

引用格式:魏菊芳,姚创,崔涵,等.配电网低频非线性振荡引发 PT 保险熔断的机理及抑制措施[J].电力科学与技术学报,2024,39(1):155-163.

Citation: WEI Jufang, YAO Chuang, CUI Han, et al. Mechanism and suppression of PT fuse caused by low-frequency nonlinear oscillation in distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 155-163.

配电网低频非线性振荡引发 PT 保险熔断的 机理及抑制措施

魏菊芳¹, 姚创¹, 崔涵², 于顺智³, 何潇², 陈小月², 郑智慧²

(1. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072;

3. 国网天津市电力公司城西供电分公司, 天津 300190)

摘要: 电缆的接入使配电网中性点不接地系统对地电容电流增大, 产生由单相接地故障引发的低频非线性振荡, 导致电磁式电压互感器 (potential transformer, PT) 保险熔断, 严重影响系统安全运行。首先, 分析了低频非线性振荡导致 PT 保险熔断的原理, 并基于 ATP-EMTP 平台对 10 kV 中性点不接地系统进行了仿真计算, 计算表明, 低频非线性振荡最大过电压小于 2.0 p.u., 故障 0.1 s 后电流接近熔断器熔断电流, 系统对地电容增大、零序电阻减小, 保险熔断风险增大; 然后, 仿真验证了 4PT 接线和 PT 高压侧中性点串接压敏电阻抑制措施的有效性, 并计算了零序电压测量误差; 最后, 建立 10 kV 系统的低频非线性振荡试验平台, 验证仿真的有效性, 对提高配电网 PT 运行安全性具有参考价值。

关键词: 电磁式电压互感器; 低频非线性振荡; 保险熔断; 抑制措施

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.01.015 中图分类号: TM773 文章编号: 1673-9140(2024)01-0155-09

Mechanism and suppression of PT fuse caused by low-frequency nonlinear oscillation in distribution network

WEI Jufang¹, YAO Chuang¹, CUI Han², YU Shunzhi³,
HE Xiao², CHEN Xiaoyue², ZHENG Zhihui²

(1. State Grid Tianjin Electric Power Research Institute, Tianjin 300384, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. State Grid Tianjin Chengxi Electric Power Supply Company, Tianjin 300190, China)

Abstract: The capacitance current to ground in a non-earthing system is increased due to cables, which results in the low-frequency nonlinear oscillation caused by the single-phase earthing fault and hence leads to the fuse of potential transformer (PT), seriously affect the safe operation. The principle of PT fuse caused by low-frequency nonlinear oscillation is analyzed, and a 10 kV neutral point ungrounded system is simulated with ATP-EMTP software. Calculations show that the maximum overvoltage of low-frequency nonlinear oscillation is less than 2.0 p.u.; after 0.1 s of fault occur, the capacitance relative to the earth increases, the zero-sequence resistance decreases, and the fuse risk increases. Simulation results show the effectiveness of suppression measures for PT with four wires and the neutral point at its high voltage side in series with a varistor. Measurement errors of the zero-sequence voltage are also calculated. Finally, the platform of a 10 kV system for low-frequency nonlinear oscillation tests is built to verify the validity. It is valuable to improve the safety of PT operation in distribution network.

收稿日期: 2022-06-06; 修回日期: 2023-05-18

基金项目: 国网天津市电力公司科技项目 (KJ21-1-10)

通信作者: 陈小月 (1987—), 女, 副研究员, 主要从事电力系统电磁暂态仿真及过电压防护技术、气体放电及放电等离子体研究; E-mail: chenxiaoyue@whu.edu.cn

Key words: electromagnetic voltage transformer; low-frequency nonlinear oscillation; insurance fuse; suppression measures

近年来,配电网中常见的10 kV中性点不接地系统电磁式电压互感器(potential transformer, PT)保险熔断事故屡见不鲜^[1-5]。据已有事故报告,10 kV系统发生接地故障的比例占总故障的63%,频繁的接地故障诱发了系统过电压与过电流,造成PT保险熔断,严重时可能造成互感器绝缘闪络而爆炸^[6-8]。

