

变电站铁磁谐振仿真分析及抑制措施研究

司马文霞¹, 郭 飞¹, 杨 庆¹, 刘 凡²

(1. 重庆大学 高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044;
2. 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 以某 110 kV 变电站为原型, 在考虑了母线零、正序参数和进出线路几何参数情况下, 利用 ATP-EMTP 电磁暂态仿真软件, 对该变电站 35 kV 侧由于出线单相接地引起的母线电压互感器的谐振情况及电压互感器一次侧中性点经非线性电阻接地, 电压互感器开口三角短时投入阻尼电阻等措施的消谐情况进行了仿真计算。对母线上装设中性点接地的三相电容器组, 采用电容式电压互感器等消谐方式的有效性进行了探讨。对谐振产生的原因和各种消谐措施的原理和消谐效果进行了分析比较。结合仿真结果和系统参数分析得出: 单相接地故障消失时刻对于能否激发系统谐振起着关键性作用; 电压互感器开口三角短时接入阻尼电阻和电压互感器一次侧中性点经非线性电阻接地 2 种措施消谐效果较为理想; H.A.Peterson 的试验结论不能作为判断系统是否产生谐振的确切参数标准。

关键词: 铁磁谐振; 消谐措施; 变电站模型

中图分类号: TM 86

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)06-0022-05

0 引言

中性点不接地系统中, 系统对地除了导线和设备的对地电容外, 只有母线上 $Y_0/Y/\Delta$ 接线的电压互感器(TV)的励磁电感, 在某些扰动激励下, 储存的电磁能量短时间内只能通过 TV 励磁电感的对地通道进行释放, 因而 TV 容易饱和, 从而引发铁磁谐振现象, 造成系统过电压和 TV 过电流, 严重影响系统的安全运行^[1-5]。

由于中性点不接地系统中铁磁谐振在零序回路中产生, 然而目前大多数针对配电网的谐振仿真模型中都忽略了变电站进出线和母线的相间电容及负载变压器等元件参数, 此类模型虽能正确反映谐振产生后变电站的谐振情况, 但很难准确反映某些扰动如单相接地等对变电站谐振的激发情况。在此利用某个曾多次发生 TV 谐振的变电站(LDB 变电站)的实际参数, 考虑了母线的零、正序参数和进出线路实际几何参数, 建立了变电站仿真模型, 以此模型为基础对变电站 35 kV 母线 TV 铁磁谐振过电压的激发原因和抑制措施展开了进一步研究。

1 仿真参数

该变电站由 110 kV、35 kV 和 10 kV 3 个电压等级组成, 其中 110 kV 和 35 kV 为 2 条电源进线, 10 kV 为配电网出线, 共有 13 条出线, 如图 1 所示。35 kV 母线 TV 型号为 JDXF-35 W, 表 1 为该 TV 伏安特性(TV 二次侧试验数据)。在综合比较了多

种 TV 励磁曲线的转换方法后^[6-10], 采用文献[8]中的逐点转换法予以实现, 由该 TV 的 B 相数据转换后的 $\Phi-i$ 特性曲线见图 2, 转换后 $\Phi-i$ 为一次侧数据。

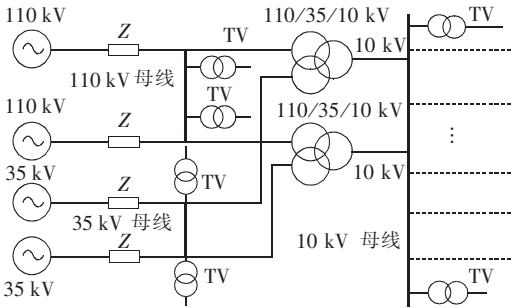


图 1 变电站接线图

Fig.1 Wiring diagram of a substation

表 1 电压互感器伏安特性

Tab.1 Volt-ampere characteristic

u/V	i_A/A	i_B/A	i_C/A
40	0.319	0.311	0.328
60	0.503	0.476	0.511
80	0.658	0.636	0.662
100	0.726	0.709	0.780
120	0.911	0.955	0.925
130	1.446	1.572	1.406

