

主动式配电网铁磁谐振消谐方法研究

朱子民¹, 秦艳辉^{1,2}, 朱咏明³, 段青熙¹, 亢朋朋⁴, 刘勇⁵, 董雪涛¹, 樊国旗⁶

- (1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011;
2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;
3. 国网新疆电力有限公司昌吉供电公司, 新疆 昌吉 831100;
4. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011;
5. 安徽正广电电力技术有限公司, 安徽 合肥 230000;
6. 国网浙江省电力公司金华供电公司, 浙江 金华 321001)

摘要: 针对当前中性点不接地中低压配电网中频发的铁磁谐振这一典型故障, 首先, 研究分析了其谐振现象的产生机理与抑制方法, 并在此基础上提出了一种基于非故障相电压幅值实时跟踪、调节 PT 开口三角形阻尼电阻的主动式谐振消谐方法; 进而, 基于电力系统全数字实时仿真平台 ADPSS/ETSDAC, 结合某 35 kV 变电站实际参数, 搭建了铁磁谐振故障的仿真模型进行分析; 最后, 仿真验证了所提出的谐振消谐方法的可行性与正确性。

关键词: 中性点不接地配网; 铁磁谐振; 主动式消谐措施; ADPSS

中图分类号: TM864 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)03-0057-07

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.03.012

Research on Ferro – resonance Harmonic Elimination Method for Active Distribution Network

Zhu Zimin¹, Qin Yanhui^{1,2}, Zhu Yongming³, Duan Qingxi¹,
Kang Pengpeng⁴, Liu Yong⁵, Dong Xuetao¹, Fan Guoqi⁶

- (1. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, Xinjiang, China;
2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;
3. State Grid Xinjiang Changji Electric Power Supply Company, Changji 831100, Xinjiang, China;
4. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, Xinjiang, China;
5. Anhui Zhengguang Electric Power Technology Co., Ltd., Hefei 230000, Anhui, China;
6. State Grid Jinhua Electric Power Supply Company, Jinhua 321001, Zhejiang, China)

Abstract: The ferro – resonance is a typical fault occurring frequently in the medium and low voltage neutral ungrounded distribution network, its triggering mechanism and inhibition method are analyzed, and a novel active resonance inhibition method based on real – time sound phase voltage magnitude tracking and open – delta resistance regulation is proposed. Furthermore, based on a full digital real – time simulation platform of power system called ADPSS/ETSDAC, according to actual parameters of a 35 kV substation, a simulation model of ferro – resonance in a distribution network is established. Feasibility and validity of the proposed resonance inhibition method are verified by the simulation results.

Key words: neutral ungrounded distribution network; ferro – resonance; active resonance inhibition method; ADPSS

0 引言

作为系统保护与测量的关键设备, 中性点非直

基金项目: 国家电网公司科技项目(NY7-17-008)

接接地配电网中电磁式电压互感器(potential transform, PT)设备的非线性励磁电感在某些切换操作或接地故障消失后, 可能与线路对地电容形成谐振回路, 频繁地在系统中激发起可自维持的铁磁谐振过电压现象, 造成 PT 高压绕组过电流, 严重威胁电

网设备绝缘乃至系统的安全稳定运行。

针对该问题,国内外专家学者从不同角度展开探讨,并据此制定了多种消谐措施^[1-5]。文献[6]用谐波平衡法和描述函数法进行单相铁磁电路1/3次分频谐振计算和分析,讨论了存在1/3次分频谐振的条件及平衡状态的稳定性问题。文献[7]通过周期、准周期和混沌分析方法,给出了电力系统典型铁磁谐振电路非线性方程的解。文献[8]将铁磁谐振电路视为非线性动力学系统,提出一种分类分析方案,为铁磁谐振故障的辨识和治理提供了新的思路。消谐措施方面,主要可分为两类^[9-11]:1)藉由改变系统阻抗频率特性,以期达到远离铁磁谐振激发条件之目的,从而限制谐振发生的可能性^[12];2)消耗谐振的能量,通过阻尼抑制或消除谐振的发生^[13],较之改变系统参数配置,此类措施更便于工程实践应用。然而,以PT开口三角形处串接阻尼电阻为代表的常见消谐措施仍存在故障辨识困难、投入阻尼电阻阻值不当可能引发设备过载风险等诸多问题^[14],亟需一种能够可靠消弭铁磁谐振故障的新方法。