根据学者研究,系统遭受扰动后,由于PT励磁电感的饱和特性,在励磁电抗与系统对地容抗发生参数匹配时会发生铁磁谐振^[9-13],文献[14]通过模拟试验得到了系统参数的谐振区域,当系统对地电容增大至超出谐振范围时,可避免铁磁谐振。但随着配电网中电缆的广泛应用,系统对地电容显著增大,当发生单相接地故障消失时,仍产生了较大的过电流,使得PT保险频繁熔断。相关研究表明,此时系统发生了低频振荡,且振荡逐渐衰减^[15-17],该暂态过程对系统安全产生极大威胁。常见的针对铁磁谐振的抑制措施有4PT接线法、PT高压侧中性点串接压敏电阻以及PT开口三角短时接入电阻的方法,对抑制低频非线性振荡的有效性还需进一步分析。

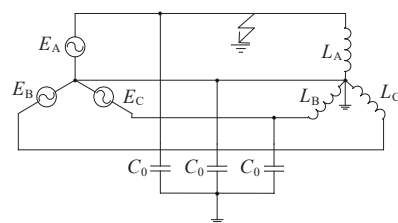
因此,本文从配电网低频非线性振荡的原理出发,基于ATP-EMTP仿真平台对10 kV系统单相接地故障消失后的暂态过程进行仿真,分析PT保险熔断的原因及影响因素,并提出振荡的抑制措施,最后,通过试验验证了仿真的有效性。

1 PT保险熔断机理分析与常见抑制措施

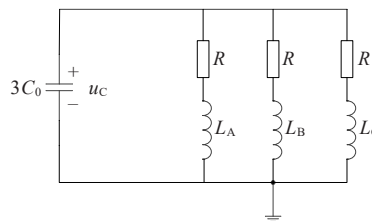
1.1 低频非线性振荡原理

系统对地电容电流增大,使得系统对地电容与PT励磁电感的参数匹配条件超出文献[14]通过试验得到的谐振区域,系统不易发生铁磁谐振,但实际运行经验表明,该情况下系统发生接地故障后,PT保险仍有熔断现象发生。经研究可知,中性点不接地系统发生单相接地故障消失以后,系统对地电容 C_0 积累的电荷只能由一次侧为Y₀接线的PT释放,该冲击电流使得PT铁芯迅速饱和,系统电压表现出低频的非线性振荡,产生较大的过电流,最终导致PT保险熔断甚至爆炸^[18]。

振荡原理如图1所示,图1(a)为单相接地故障过程的等效回路,其中 E_A 、 E_B 、 E_C 为三相电源电势, L_A 、 L_B 、 L_C 为PT三相励磁电感, C_0 为系统对地电容。系统正常运行工况下,三相对称,线路相对地电容 C_0 上电荷之和等于零;当线路发生单相接地时(以A相为例),非故障相(B、C相)电压升至线电压,两相对地电容充电。图1(b)为单相接地故障消失瞬间的零序等效回路, R 为PT直流电阻与零序电阻的等效电阻, u_C 为电容两端电压,此时三相对地电容上的电荷之和不为零,电荷倾向于流入故障相电容,流出非故障相电容,在该过程中多余的电荷通过PT高压侧中性点构成回路进行流通,直至达到系统稳态。



(a) 三相等值电路



(b) 零序等值电路

图1 低频非线性振荡等值电路

Figure 1 Equivalent circuit for low-frequency nonlinear oscillation

单相接地故障消失后,图1(b)中的零序等值回路接通,电流产生自由振荡,根据基尔霍夫定律,可以得出:

$$3C_0 \frac{L}{3} \frac{d^2 u_C}{dt^2} + 3C_0 \frac{R}{3} \frac{du_C}{dt} + u_C = 0 \quad (1)$$

$$i = -\frac{1}{3} \times 3C_0 \frac{du_C}{dt} \quad (2)$$

式中, i 为流经PT每相的电流。

根据式(1)、(2),流经PT高压绕组的低频非线性振荡电流为

$$i = -e^{-\delta t} \left[\frac{u_c}{\omega_1 L} \sin(\omega_1 t) + I \left(\cos(\omega_1 t) - \frac{\delta}{\omega} \sin(\omega_1 t) \right) \right] \quad (3)$$