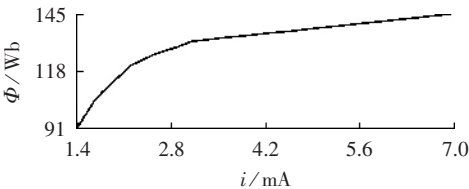


图 2 电压互感器 $\Phi-i$ 特性曲线

Fig.2 Magnetic characteristic curve of PT $\Phi-i$

2 仿真计算模型的建立

由于中性点不接地系统铁磁谐振在三相回路内同时产生,因此不能建立简单的单相等效仿真模型进行分析^[11],文中模型是基于大量现场和试验数据的基础上建立的三相、3 个电压等级变电站仿真模型。为了充分考虑母线的零、正序参数和进出线路的相间参数和分布特性,模型中架空线采用的是 ATP 中架空线模块(LCC)的 Jmarty 模型,母线采用的是 LINEZT_3 模块。远端电源采用理想电压源和电源内阻串联组成^[12]。

ATP-EMTP 的版本中没有提供带开口三角 TV 模型。根据饱和变压器模块原理(图 3),忽略绕组间互感,采用 Type 98 拟非线性电感元件和理想变压器建立了带开口三角的 TV 模型。图 4 为建立的单相 TV 模型图。

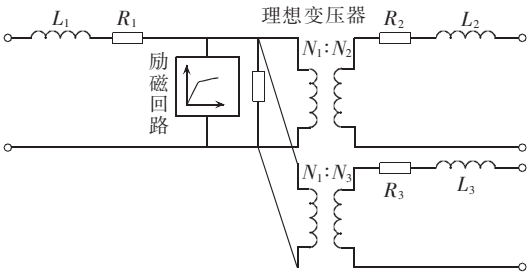


图 3 单相三绕组饱和变压器原理图
Fig.3 Circuit diagram of one-phase three-winding transformer

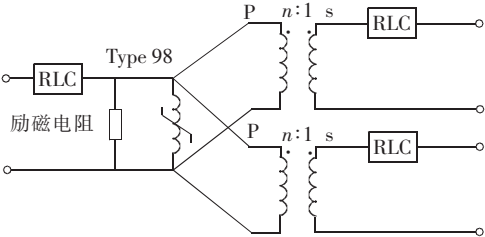


图 4 按变压器原理构建的电压互感器模型图
Fig.4 PT model based on transformer principle

为了最大限度地模拟变电站的实际运行工况,本模型还考虑了 10 kV 出线末端的负荷情况。假定 10 kV 每条出线所带负荷为 $2\text{ MV}\cdot\text{A}$,负荷等效模型采用电阻、电感串联后末端星形连接实现,功率因数设定为 0.8。

3 单相接地故障引起的 TV 谐振及分析

3.1 仿真计算

通过仿真发现,35 kV 进线段母线侧 A 相发生接地故障并消失可能会产生 TV 谐振过电压。图 5 为接地电阻 $5\ \Omega$,接地时间为系统进入稳态后 0.04 s,接地消失时间 0.08 s 时激发的 35 kV 母线谐振过电压波形。

在接地故障期间,系统三相电压中除接地相外,开始剧烈振荡,振荡过程中电压幅值最高相(C 相)

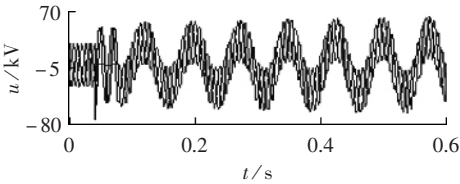


图 5 35 kV 谐振时母线三相电压波形
Fig.5 35 kV bus voltage waveform during ferroresonance

为 2.45 p.u.,经过剧烈的振荡后两相电压稳定在线电压附近。在接地故障消失瞬间,电压波形出现低频谐振,过电压幅值 2.5 p.u.。

若该接地故障在 0.095 s 时消失,除了在单相接地期间有过电压产生外,故障消失后电压只有轻微的波动,没有谐振的趋势。母线电压波形如图 6 所示。

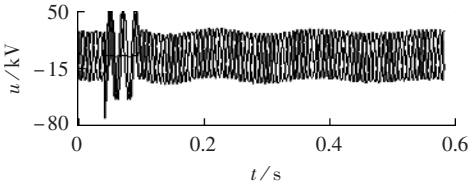


图 6 接地故障 0.095 s 消失时 35 kV 母线电压
Fig.6 35 kV bus voltage waveform when grounding fault disappears at 0.095 s

