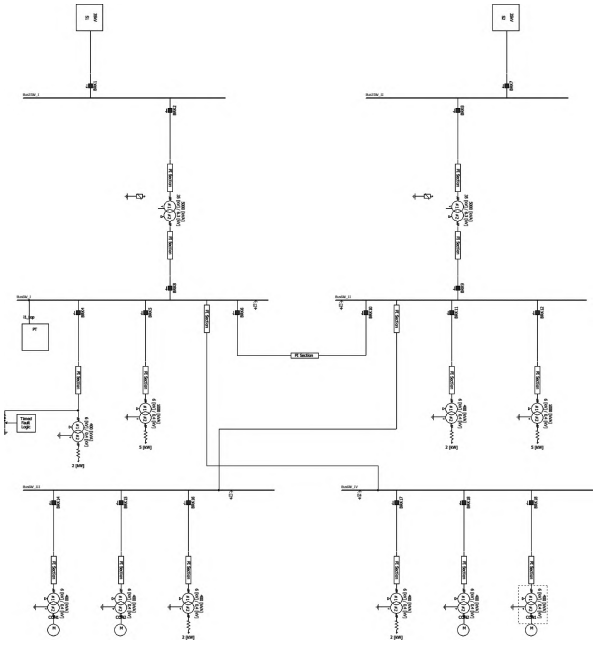

图 6　仿真模型

Fig. 6 Simulation model

（1）PT建模

将PT励磁特性曲线数据转换为标幺值后导入模型，电路主接线如图7所示。母线PT采用Y0/Y0，额定电压比为6 000/$\sqrt{3}$/100/$\sqrt{3}$/100/3，额定功率50 V·A，极限输出300 V·A。

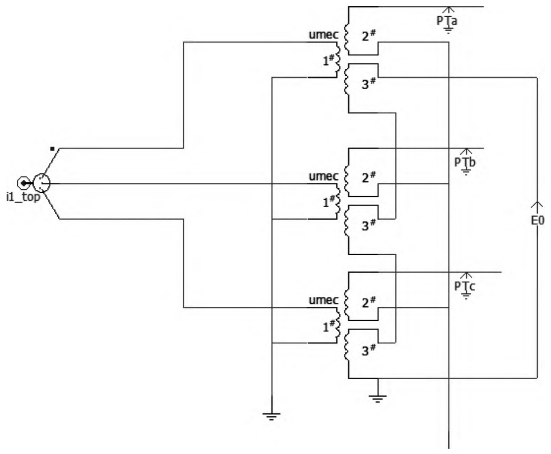

图 7　计及饱和的 PT 模型

Fig. 7 Take into account the saturated PT model

（2）电缆

电缆采用PI模型，6 kV电缆电容电流典型值为2 mA/km，由此可以计算出线路导纳参数为0.11 μF/km。

（3）35 kV主变压器

35 kV变压器额定电压比35 kV/6.3 kV，容量5 000 kV·A，短路电压百分数U_d%=9，连接组别Y/D11。

（4）电动机

电动机及参数设置见表1。

表 1　电动机参数设置

Tab. 1 Motor parameter setting

基本参数	取值
电动机名称	Motor 1
额定功率 /（MV·A）	1
额定电压（L-L）/kV	6
基本角频率 /（rad/s）	314.159 3
定子 / 转子匝数比	1
角惯性矩（J=2H）/s	3
机械阻尼（pu）	0.05