式中,

$$\begin{cases} \delta = R/2L \\ \omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \\ \omega_0 = 1/\sqrt{LC_0} \end{cases} \quad (4)$$

分析式(3)、(4)可知,系统对地电容、零序电阻以及故障发生与消失时刻会对电流的振荡过程产生影响。对 10 kV 不接地系统常用 PT,其电阻通常为 1 800 Ω,正常运行情况下的励磁电感值为 3 500 H。据系统实际情况,当系统对地电容电流为 1~100 A 时,对应的单相对地电容为 0.20~18.4 μF,根据计算,此时系统的非线性振荡频率在 10 Hz 以下,呈现超低频特性。暂态过程中,电荷重新分配直至系统处于正常运行状态,该低频振荡具有衰减特性,衰减常数可以计算为

$$\tau = 1/\delta = 2L/R = 3.8 \text{ s}$$

在振荡过程中,由于电流衰减,铁心的饱和程度逐渐降低,励磁电感 L 增大,导致 ω_1 减小,电流衰减时的频率呈现减小的特征。

式(3)、(4)中的电感 L 为非线性元件,由于其具有非线性特征,电流的解析值难以求出,可以通过仿真的方法对电流变化特征进行分析。采用峰值磁链—电流曲线表征 PT 励磁电感非线性,典型数据如图 2 所示。

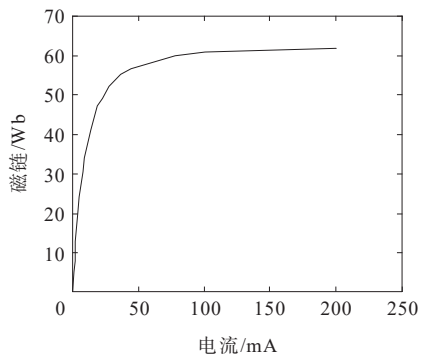


图 2 非线性电感磁链—电流数据

Figure 2 Flux-current data of nonlinear inductor

1.2 PT 保险熔断特性

型号为 XRNP1-12-XA 的熔断器的安秒特性如图 3 所示。10 kV 系统的电压互感器一次侧常用熔断器的额定电流为 0.5 A,可以得出,在 0.1 s 内流过熔断器的电流有效值达到 4.5 A 时,熔断器会熔断。

因此需将低频非线性振荡过程中的电流有效值控制在安全范围内。

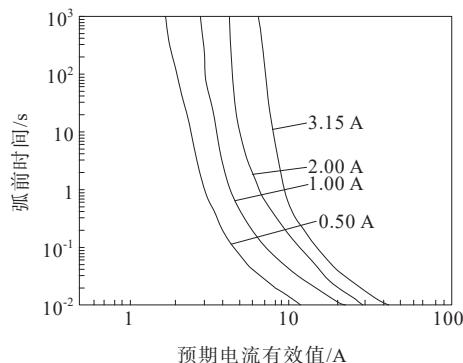


图 3 XRNP1-12-XA 型熔断器安秒特性

Figure 3 Ampere-second characteristics of XRNP1-12-XA fuse

1.3 抑制措施原理

根据参考文献和现场应用经验,中性点不接地系统 PT 谐振过电压抑制措施主要包括改变系统参数和增加系统阻尼 2 个方面。在改变系统参数方面主要采用 4PT 接线法,在增加系统阻尼方面,包括在 PT 一次中性点接入压敏电阻,PT 的开口三角绕组短时接入阻尼电阻。

4PT 接线法的着眼点是在 PT 高压侧中性点加入一个零序 PT 以承受故障相电压,从而抑制铁磁谐振^[19-20]。最初常用的接线方式为开口三角绕组短路,可以有效抑制低频振荡,但短路绕组中会有较大环流,易造成三角绕组烧坏。针对上述缺点,对 4PT 接线方式进行改进,将开口三角与零序 PT 的辅助绕组串联,使得开口三角开路,避免绕组过热损坏。