3.2 谐振分析

单相接地被认为是中性点绝缘系统中最容易激发谐振的故障类型,而对于其激发原因一直不明确,通过仿真该故障在不同时间消失情况(图 5 和图 6)得出:在接地期间故障点会流过电容电流,未接地相的电压升高至线电压,线路、母线对地电容充上与线电压相应的电荷,接地故障消失瞬间,线路对地电压突变回原来的相电压,需要将多余的电荷瞬时释放掉,而在中性点绝缘系统中只有通过 TV 的中性点才能构成释放回路,大量电荷短时间要通过 TV 中性点释放,引起了 TV 饱和,饱和后的 TV 励磁电感若和系统电容满足匹配关系就可能激发谐振。所以故障消失时刻正常相对地电压瞬时值大小决定了故障消失后 TV 是否饱和,能否进一步激发谐振。图 5 中 A 相接地故障消失时间为 0.08 s 时,B、C 两相的对地电压(B、C 相对 A 相的线电压)远大于正常情况下的系统相电压幅值,所以在故障消失瞬间 B、C 两相存储的电荷较多,故障消失后有大量电荷需要通过 TV 中性点释放,因而能激发谐振。图 6 中 A 相接地故障消失时间为 0.095 s 时,B、C 两相对地电压几乎没有太大变化,释放的电荷很少,所以没有激发谐振。在释放过程中,有部分电荷可能通过线路相间电容传递到接地相,在一定程度上减少接地故障消失时流过 TV 的涌流,为了保证仿真系统的准确度,应考虑线路的相间电容。

以上分析可得,在中性点不接地系统中当参数配合时,单相接地故障消失时刻对于是否激发 TV 谐振起着关键性的作用。此外,经计算得 35 kV 进

线侧系统单相容抗和 TV 并联后的励磁感抗比值约为 $k = X_{co}/X_m = 0.0068$, 小于 H.A.Peterson 的试验得出的分频区域下限 0.01, 按 H.A.Peterson 的试验结论不应产生谐振。但文中仿真结果和文献[13]都说明此时仍有可能产生谐振, 这表明 H.A.Peterson 的试验结论不能用来明确标定实际系统是否有谐振情况产生, 只能用以大致判断谐振类型的区域。

4 谐振的抑制

针对以上 35 kV 母线 TV 谐振情况, 仿真并分析了以下常见的 4 种消谐措施的消谐效果:

- a. TV 一次侧中性点经非线性电阻接地;
- b. TV 开口三角短时接入阻尼电阻;
- c. 系统中性点经消弧线圈接地;
- d. 系统中性点经大电阻接地。

4.1 TV 一次侧中性点经非线性电阻接地

在 TV 一次绕组中性点安装非线性电阻后, 电阻能够分担加在电压互感两端的电压, 能限制流过 TV 的零序电流, 抑制谐振产生。电阻 R 由 $U = k i^a$ 确定, 其中 k 和 a 的取值在文献[14]基础上, 通过仿真改进后取 $k = 106.69 \text{ kV/A}$, $a = 0.56$ 。

图 7 为采用上述非线性电阻后母线电压波形, 可见 TV 一次侧中性点经非线性电阻接地, 能很好地抑制谐振, 但针对不同系统的非线性电阻, 参数 k 、 a 的取值不尽相同。