在针对铁磁谐振故障机理深入剖析的基础上,提出一种基于实时跟踪调节开口三角形处消谐电阻阻值的主动式谐振消弭方法,通过不同故障条件下消谐电阻的跟踪调节,以达到主动消弭铁磁谐振、避免PT过载之功效;进而,基于ADPSS/ETSDAC软件平台,搭建某35kV变电站铁磁谐振仿真模型,就铁磁谐振故障机理分析和主动式谐振消弭方法的正确性进行分析验证。

1 铁磁谐振故障机理

受PT铁芯磁滞特性影响,铁磁谐振故障具有显著的非线性特征。以单相接地故障下的基波铁磁谐振情况为例进行分析,以有效值形式绘制出了故障条件下PT与系统对地电容串联谐振电路中 L_m 和 C_0 的伏-安曲线 U_L 、 U_C ,如图1所示。

铁芯饱和前, U_L 与 i 呈现近乎线性关系;铁芯受外部因素影响进入饱和后,在 L_m 值快速下降的过程中,两条伏安特性曲线发生相交,并在交点 i_n (即谐振工作点)后交换上下位置;交点 i_n 以前回路电流呈感性,此时 $U_L = E + U_C$,与 E 同相;交点 i_n 后回路电流呈容性, $U_L = U_C - E$,且与 E 反相,呈“反倾”状态。

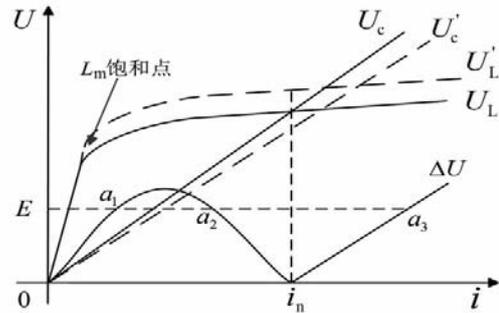


图1 单相接地故障下的基波铁磁谐振分析

$$\Delta U = |U_L - U_C| \quad (1)$$

则图1中满足 $E = \Delta U$ 的3个交点 a_1 、 a_2 、 a_3 中仅 a_1 和 a_3 是稳定的。 a_1 为非谐振工作点;位于工作点 a_3 时,铁芯严重饱和。此时PT绕组电流、压降幅值骤升,产生谐振过电压现象,且有:

$$\omega L_m > 1/\omega C_0 \quad (2)$$

满足上述条件时, U_L 和 U_C 可能在外部多种诱因激励下相交并产生谐振现象。谐振产生后,回路中 L_m 因非线性特性存在,可等效成为“谐波电源”,在与 C_0 间反复的交换能量过程中使得谐振过电压现象呈现自维持性;由于回路没有固定的自振频率,因而除基频谐振外,也可能产生3次、5次等高次谐波或1/2次、1/3次等分次谐波的铁磁谐振现象。

2 主动式铁磁谐振抑制方法

针对当前铁磁谐振“被动式保护”存在的问题,提出一种基于调节开口三角形处阻尼电阻的“主动式”铁磁谐振抑制方法,流程如图2所示。

1) 无故障条件下,于PT开口三角形处投入一小电阻,改变 X_{C_0}/X_{L_m} 比值,消弭单相对地短路故障等因素诱发PT铁磁谐振现象的可能性。

2) 单相对地短路等相间电压不平衡故障条件下,通过实时监测PT一次侧三相母线电压,跟踪调节投入的电阻大小,避免可能发生的PT绕组过载问题。

PT开口三角形处将随故障条件下系统三相电压的不平衡度加剧而感应出较高幅值的工频电压 U_Δ ,依据实际运行经验,中性点漂移电压值通常不超过15V^[15]。故此,以 $U_\Delta = 15V$ 作为消谐电阻 R_Δ 调节的动作判据,当 $U_\Delta \leq 15V$ 时,对应最大相的相电压为