为抑制振荡电流,有效的解决方法是在零序等值回路中串接阻尼电阻,可以在 PT 高压侧中性点接入非线性压敏电阻^[21-22],其本质为一非线性电阻,正常情况下消谐器中性点电压很低,消谐器阻值较大,可以抑制谐振的产生,发生谐振时,消谐器阻值迅速减小,消耗谐振能量。

PT 的开口三角绕组短时接入阻尼电阻也就是二次消谐,常用原理是检测到系统零序电压超过整定值时,短时内将开口三角经一小电阻短接,谐振能量通过电阻释放。

2 10 kV 系统低频非线性振荡仿真

2.1 10 kV 系统仿真模型建立

建立基于 ATP-EMTP 的仿真模型,对 10 kV

配电网不接地系统低频非线性振荡过程进行仿真分析^[23-24]。考虑实际系统情况,建立双母线系统模型如图4所示。母联开关断开,模拟常见的配网母线分列运行。PT模块采用电阻与非线性电感串联进行等效。

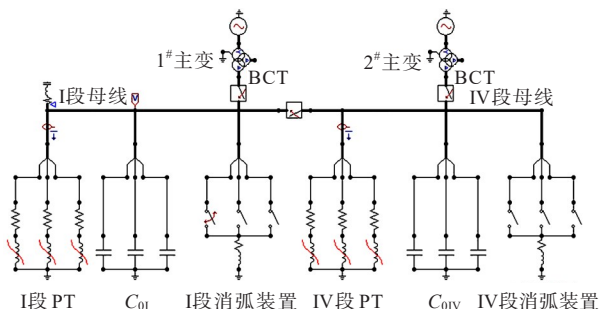
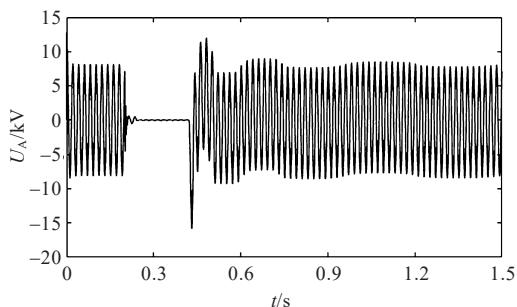


图4 双母线配网模型

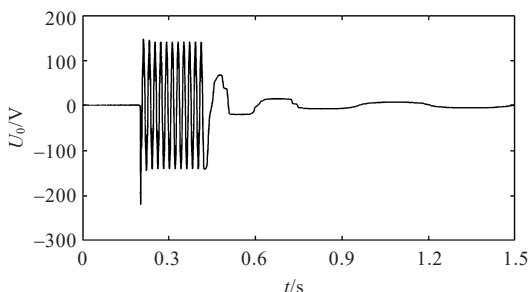
Figure 4 Model of distribution network with double buses

2.2 仿真结果与分析

实际系统出线较多,对地电容电流为23 A,对应系统单相对地电容为4 μF ,此时, X_{C0}/X_m 为0.000 6,远小于0.01,不在铁磁谐振范围内,但有可能发生低频非线性振荡。设置系统在0.2 s时发生A相单相接地故障,0.4 s时单相接地故障消失,得到系统电压波形如图5所示。



(a) 系统A相电压



(b) 系统零序电压

图5 接地故障消失后系统电压波形

Figure 5 Voltage waveforms after the grounding fault disappears

接地故障消失后,没有激发出稳定的铁磁谐振,而是产生了低频振荡,且在0.5 s内恢复至正常状态,系统过电压倍数为1.9 p.u.,小于2.0 p.u.,不危及绝缘。

然而,接地故障消失瞬间,A相电流幅值非常大,峰值达到8.85 A,且在0.1 s内多次出现较大的尖峰,如图6所示。在较大电流的热量积累下,PT保险的熔断器很可能过热熔断,计算接地消失后0.1 s内A相电流的有效值为2.73 A,熔断器有熔断风险。在实际情况下,熔断器安秒特性具有分散性,随电流热量积累,保险很可能在短时间内熔断,从而使得PT退出运行,系统安全难以得到保证。