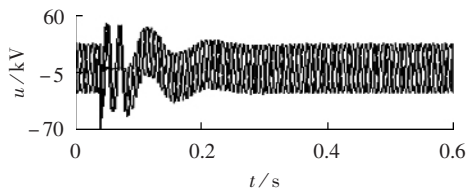


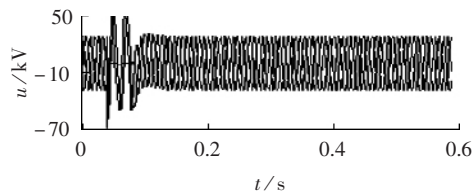
图 7 非线性电阻对谐振的抑制
Fig.7 Ferroresonance suppression
by nonlinear resistor

4.2 TV 开口三角瞬时投入阻尼电阻

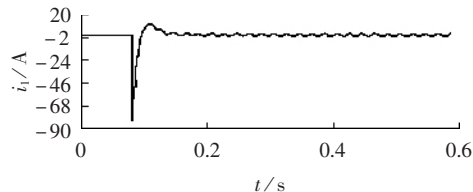
在三相电压互感器二次开口三角接入阻尼电阻 R 用于消耗电源供给谐振的能量, 能够抑制铁磁谐振过电压, 其电阻值越小, 效果越好, $R = 0$ 时相当于系统中性点直接接地。但由于在电网发生持续性单相接地故障时, 会在 TV 开口三角两端产生 100 V 左右的零序电压, 阻尼电阻不可长期接入开口三角回路。不少厂家对引入的阻尼电阻进行了改进, 利用晶闸管制造了自动改变电阻阻值的自动消谐装置, 在正常运行时, 晶闸管截止, 开口三角间电阻为数百兆欧姆的高阻状态, 一旦发生铁磁谐振, 装置使晶闸管触发导通, 在开口三角投入阻尼电阻, 谐振消除后切除阻尼电阻, 恢复系统正常接线^[13]。在仿真模型中采用时空开关瞬时投入阻尼电阻的方法来模拟以上消谐装置的动作情况。

通常, 用于消谐的开口三角的电阻 R 应满足 $R \leq 0.4 X'_m$, 其中 X'_m 为励磁电感感抗换算到 TV 开

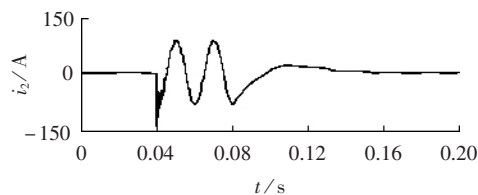
口三角绕组两端值。在满足上述条件下, 经过多次仿真比较, 确定 $R = 1 \Omega$ 时效果最佳。图 8 为针对上述谐振情况在接地故障消失瞬间 (0.08 s) 投入该阻尼电阻的消谐情况。



(a) 三相电压波形



(b) 阻尼电阻上流过的电流波形



(c) 阻尼电阻一直投入时流过阻尼电阻的电流

图 8 开口三角投入阻尼电阻的消谐情况

Fig.8 Ferroresonance suppression by damping resistor connecting to broken delta winding

从图 8(a)可以看出, 故障消失瞬间, 在 TV 的开口三角投入 1Ω 的阻尼电阻, 能很好地抑制谐振, 故障消失后, 母线电压很快就恢复到正常值, 流过开口三角电流只是在故障消失时刻出现一个较高的脉冲电流, 持续时间极短, 不到 2 个周期, 不会给 TV 造成较大威胁, 但仍对电阻的通流能力和热容量有一定要求。因此, 消谐器对消谐装置的控制回路要求非常高, 要求能够准确判断谐振产生时间, 投入阻尼电阻, 若判断失误, 过早将阻尼电阻投入, 此时就会在阻尼电阻上流过大电流。图 8(c)就是在系统发生单相接地故障时期 (0.04~0.08 s), 阻尼电阻上一投入时过电流波形。而中性点不接地系统允许在发生单相接地故障情况下持续运行 2 h, 一旦判断失误, 这样的过电流就很可能造成 TV 的烧毁或熔丝熔断。