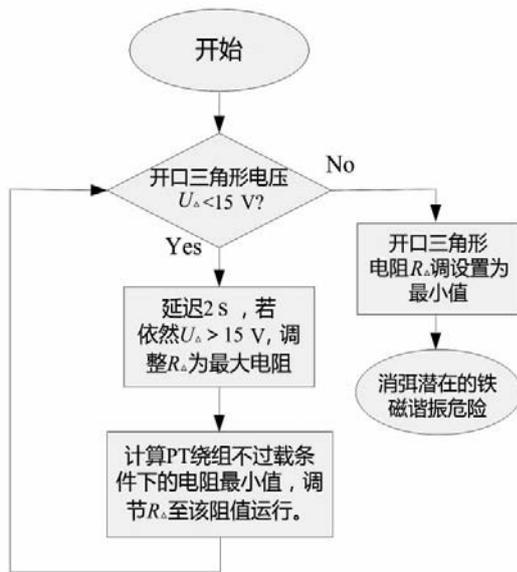


图2 主动式铁磁谐振抑制方法流程

$$U_{\max} = \frac{1}{3}(U_{\Delta} + 100) \quad (3)$$

则正常运行时投入的 R_{Δ} 最小值为

$$R_{\Delta} = \frac{(U_{\Delta} + 100)U_{\Delta}}{3KS_{\Delta}} \quad (4)$$

式中: K 为 PT 设计制造时的额定过电压倍数; S_{Δ} 为 PT 开口三角形单相绕组的额定功率。

针对不同故障条件影响,则以故障时正常相电压幅值作为考量标准进行分析,对应 R_{Δ} 阻值计算方法如下:

1) 单相接地条件下阻值调整

以 A 相发生瞬时性接地故障为例,当电压相角 $\theta \neq 60^\circ$ 时,系统电压相位如图 3 所示。 U_{am} 、 U_{bm} 、 U_{cm} 为开口三角三相的相电压; U_a 、 U_b 、 U_c 为故障发生时开口三角形处对地相电压;此时中性点对地电压 $U_0 = U_{\Delta}/3$; U_0 为零序电压。故障发生后, B 相的对地电压 U_b 最大,相应视在功率最大;若能保

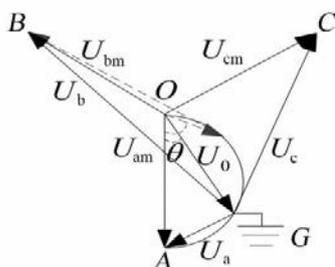


图3 线路 A 相瞬时性接地, $\theta \neq 60^\circ$

证此时 B 相绕组不过载,则 PT 不会发生过载问题。

在 $\triangle OAG$ 中:

$$\theta = \arccos\left(\frac{U_{\Delta}}{100}\right) \quad (5)$$

OB 和 OG 为已知,若 $\theta > 60^\circ$, 则 OB 与 OG 的夹角为 $120^\circ + \theta$; 若 $\theta < 60^\circ$, 则 B 与 OG 的夹角为 $240^\circ - \theta$ 。BG 的长度 U_b 均可通过式 (6) 计算得到。

$$U_b = \frac{1}{3} \sqrt{U_{\Delta}^2 + 10000 - 200U_{\Delta} \cos(\theta + 120^\circ)} \quad (6)$$

当 $\theta = 60^\circ$ 时,则电压相位如图 4 所示。由式 (3) 可得此时 $U_b = 50$ V, 开口三角处电流为

$$i_{\Delta} = U_{\Delta}/R_{\Delta} \quad (7)$$

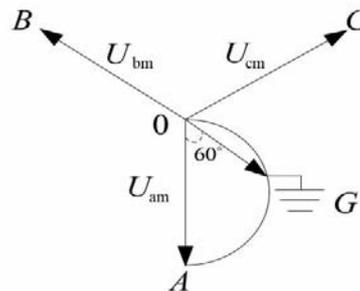


图4 线路 A 相瞬时性接地, $\theta = 60^\circ$

U_m 为三相 U_{Δ} 中最大相电压,则 A 相单相接地时,正常相 B 相电压最大值 $U_m = U_b$, 并有:

$$U_m \cdot I_{\Delta} = K \cdot S_{\Delta} \quad (8)$$

$$R_{\Delta} = \frac{U_m \cdot U_{\Delta}}{K \cdot S_{\Delta}} \quad (9)$$

设 U_{\max} 为 PT 二次电压最大相的相电压,则有

$$U_{\max} = \sqrt{3}U_m \quad (10)$$

将其带入式(9),可得:

$$R_{\Delta} = \frac{U_{\max} U_{\Delta}}{\sqrt{3}KS_{\Delta}} \quad (11)$$

进一步,有

$$R_{\Delta} = \frac{U_{\Delta}}{3KS_{\Delta}} \sqrt{U_{\Delta}^2 + 10000 - 200U_{\Delta} \cos(\theta + 120^\circ)} \quad (12)$$

可计算得到 $U_{\Delta} = 100$ V 时的电阻 R_{100} 为

$$R_{100} = \frac{10000}{\sqrt{3}KS_{\Delta}} \quad (13)$$

对于 B、C 相单相接地可以类推。

2) 相间短路情况下 R_{Δ} 的跟踪调整

考虑常见的相间短路均能够被继保装置于 700 ms 内快速切除,故此时投入任意阻值的 R_{Δ} 均不会引发 PT 过载问题。而考虑系统中可能发生的最为恶劣的故障,即两相异地且经由大电阻接地故障时,此类故障因短路电流较小,继保装置无法快速切除,将在