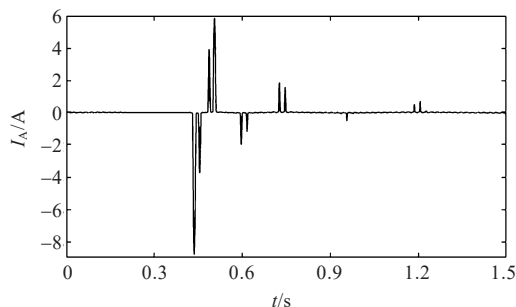


图6 PT高压侧A相电流波形

Figure 6 Current waveform of phase A at PT high voltage side

3 PT 保险熔断影响因素分析

3.1 系统对地电容

系统对地电容的变化影响系统电荷量,根据零序等值回路,PT高压侧电流也会随之改变。考虑系统出线增多,对地电容值增大,设置对地电容为4~24 μF ,仿真得到接地故障消失后系统过电压倍数及PT高压侧0.1 s内电流有效值如表1所示。

表1 不同电容下系统过电压倍数与PT高压侧电流有效值

Table 1 Overvoltage multiple of system and effective currents at PT high voltage side under different capacitance

电容/ μF	过电压倍数/p.u.	0.1 s内电流有效值/A
4	1.9	2.73
8	1.9	3.29
12	1.9	3.96
16	1.9	4.47
20	1.9	4.91
24	1.9	5.28

根据表 1 可得,系统对地电容增大,过电压倍数稳定在 1.9 p.u.;PT 高压侧电流有效值逐渐增大,达到 4.91 A 和 5.28 A,超过熔断器的熔断电流。对地电容增大,熔断器会在更短时间内过热熔断,甚至造成 PT 爆炸,影响运行可靠性。

3.2 零序电阻

系统单相接地故障消失以后,积累的电荷通过零序电路释放,产生低频非线性振荡,因此零序电阻对 PT 高压侧电流有很大影响。PT 高压侧直流电阻是零序电阻的主要组成部分,因此 PT 一次侧电阻改变为 500~5 000 Ω,设置系统单相对地电容为 4 μF,仿真得到接地故障消失后系统过电压倍数及 PT 高压侧 0.1 s 内电流有效值如表 2 所示。可得,零序电阻增大,过电压倍数保持稳定,PT 高压侧电流有效值显著减小。因此,适当提高 PT 的直流电阻可以有效抑制接地故障消失后的暂态过电流。

表 2 不同零序电阻下系统过电压倍数与 PT 高压侧电流有效值

Table 2 Overvoltage multiple of system and effective currents at PT high voltage side under different zero-sequence resistance

零序电阻/Ω	过电压倍数/p.u.	0.1 s 内电流有效值/A
500	1.90	2.86
1 000	1.90	2.69
2 000	1.90	1.71
3 000	1.90	1.21
5 000	1.90	0.85

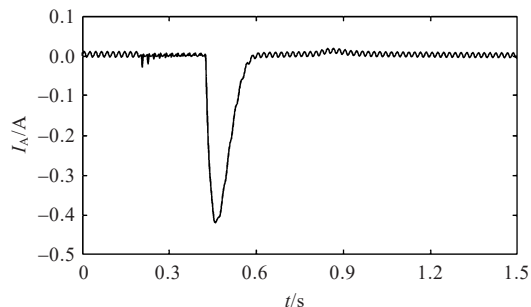
3.3 故障发生与消失时刻

故障发生时接地开关的合闸角和故障消失时刻的分闸角的变化会带来系统电荷存储的变化,从而影响低频非线性振荡的过程。在系统单相对地电容为 4 μF 时,分别在母线 A 相电压相角为 0°~315°(间隔 45°取值)的时刻单相接地,随后在同样的电压相角取值时刻切除故障。根据仿真结果可以得出,故障发生与消失时刻不同对故障相的振荡电流值有一定影响,接地开关在相角 90°时合闸,在 [0°, 180°) 时分闸,PT 高压侧电流幅值最大,达到了 5.56 A;接地开关在相角 90°时合闸,在 [180°, 360°) 时分闸,PT 高压侧电流幅值相对较小,最小为 3.19 A。因此,改变故障发生与消失时刻并不能有效减小振荡电流,熔断器仍有可能损坏。