4.3 系统中性点经消弧线圈接地

系统中性点经消弧线圈接地相当于在 TV 每一相励磁电感上并联一个电感, 由于消弧线圈的电感值比 TV 励磁电感小得多, 相当于将 TV 等效零序电感短路, 打破了参数匹配关系, 使谐振不易产生。但对于对地电容较小的系统, 由于电容电流较小所需采用消弧线圈电感值较大, 虽然能抑制谐振的产生, 但过大的电感会使得暂态振荡更加剧烈。模型中 35 kV 侧电容电流大约为 1.5 A, 图 9 为采用消弧线圈消谐时母线的电压波形。

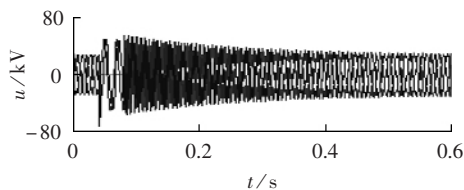


图9 消弧线圈消谐情况

Fig.9 Ferroresonance suppression
by arc-extinction coil

4.4 系统中性点(变压器 35 kV 中性点)经大电阻接地

系统中性点电阻对 TV 铁磁谐振的影响,在一定条件下,可以等效为 TV 开口三角形绕阻接电阻对 TV 谐振的影响^[14],接地电阻越小,消谐效果越明显。

系统中性点经大电阻接地能较有效地抑制谐振的持续,如图 10 所示,且抑制效果随电阻值的减小而增强,当阻值减小到 $R=50\text{ k}\Omega$ 时,完全抑制了谐振的产生。但过小的接地电阻改变了系统的接地方式,最佳方式是在谐振期间采用短时投入中性点大电阻或采用非线性电阻方式予以解决。

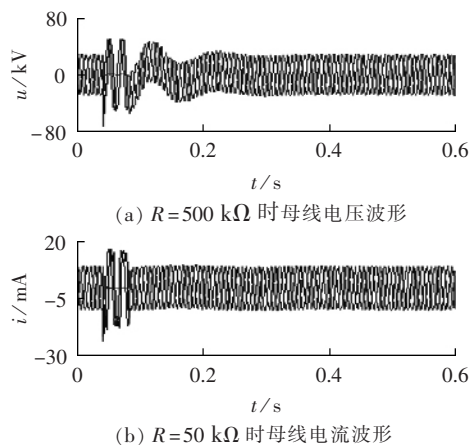


图 10 系统中性点经大电阻接地消谐情况

Fig.10 Ferroresonance suppression by grounding
neutral point via large resistance

4.5 其他消谐措施

4.5.1 母线上装设中性点接地的三相电容器组

H.A.Peterson 等人对谐振区域的研究指出,当系统参数 $X_{co}/X_m < 0.01$ 时,可防止谐振,但是从文献^[13]和本文的仿真结果说明满足上述条件后还是可能会产生谐振过电压。当 X_{co}/X_m 的值下降时,谐振的概率是可能下降,但同时也可能在单相接地故障消失时产生过大的低频饱和电流,产生严重的过电流。所以此种消谐方式很难确定准确的 X_{co}/X_m 的值来避免系统不发生谐振事故。

4.5.2 采用励磁特性好的 TV

采用励磁特性好的 TV 通常认为是解决谐振的一个基本措施,产生铁磁谐振的根本原因在于 TV 的励磁特性不好,在过电压作用下,电感值下降,零序电流急剧增加。除非采用 TV 励磁特性为线性的,否则在多台 TV 并联时励磁特性也会变差,也不能保证所有情况下都不产生谐振。

4.5.3 采用电容式 TV

电容式 TV 由电容分压器和一个较低电压等级的中间电磁式电压互感器 2 个部分组成,基本能防止谐振,但容易出现自谐振现象^[15],此外电容式 TV 和电磁式 TV 比较起来还有测量精度低、事故率低等问题。