（5）消弧消谐装置建模

消弧消谐装置建模如图8所示。

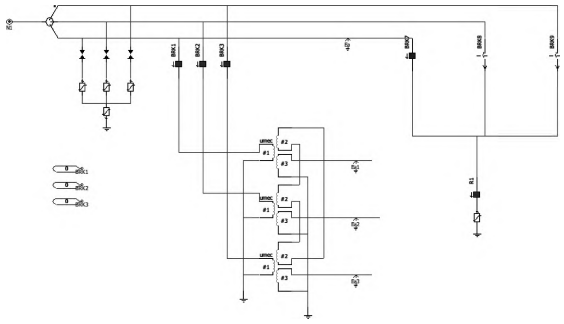

图 8　消谐装置建模

Fig. 8 Modeling of harmonic suppression device

3.2　仿真分析

设置配电网中A相在0.2 s产生单相接地故障，0.35 s单相接地故障消失，铁磁谐振被激发。此时发生分频谐振，频率为25 Hz，如图9所示。

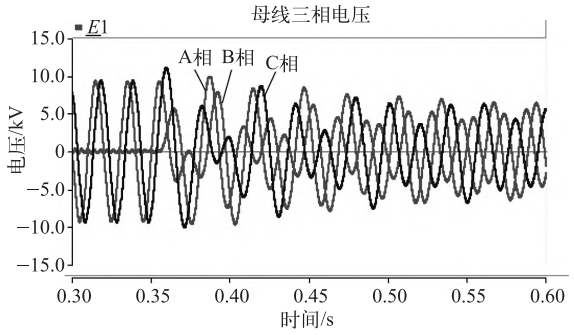

图 9　单相接地消失激发铁磁谐振

Fig. 9 Single-phase ground vanishing excited ferromagnetic resonance

按照文献[17]中的仿真方式，对系统发生的弧光接地消失引发铁磁谐振的现象进行仿真，弧光接地消失引发的谐振波形如图10所示，此时系统过电压水平达3.4（pu）。

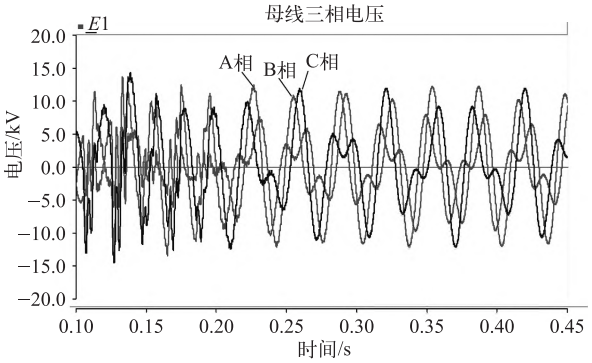

图 10　弧光接地消失引发铁磁谐振

Fig. 10 The loss of arc grounding causes ferromagnetic resonance

根据DL/T620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》中配电网设备绝缘配合的相关规定，此时过电压水平超过安全绝缘范围[18]，说明消谐装置运行时有被击穿的风险。

4 装置误动情况分析

考虑新型微机消谐装置发生故障未及时退出中性点处的非线性电阻导致消谐电阻被击穿时，仿真情况如图11所示。此时，三相母线失电压，系统停电。

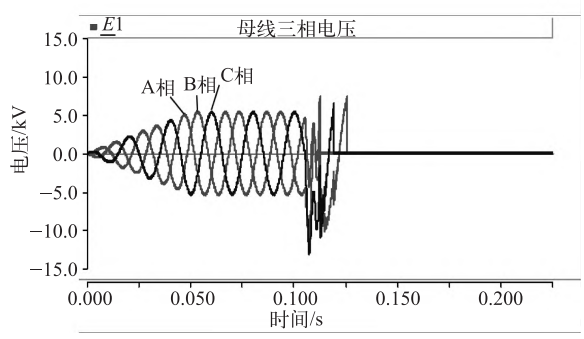

图 11 消谐电阻被击穿

Fig. 11 The tuning resistance is broken down

从仿真情况可以看出，采用三相联动共用一个高压限能器的消谐装置容易造成短路故障，存在先天不足，故宜引导厂家生产使用单相高压限能器的消谐装置，以避免运行过程中可能产生的故障干扰，提高系统的稳定运行能力。采用单相高压限能器后仿真结果如图12所示，三相短路变为单相短路后系统运行的可靠性增加。

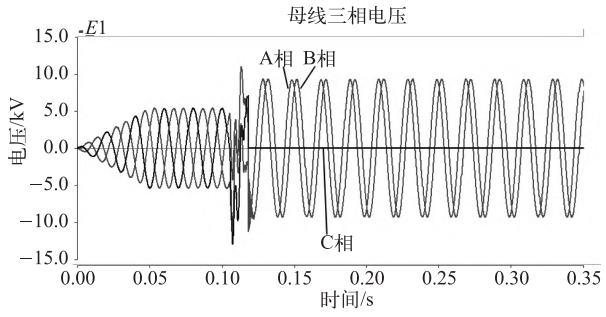

图 12 单相高压限能器的消谐电阻被击穿

Fig. 12 The suppression resistance of the single-phase high voltage energy limiter is broken down

消谐装置电压整定值是该装置的关键参数，若装置发生三相电压整定出错，将有可能导致无故障时消谐装置同时在A、B、C接入消弧电阻，此时发生三相接地短路、母线失电压，对于系统供电可靠性产生影响，如图13所示。0.05 s装置误投入后，三相电压降为0，发生三相短路接地现象。按照系统保护规定，母线电压整定值不能低于1.1倍的相电压，10/1.732 kV×1.1=6.3 kV，当母线电压整定为6.3 kV以上时，系统不会失电压。故新型消弧消谐装置电压整定应尽量整定在6.3 kV以上。