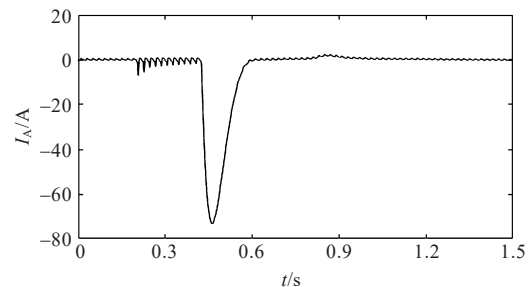
4 抑制措施分析

4.1 4PT 接线

采用开口三角绕组短路的 4PT 接线法,PT 高压侧故障相电流如图 7(a) 所示,故障消失后电流峰值仅为 0.4 A,且在 0.15 s 内迅速恢复至正常值,但短路绕组中会有较大环流,易造成三角绕组烧坏,如图 7(b) 所示。采用开口三角开路的 4PT 接线法,PT 高压侧故障相电流如图 8 所示,故障消失后电流峰值仅为 0.25 A,且在 0.3 s 内迅速恢复至正常值。改进后的 4PT 方法可以有效解决低频非线性振荡造成的 PT 保险熔断问题,保证系统安全运行。



(a) PT 高压侧故障相电流



(b) 三角绕组环流

图 7 开口三角绕组短接时电流波形

Figure 7 Current waveforms of open-delta short-circuit winding

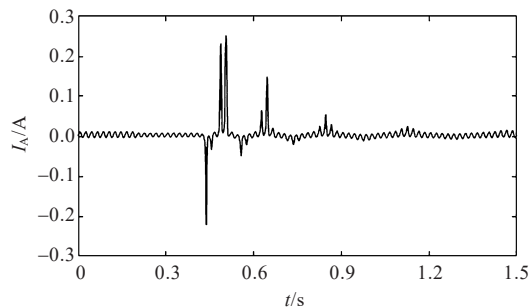


图 8 开口三角绕组开路时 PT 高压侧故障相电流

Figure 8 Fault-phase current waveform of open-delta open-circuit winding at PT high voltage side

4.2 PT高压侧中性点串接压敏电阻

压敏电阻常用的型号为LXQ10,接入电阻后PT高压侧故障相电流如图9所示,故障消失后,电流最大值仅有0.3 A,并在0.5 s内迅速衰减,因此PT高压侧中性点接入非线性压敏电阻可以有效抑制低频非线性振荡产生的过电流,但对零序电压的测量有一定影响。

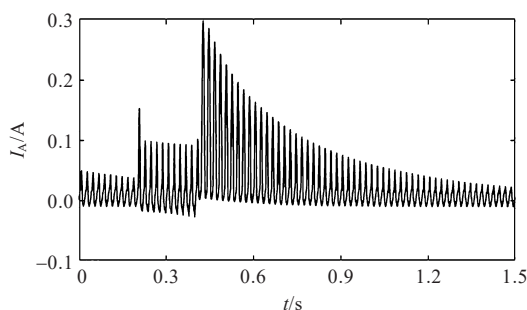


图9 PT高压侧故障相电流

Figure 9 Fault-phase current waveform of PT high voltage side

4.3 PT开口三角短时接入电阻

设PT开口三角绕组短接电阻为 $2\ \Omega$,响应时间为40 ms,短接时间为200 ms,PT高压侧故障相电流如图10所示,故障消失后,电流最大值为1.4 A,仍可能造成保险熔断,且若响应时间过长,低频非线性振荡的第一个涌流就有可能积累足够热量使PT熔断,因此不建议使用该方法。

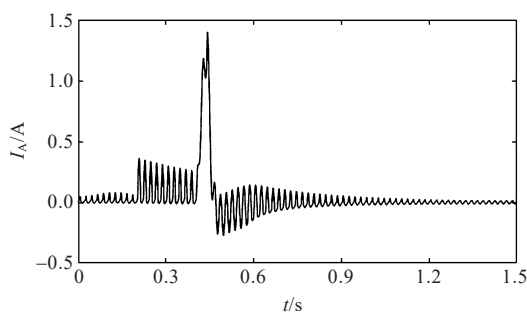


图10 PT高压侧故障相电流

Figure 10 Fault-phase current waveform of PT high voltage side

4.4 系统零序电压测量准确性

在配电网中,PT主要用于采集和监测系统电压,针对低频振荡的各种抑制措施改变了PT接线方式,对电压的测量会产生影响,尤其是零序电压的测量误差,易造成系统的故障选线偏差及继电器误动作^[25-26]。因此对4PT接线及PT高压侧中性点