5 结论

a. 利用 ATP-EMTP 仿真程序在考虑了变电站母线零、正序参数和进出线路实际几何参数情况下,建立了变电站的仿真计算模型,仿真了变电站 35 kV 母线 TV 在该侧进线段发生单相接地时激发的谐振情况,结果分析表明在中性点不接地系统中,在系统参数满足一定谐振匹配关系情况下,单相接地故障消失时刻对于能否激发系统谐振起着关键性作用。

b. 针对上述中性点不接地系统的 TV 谐振情况,对中性点不接地系统常用的消谐措施进行了仿真比较后得出:TV 开口三角短时接入阻尼电阻和 TV 一次侧中性点经非线性电阻接地 2 种措施效果最佳。

c. 仿真结果还表明:H.A.Peterson 的试验结论只能在一定程度上大致判断系统谐振的情况,并不能作为系统是否产生谐振的确切参数标准。

参考文献:

- [1] ARAUJO A E A, SOUDACK A C, MARTI J R. Ferroresonance in power proceedings - generation systems: chaotic behavior [J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 1993, 140(3): 237-240.
- [2] VUKELJA P L, NAUMOV R M, VUCINIC M M, et al. Experimental investigations of overvoltages in neutral isolated networks [J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 1993, 140(5): 343-350.
- [3] 杨振宇, 钱敏慧, 陈宏钟. 基于 ZnO 非线性电阻的新型消弧消谐策略研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(9): 16-19.
YANG Zhen-yu, QIAN Min-hui, CHEN Hong-zhong. Study on arc and resonance elimination strategy based on ZnO varistor [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(9): 16-19.
- [4] 张纬铨. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [5] 常立智. 对 35 kV 及以下电网中铁磁谐振及消谐措施的分析[J]. 供用电, 2005, 22(2): 33-35.
CHANG Li-zhi. Study on ferroresonance and its suppression measures in 35 kV and the lower distribution systems [J]. Distribution & Utilization, 2005, 22(2): 33-35.
- [6] 李云阁, 施围. 应用解析法分析中性点接地系统中工频铁磁谐振——非线性电感工频励磁特性的求取[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 94-98.
- [7] 张瑛, 张小青. 考虑铁磁元件励磁特性的电网暂态计算[J]. 电力学报, 2005, 20(3): 235-236.
ZHANG Ying, ZHANG Xiao-qing. Transient calculation of the power networks containing ferromagnetic elements [J]. Journal of

Electric Power, 2005, 20(3): 235-236.

- [8] 董海波, 史丽萍. 电磁式电压互感器和变压器励磁特性曲线转换方法的分析和应用[J]. 电工技术杂志, 1999(2): 36-38.
- DONG Hai-bo, SHI Li-ping. Analysis and application of the conversion method of the excitation character curve of the electric-magnetic type TV and the transformer[J]. Electro-technical Journal, 1999(2): 36-38.
- [9] 陈超英, 许砚田, 王荣琴, 等. 一种新型的磁化曲线仿真模型[J]. 天津大学学报, 1996, 29(6): 859-864.
- CHEN Chao-ying, XU Yan-tian, WANG Rong-qin, et al. A new model for simulation of magnetization curves[J]. Journal of Tianjin University, 1996, 29(6): 859-864.
- [10] 李谦, 钟定珠, 王晓瑜, 等. 变压器铁芯励磁特性拟合方法的探讨[J]. 高电压技术, 1997, 23(1): 19-21.
- LI Qian, ZHONG Ding-zhu, WANG Xiao-yu, et al. Research on fitting methods of core excitation characteristics of transformer[J]. High Voltage Engineering, 1997, 23(1): 19-21.
- [11] 王晓云, 李宝树, 庞承宗. 电力系统铁磁谐振研究现状分析[J]. 电力科学与工程, 2002(4): 49-51.
- WANG Xiao-yun, LI Bao-shu, PANG Cheng-zong. Research review on ferroresonance in power systems[J]. Electric Power Science and Engineering, 2004(4): 49-51.
- [12] 安昌萍. 真空断路器操作过电压研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
- AN Chang-ping. Study on vacuum circuit breaker switching overvoltage[D]. Chongqing: Chongqing University, 2002.
- [13] 周浩, 余宇红, 张利庭, 等. 10 kV 配电网铁磁谐振消谐措施的仿真比较研究[J]. 电网技术, 2005, 29(11): 24-34.
- ZHOU Hao, YU Yu-hong, ZHANG Li-ting, et al. Comparative study on ferroresonance elimination measures in 10 kV power distribution system by simulation method[J]. Power System Technology, 2005, 29(11): 24-34.
- [14] 许志龙, 黄建华, 王大忠. 10 kV 电网 TV 铁磁谐振过电压数字仿真及研究[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(2): 27-29.
- XU Zhi-long, HUANG Jian-hua, WANG Da-zhong. The