产生后持续很长一段时间,且其特点为两相电压降低、一相电压不变,此时则令 R_{Δ} 按照最大相电压幅值进行调节。

3 铁磁谐振仿真建模

3.1 仿真模型

为进一步验证所提主动式谐振抑制方法的正确性,采用某 35 kV 变电站的实际参数,基于 ADPSS/ETSDAC 软件平台搭建了含电磁式电压互感器的中性点不接地配电网铁磁谐振仿真模型,如图 5 所示。仿真模型中包含两段母线 I、II, PT 接入点位于 I 母处;变压器均采用 Y/Δ 连接方式,二者铭牌参数相同;母线、变压器及负荷间采用三相 π 型集中参数线路连接。变压器与线路具体参数如表 1、表 2 所示。

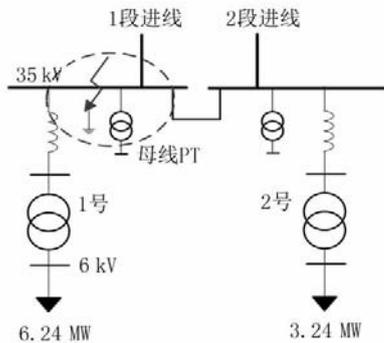


图 5 35 kV 配电网系统铁磁谐振仿真模型接线

模型中采用 JDZX2-35CQ 型电磁式电压互感器,由 3 台理想单相双绕组变压器连接而成,如图 6

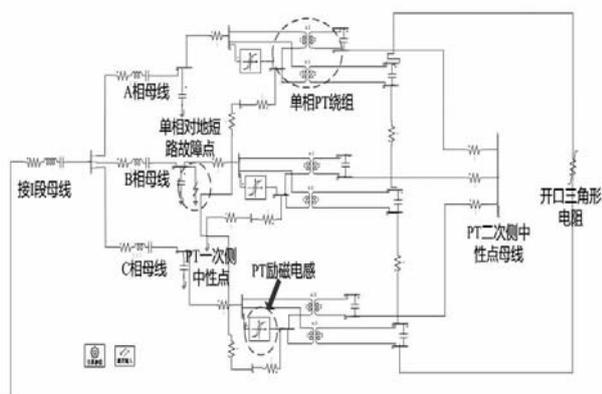


图 6 PT 绕组接线方式

所示。PT 各绕组非线性励磁电感由具有磁滞特性的变压器 L-96 型励磁支路模块模拟,绕组励磁电流-磁链特性如表 3 所示。

3.2 铁磁谐振故障的产生与抑制

针对系统中较为常见、危害严重的分频谐振和基频谐振现象进行仿真分析,在搭建的仿真模型基

表 1 仿真模型线路参数

正序电阻 $/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	正序电感 $/\text{m}(\text{H} \cdot \text{km}^{-1})$	1/2 正序电容 $/(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$
0.27	0.933 7	12.74×10^{-9}
零序电阻 $/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	零序电感 $/\text{m}(\text{H} \cdot \text{km}^{-1})$	1/2 零序电容 $/(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$
0.81	4.126 4	7.751×10^{-9}

表 2 仿真模型变压器参数

额定容量/MW	短路损耗/kW	空载损耗/kW
20	392.775	89.165
短路电压百分比/%		空载电流百分比/%
8		0.11

表 2 PT 绕组励磁电流-磁链特性

编号	励磁电流/mA	磁链/Wb
1	0.283	18.34
2	0.655	36.50
3	0.977	55.90
4	1.337	74.85
5	1.650	92.04
6	1.998	115.46
7	3.899	139.62
8	8.445	169.43
9	14.020	173.45

础上,设 PT 母线 B 相发生单相金属性接地故障,故障起始时间为 0.065 s,持续 0.263 s 后故障切除。通过调整线路参数,可获得相应谐振故障条件下母线电压、PT 绕组电流仿真波形如图 7 所示。

分析可知:1) 单相接地故障发生前,系统三相电压及 PT 绕组流过的励磁电流均呈现三相对称状态,母线电压经折算后为 0.985 9 pu 左右,励磁电流为 1.2×10^{-5} pu; 2) 故障发生与持续过程中,B 相电压、对应 PT 绕组励磁电流均降至 0 左右,正常相电压、对应 PT 绕组励磁电流升高 $\sqrt{3}$ 倍; 3) 故障成功切除后,线路与 PT 励磁电感间发生可自维持的铁磁谐振现象,分频谐振与基频谐振条件下三相母线电压均升高至 1.910 6 pu 左右,过电压倍数为 1.937 9。