串接压敏电阻的接线方法的零序电压测量有效值进行比较分析,如表3所示。

分析可知,4PT 2种接线方法零序电压的测量误差很小,准确度高;PT高压侧中性点串接压敏电阻的接线方法使得零序电压的测量误差超过6%,对电压测量产生很大影响,误差的产生来自PT不平衡的励磁电流经压敏电阻入地,电阻上产生的压降影响了电压测量。因此对零序电压测量要求较高的系统,应避免使用PT高压侧中性点串接压敏电阻的接线方法。

表3 零序电压测量误差

Table 3 Measurement errors of zero-sequence voltage

消谐方法	零序电压 实际值/V	零序电压 有效值/V	误差/ %
4PT短接方法	100.3	100.06	-0.24
4PT开路方法	100.3	100.41	0.11
PT高压侧中性点串接压敏电阻	100.3	94.04	-6.24

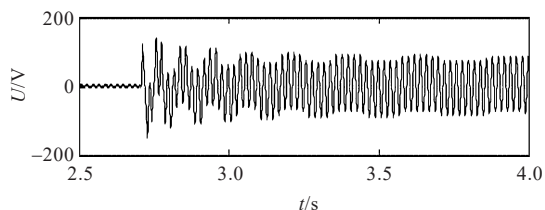
5 试验验证

根据已搭建的10 kV系统试验,可以验证上述仿真的准确性^[23]。试验采用JDZX9-10D型PT,并测量伏安特性曲线;采用集中参数性质的10 kV电容器组(电容值为 $4\ \mu\text{F}$)来模拟线路及母线的对地电容;系统电源由380 V升压至10 kV;示波器和录波仪实时记录故障相PT的高压侧电流及电压波形。

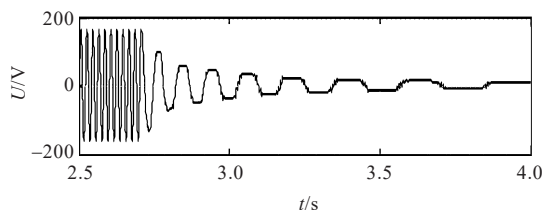
多次模拟单相接地故障以及故障消失,图11为A相电压相角为 64.8° 时接地消失的电压波形。接地消失后三相电压发生低频非线性振荡过程,初始频率约为15 Hz,在几秒内振荡频率和零序电压幅值逐渐衰减。PT高压侧的电流波形以及快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)频谱分析如图12所示,由图12可知单相接地消失后PT高压侧流过1个峰值很高、有明显间断角的脉冲涌流,并且正负脉冲逐渐衰减,最大峰值达到了约10.1 A;对电流波形进行FFT分析,可以看出其主要含有工频分量和低频分量(约15 Hz)。