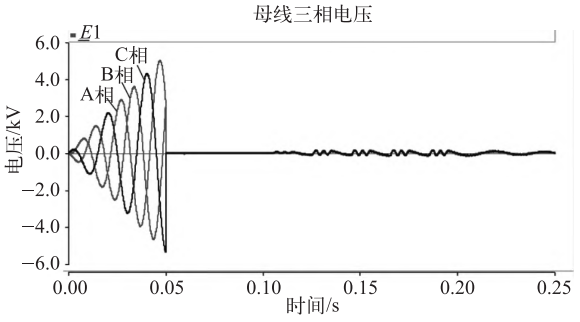

图 13 消谐电阻被击穿

Fig. 13 The tuning resistance is broken down

如果A相发生单相接地消失时激发铁磁谐振，消谐装置选错相别误投入B相，则会引起接地点和投入相别之间发生相间短路，此时A相和B相两相电压相等，三相电压失衡，电能质量降低，系统安全运行受到影响，如图14所示。此时系统电容电流达到15 A，如图15所示。系统有谐振风险，长时间工作在此电流下，熔断器会被熔断，与现场熔断器熔断情况相吻合，验证了两相短路将引起熔断器烧毁的事故诊断结果。

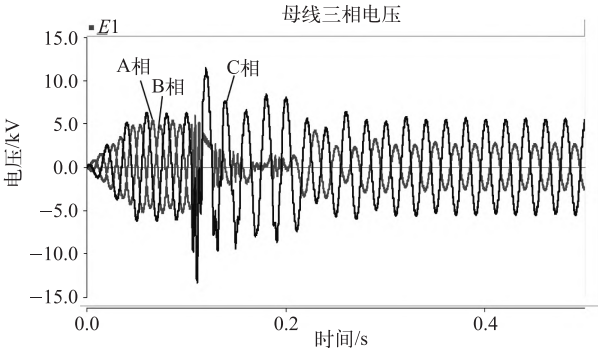

图 14 装置选错相别

Fig. 14 Device selection is wrong

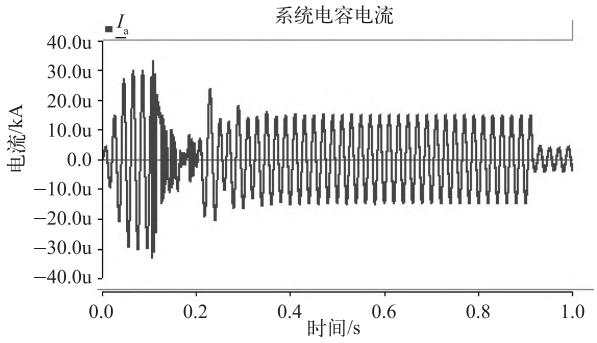

图 15　电容电流波形

Fig. 15 Capacitance current waveform

当同电压等级的母线上装有多台消谐装置时，若出线发生单相弧光接地故障，同电压等级的多台消弧装置同时动作，将故障相在母线处直接接地，形成多点接地，小电流选线装置无法判断故障线路。一旦超过规定时间，配电网将会强制停电，从而造成更大面积的停电。由于无法准确有效地判断故障，为防止更大的安全隐患，必须加大范围断电，不仅影响整个供电网络的正常运行，而且无法从源头上解决故障相接地的问题。

仿真采用单母分段母线上装有两台消谐装置的情况，系统母线电压如图16所示，0.2 s时系统A相发生单相接地故障，0.35 s时单相接地消失激发铁磁谐振，母线上两台消谐装置同时动作消谐，0.55 s时退出一台消谐装置，接地现象仍未消失，可知系统产生了接地点，母线电压如图16所示。

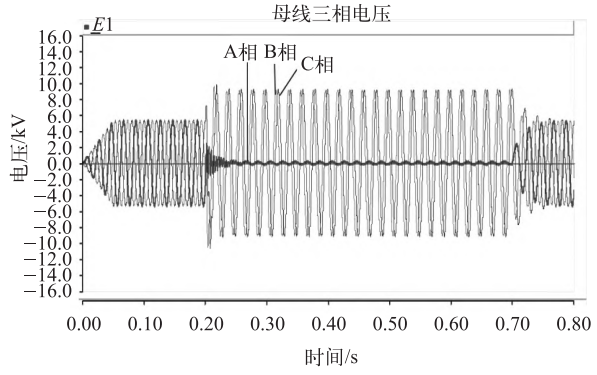

图 16　多台装置同时动作消谐

Fig. 16 Multiple devices operate simultaneously to eliminate harmony

综上所述，由于微机消谐装置具有复杂性，新型微机消谐装置在使用时应尽量避免多台装置同时使用、三相联动使用高压限能器的情况，同时在装置选线时，应尽可能准确进行选线，以避免装置运行过程中产生误动作的情况。