此时流过 PT 绕组的电流大幅增加,且分频谐振过电流现象更为显著,可达额定值的 12.58 倍,危害远大于基频谐振的 3.3 倍过电流。高幅值的持续过电流易烧断 PT 的高压熔丝,或将使得 PT 绕组严重过载乃至发生爆炸,因此分频谐振危害性远大于

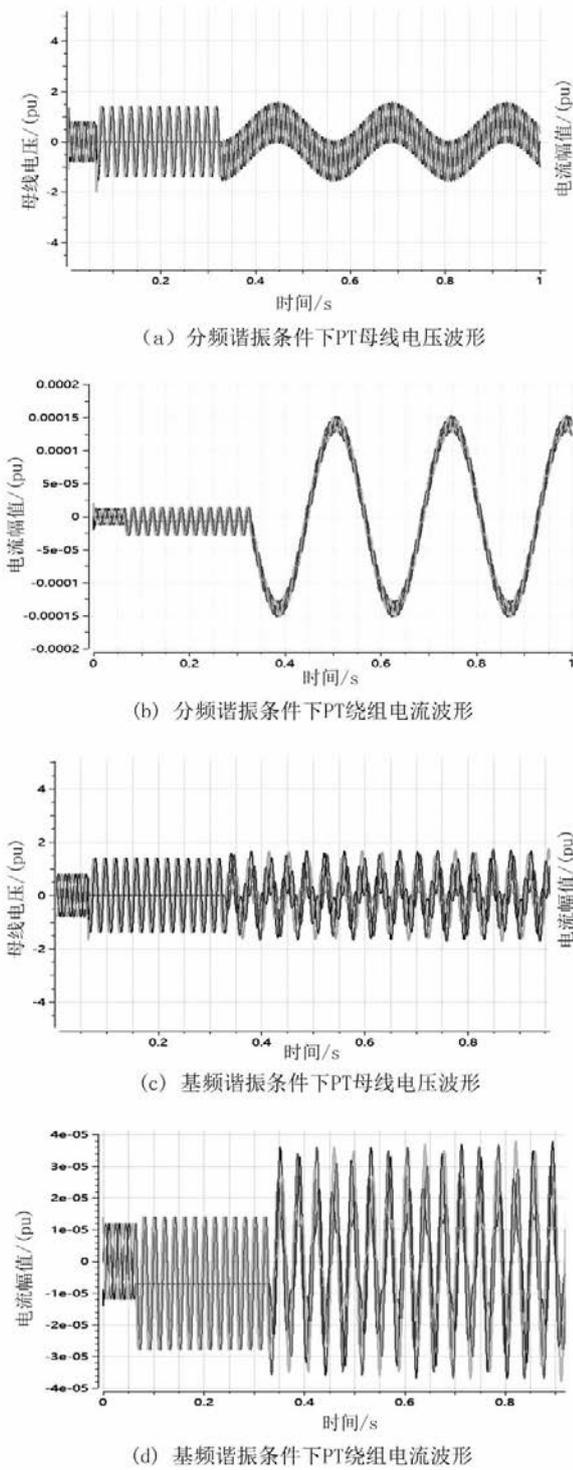


图7 35 kV 系统铁磁谐振仿真波形

其他类型的铁磁谐振故障。

基于以上分析结果,结合前述 PT 开口三角形串接小电阻的消谐方式,针对分频谐振条件下的故障抑制措施展开进一步的仿真分析,可获得谐振故障发生后 1.5 s 投入 3 Ω 固定阻值的消谐电阻时仿真波形,如图 8 所示。