digital simulation and study of TV ferroresonance over voltage in 10 kV power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(2): 27-29.

- [15] 黄治国, 雷红才, 苗青, 等. 电容式电压互感器分频谐振的分析与对策[J]. 高电压技术, 2004, 30(7): 58-59.
- HUANG Zhi-guo, LEI Hong-cai, MIAO Qing, et al. Frequency dividing resonance and countermeasure of capacitor voltage transformer[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(7): 58-59.
- [16] 翁利民, 陈灵欣, 靳剑峰. 配电网电压互感器铁磁谐振的特点与抑制[J]. 继电器, 2004, 32(20): 40-42.
- WENG Li-min, CHEN Ling-xin, JIN Jian-feng. Characteristics and suppression of ferroresonance of electromagnetic PT in distribution network[J]. Relay, 2004, 32(20): 40-42.
- [17] 张向东, 张华龙, 李英. 电力系统铁磁谐振的危害、鉴别及其防治措施[J]. 电力学报, 2002, 17(4): 283-286.
- ZHANG Xiang-dong, ZHANG Hua-long, LI Ying. Danger distinction and prevention and cure treatment on ferroresonance in electricity system[J]. Journal of Electric Power, 2002, 17(4): 283-286.

(责任编辑: 李玲)

作者简介:

司马文霞(1965-), 女, 湖南汨罗人, 博士研究生导师, 博士, 从事高电压输变电技术、外绝缘技术及电力系统过电压研究(E-mail: cqsmwx@cqu.edu.cn);

郭飞(1981-), 男, 四川大邑人, 硕士研究生, 从事电力系统过电压研究(E-mail: shitou0121@sohu.com);

杨庆(1981-), 男, 四川绵阳人, 博士研究生, 从事高电压与绝缘技术研究(E-mail: cqyangqing@vip.sina.com);

刘凡(1978-), 男, 四川攀枝花人, 博士研究生, 研究方向为电力系统过电压的理论研究与计算分析(E-mail: liufan2003@yahoo.com.cn)。

Simulative analysis of substation ferroresonance and its suppression measures

SIMA Wen-xia¹, GUO Fei¹, YANG Qing¹, LIU Fan²

(1. Key Laboratory of High Voltage and Electrical New Technology of Ministry Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Sichuan Electric Power Experimental Research Institute, Chengdu 610072, China)

Abstract: With the zero and positive sequence parameters of its busbar and the geometric parameters of its inlet and outlet considered, the busbar PT ferroresonance caused by outlet single-phase grounding at 35 kV side is simulated using ATP-EMTP for a 110 kV substation system. Its suppression measures are also simulated; the neutral point of PT primary windings is earthed with nonlinear resistor, a damping resistor is temporarily connected to PT broken delta winding. The validity of some other ferroresonance suppression measures are researched, such as connecting three phase capacitor group with grounding neutral point to busbar, applying capacitive PT. Reasons of ferroresonance are analyzed and principles and effects of different suppression measures are compared. Simulation results show that, the time when the single-phase grounding fault disappears is the key factor to excite substation ferroresonance; effects of connecting nonlinear resistance to PT neural point and connecting damping resistance to PT broken delta winding are better than those of other measures; results of H. A. Peterson test can not be used as the proper criterion for ferroresonance.

The project is supported by the Natural Science Foundation Project of CQ CSTC(3597).

Key words: ferroresonance; suppression measures; substation model