配电网的铁磁谐振主要与母线的电容电流和VT的参数，供水配电系统建设时，除了工程投产要求，还需要考虑未来满载的情况，应当采取优化的建设方案，避开谐振区域，尽量不增加任何形式的消谐装置。

5　结束语

通过对于该厂的消谐装置失效引发失电原因进行分析，可以得出以下结论：

1）该厂配电网在日常运行中谐振风险较低，但当系统运行方式变化或发生故障时，有产生谐振过电压的风险。

2）消弧消谐装置在日常运行及维护时，应注意以下情况：①消谐器动作后的残压不应超过被保护电压互感器的接地端子的绝缘水平；②微机型消谐器宜安装在总母线上，不应在多个终端母线上分别配置多台微机型消谐器；③厂家应生产使用单相高压限能器的消弧消谐装置以避免运行过程中可能产生的故障干扰；④消弧消谐装置上的真空断路器应及时进行维护检修，以避免运行中发生断路器触点咬死导致的事故。

3）针对已经安装消谐装置的水厂，建议对母线检修、进线停役和主变压器检修等薄弱供电方式进行重点排查，对于消谐装置可能因误动作导致供电故障的隐患应及时整改，对于存在谐振风险的情况，应当积极应对并尽量采用优选方案，降低供电系统故障风险。

参考文献

[1]　黄艳玲，司马文霞，杨鸣，等．实测铁磁谐振时间序列的非线性动力学分析[J]．电工技术学报，2016，31(5)：126-134．

[2]　韩国强，刘相龙，赵一龙，等．中性点不接地配电系统并联铁磁谐振状态频域解析方法[J]．电气

技术，2020，21(10)：88-92，102．
[3] 罗立波，朱咏明，杨振，等．基于ATP-EMTP的铁磁谐振过电压影响因素灵敏度仿真与分析[J]．西安科技大学学报，2020，40(6)：1088-1095．
[4] 何龙，马金财，杜龙基，等．小电流接地系统铁磁谐振过电压关键影响因素辨识[J]．电气工程学报，2020，15(2)：61-69．
[5] 唐伟超，刘红文，柴晨超，等．母线高压熔断器频繁熔断原因分析[J]．云南电力技术，2020，48(5)：6-11．
[6] 万寿雄．10 kV不接地系统两相故障导致电压互感器避雷器爆炸事故分析[J]．电气技术，2021，22(11)：56-62，79．
[7] 陈笑梅．线路压变爆炸导致35 kV变电站全站失电事故分析[J]．电气技术，2017(8)：125-128．
[8] 宋伟．中压配电网中电磁式互感器引起的铁磁谐振研究[D]．西安：西安石油大学，2021．
[9] 刘晓冉．电压互感器铁磁谐振抑制方法工程应用研究[D]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，2020．
[10] 何立柱，吴经锋，张璐，等．基于EMTP-ATP的变电站铁磁谐振计算与消谐措施研究[J]．高压电器，2018，54(5)：210-216．
[11] 张天民．铁路电力供电系统铁磁谐振过电压抑制技术研究[D]．北京：中国铁道科学研究院，2021．
[12] 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．
[13] 杜严行，叶树平，马银环，等．一种快速开关型消弧消谐装置在配电网中的应用[J]．农村电气化，2020(10)：64-67．
[14] 王斌先．6-35kV供电系统单相接地故障研究[J]．冶金动力，2020(5)：15-17．
[15] 王钢．一起单相接地引发系统多点接地故障的原因分析[J]．冶金动力，2020(11)：8-9，14．
[16] 黄永宁，艾绍贵．快速开关型消弧消谐技术研究及装置研制[J]．宁夏电力，2019(3)：71．
[17] 韩爱芝，曾定文，鲁铁成．配电网间歇性电弧接地过电压的仿真分析与对策[J]．高压电器，2010，46(1)：72-75．
[18] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合：DL/T620—1997 [S]．

作者简介

孙坚伟（1975—），女，硕士，高级工程师，研究方向为城市供水水质管理和控制技术研究。

（收稿日期：2023-08-09）