可见,通过故障发生后开口三角形串接小电阻

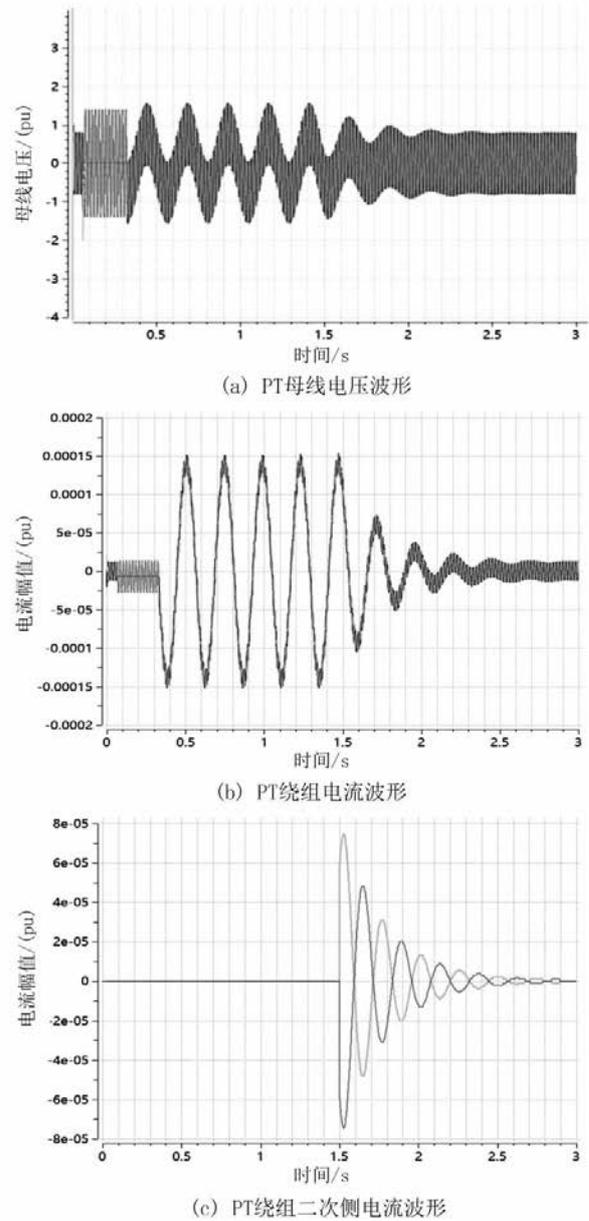
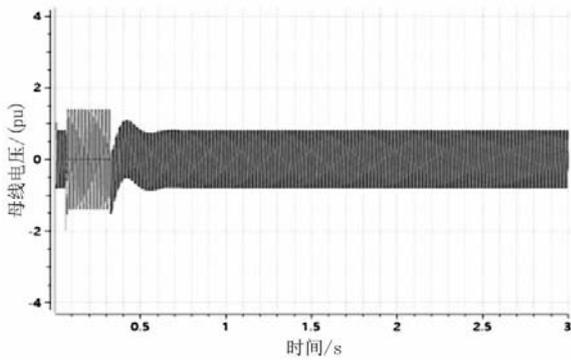


图8 分频谐振条件下的故障抑制仿真波形

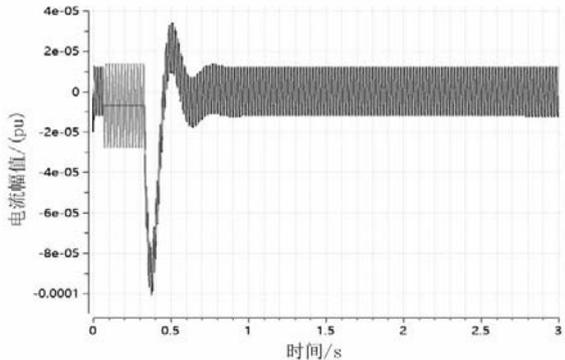
的方式,能够在 1.0 s 内快速释放谐振能量,对铁磁谐振过电压、过电流现象起到有效抑制作用;但与此同时,消谐电阻的投入将使得 PT 绕组二次侧电流骤升,若单相接地故障不能及时切除,投入的消谐电阻仍将引起 PT 设备的过载,且接地故障持续期间消谐电阻的反复投切可能引发新的谐振现象。

3.3 基于主动式消谐方法的谐振抑制

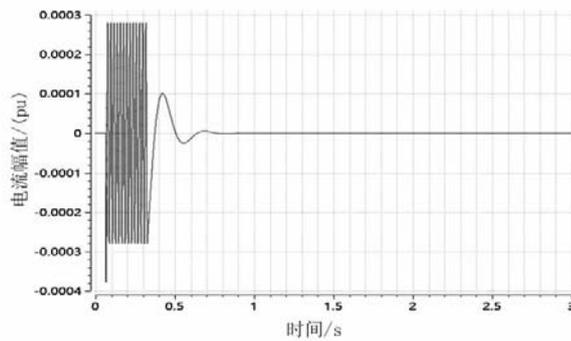
进而,采用所提主动式消谐方法,以单相可控电阻元件代替开口三角形处固定阻值的电阻元件,阻值依据式(13)进行调整,可仿真得到单相接地故障及时切除与单相金属性永久接地故障期间的系统仿真波形,分别如图 9、图 10 所示。



(a) PT母线电压波形



(b) PT绕组电流波形

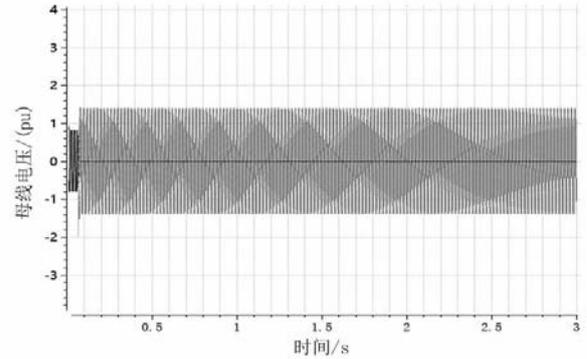


(c) PT绕组二次侧电流波形

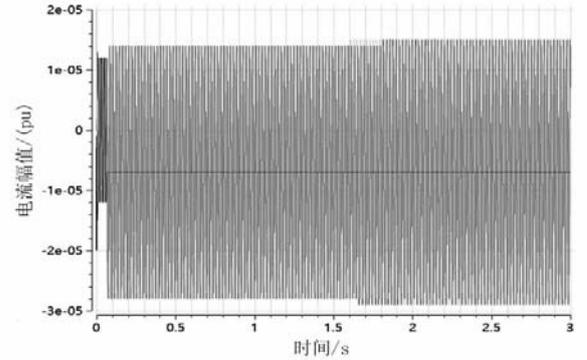
图9 单相瞬时性故障条件下的仿真波形

分析可知: 1) 单相故障能够及时切除时, 通过开口三角形处串接的小电阻快速泄放线路与PT绕组间的能量, 能够使得系统三相电压、PT绕组电流于0.5个周波内均恢复至正常状态, 消弭了系统可能产生的铁磁谐振现象; 2) 中性点不接地系统要求单相金属性接地故障持续期间仍可在2h内正常供电, 故障发生2s内开口三角形电阻尚未调整, PT二次侧电流增大至 9.3×10^{-5} pu; 此后随着阻尼电阻的跟踪调整, PT二次侧电流快速下降至 1.0×10^{-6} pu。

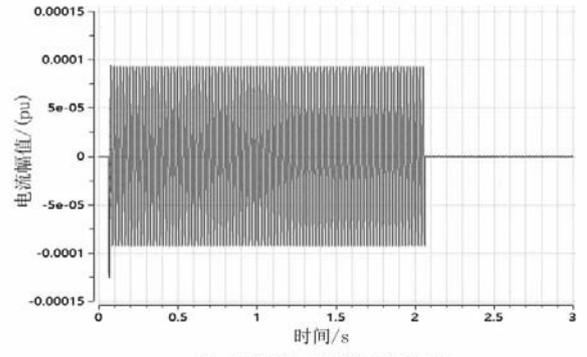
进一步, 对比图7、图8可知, 通过对PT开口三角形处阻尼电阻的跟踪调节, 有效避免了单相永久性金属接地故障持续期间PT绕组的过载现象, 同时确保了系统中铁磁谐振故障、谐振过电压现象不会发生, 消弭了铁磁谐振问题发生的风险。



(a) PT母线电压波形



(b) PT绕组电流波形



(c) PT绕组二次侧电流波形

图10 单相永久性接地故障条件下的仿真波形

4 结语

针对铁磁谐振这一配电网典型故障, 提出了一种基于实时跟踪调节开口三角形阻尼电阻的主动式谐振抑制方法, 并结合仿真分析、验证, 得到的主要结论如下:

1) 所提出的主动式消谐方法, 能够有效消弭因单相金属性接地故障引发的铁磁谐振现象, 且不存在因故障辨识困难等因素引起的消谐死区问题。

2) 单相永久性金属接地故障持续期间, 通过调节开口三角形阻尼电阻的阻值, 能够在确保不发生谐振的前提下将二次侧绕组流过的电流幅值限制在 1.0×10^{-6} pu左右, 确保了单相接地故障期间系统的安全稳定运行, 表明所提主动消谐方法是可行、可靠的。

参考文献

[1] 张志磊, 郭涛, 田石金, 等. 配电线路电容与PT电感阻抗比对铁磁谐振电压电流特性的影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2019, 287(1): 77-81.

[2] 曾祥君, 杨先贵, 王文, 等. 基于零序电压柔性控制的配电网铁磁谐振抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1666-1673.

[3] 杨鸣, 司马文霞, 段盼, 等. 铁磁谐振过电压柔性控制的试验研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 647-653.

[4] 雷娟, 郭洁, 高媛, 等. 铁磁谐振仿真模型的探讨[J]. 电瓷避雷器, 2007(4): 33-37.

[5] 余宇红. 铁磁谐振过电压的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

[6] 朱岸明, 王倩. 配网铁磁谐振过电压的非线性动力学分析及制措施的研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(3): 28-34.

[7] 由志勋, 刘楠. 水电站内部铁磁谐振及抑制措施仿真研究[J]. 高压电器, 2019(1): 128-134.

[8] 王鹏, 郭洁, 齐兴顺, 等. 35 kV 中性点经消弧线圈接地系统几种铁磁谐振消谐措施有效性分析[J]. 电瓷避雷器, 2010(6): 34-37.

[9] 石文江, 李春平, 王睿, 等. 铁磁谐振在调度端的典型特征[J]. 电力系统自动化, 2015(7): 194-197.

[10] Abbasi H R, Heydari H, Afsari S A. Elimination of Chaotic Ferroresonance in Power Transformer by ISFC[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2015, 68(12): 132-141.

[11] 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.

[12] 龚庆武, 张静, 雷加智, 等. 基于原子分解法的中性点不接地系统铁磁谐振检测[J]. 电工技术学报, 2018, 33(5): 1114-1124.

[13] 何智强, 李欣, 范敏, 等. 基于消谐器抑制铁磁谐振过电压研究分析[J]. 电瓷避雷器, 2017(5): 77-84.

[14] 张业. 电力系统铁磁谐振过电压研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.

[15] Yue Sh, Li P, Guo Jd, et al. A Statistical Information-based Clustering Approach in Distance Space[J]. Journal of Zhejiang University, Science, 2005, 6(1): 71-78.

作者简介:

朱子民(1991), 工程师, 主要从事电力系统运行与控制研究。
(收稿日期: 2020-03-09)

(上接第56页)

图像数据进行AI识别预处理, 筛选大类明显缺陷并将统计信息发送至后台数据处理中心, 同时将其他图像数据进行流式计算, 采用更精确的人工智能算法实现对细小缺陷的精准识别, 保证缺陷识别的实时性和可靠性。

4 结语

现阶段无人机巡检仍然主要依赖于搭载摄像机、红外测温挂件等对线路进行状态监测, 虽然智能化水平不足, 但仍然具有广阔的应用前景。随着无人机巢技术、图像智能识别技术、超短波通信技术、边缘计算等的快速发展, 将逐步实现输电线路的无人机全线自主巡检、图像的实时传输、缺陷的智能识别、缺陷的实时上报等全天候、全天时、全自动的线路运行维护, 进一步提高线路运维效率和质量, 增强线路智能化运行维护水平。

参考文献

[1] 万康. 无人机在山区高压输电线路隐患巡检中的应用[J]. 南方农机, 2019, 50(23): 269-270.

[2] 陈剑刚, 姚璞, 杨俊武, 等. 无人机在架空输电线路巡检中的应用研究[J]. 湖南电力, 2019, 39(5): 74-77.

[3] 罗星云. 无人机在输电线路中的应用[J]. 低碳世界, 2019, 9(9): 115-116.

[4] 刘军, 刘健辉. 无人机在输电线路巡检中应用的探索[J]. 中国新通信, 2019, 21(17): 109.

[5] 陈泌丞, 范菁. 无人机在输电线路巡检中应用的探索[J]. 电工技术, 2019(3): 80-81.

[6] 黄谨益. 电力输电线路巡检中无人机的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2019(1): 233.

[7] 罗昞昞, 米立, 王原. 无人机在输电线路巡检中的应用[J]. 通信电源技术, 2018, 35(12): 98-99.

[8] 王刚, 孟莹梅. 多旋翼无人机在输电线路巡线中的应用[J]. 山东工业技术, 2019(9): 179-180.

[9] 彭福先, 张玮, 祝晓军, 等. 基于激光点云精确定位的输电线路无人机自主巡检系统研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(7): 117-122.

[10] 胡智敏, 李凯, 汤国锋, 等. 一种输电线路无人机“巢-巢”巡检新模式[J]. 江西电力, 2018, 42(12): 13-15.

[11] 韦舒天, 李龙, 岳灵平, 等. 输电通道人机协同巡检方式的探索[J]. 浙江电力, 2016, 35(3): 10-13.

[12] 李建峰, 段宇涵, 王仓继, 等. 无人机在输电线路巡检中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(8): 62-65.

作者简介:

李倩竹(1989), 硕士研究生, 工程师, 现从事输电线路巡检技术管理工作, 主要研究方向为线路智能巡检工作。

(收稿日期: 2020-02-18)