在10次单相接地故障切除试验中,有9次试验的PT故障相保险熔断,计算接地消失时刻后40 ms内PT故障相高压侧电流有效值为4.34 A,200 ms

内有效值为 2.72 A,容易导致保险熔断。试验验证了仿真方法的有效性。



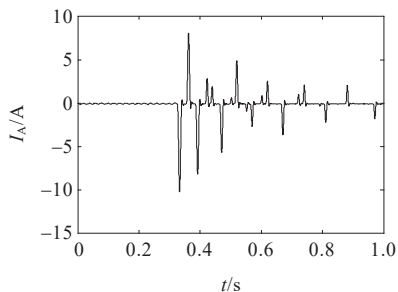
(a) 故障相电压



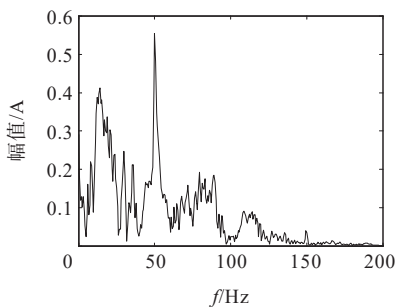
(b) 零序电压

图 11 试验系统电压波形

Figure 11 Voltage waveforms of test system



(a) 故障相电流波形

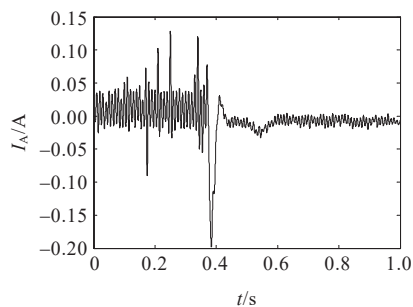


(b) 频谱分析

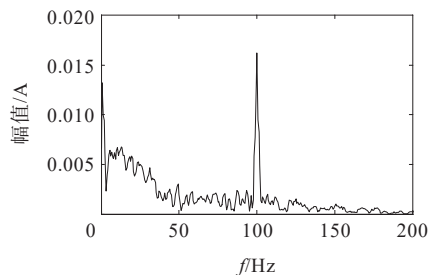
图 12 试验系统电流波形及频谱分析

Figure 12 Current waveform and spectrum of test system

试验也采用了配网常用的 JSZJK-10Q 型抗谐振 PT(4PT)进行故障处理,图 13 为故障相 PT 高压侧的电流波形。可以看出,采用 4PT 后,系统在单相接地消失后可以迅速地恢复至正常情况,与仿真结果相吻合。经过多次试验,PT 保险均未熔断,可见该措施可以很好地防止保险熔断。



(a) 故障相电流波形



(b) 频谱分析

图 13 采用消谐措施后电流波形及频谱分析

Figure 13 Current waveform and spectrum with measures of harmonic elimination

6 结语

本文基于 ATP-EMTP 平台对 10 kV 系统单相接地故障消失后的暂态过程进行仿真,分析 PT 保险熔断的原因及影响因素,并提出振荡的抑制措施,得到如下结论。

1) 系统对地电容与 PT 励磁电感的参数匹配条件超出铁磁谐振区域,单相接地故障消失能够激发低频非线性振荡,该暂态过程的过电压值在绝缘裕度范围内,但过电流值很大,会造成 PT 保险熔断。

2) 系统对地电容和零序电阻值均能影响低频非线性振荡的过电流值。对地电容越大,PT 高压侧电流有效值越大,保险熔断速度越快;零序电阻增大,PT 高压侧励磁涌流显著减小。故障发生与消失时刻对励磁涌流的幅值影响不大。

3) 2 种 4PT 接线法和 PT 高压侧中性点串接压敏电阻可以有效降低过电流的幅值。但开口三角短路的 4PT 接线法易产生较大环流;PT 高压侧中性点串接压敏电阻的方式得到的零序电压测量值误差较大。因此,推荐使用开口三角绕组开路的 4PT 接线法。

4) 建立了10 kV系统的低频非线性振荡试验平台,验证了仿真的有效性。

参考文献:

- [1] 陈慈萱. 电气工程基础(上册)[M]. 北京:中国电力出版社,2012.
CHEN Cixuan. Fundamentals of electrical engineering (volume I)[M]. Beijing:China Electric Power Press,2012.
- [2] 刘纯,周启涛,汪宏,等. 谐波影响下变电站电能分项计量误差测试方法[J]. 电网与清洁能源,2022,38(2):76-81+87.
LIU Chun, ZHOU Qitao, WANG Hong, et al. A study on substation electric energy subitem error control under the influence of harmonics[J]. Power System and Clean Energy,2022,38(2):76-81+87.
- [3] 张超,王宾,张海,等. 中性点直接接地电网单相串联铁磁谐振检测与类型辨识[J]. 电力系统自动化,2022,46(19):172-179.
ZHANG Chao, WANG Bin, ZHANG Hai, et al. Detection and type identification of single-phase series ferroresonance in neutral point solid grounding power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46 (19):172-179.
- [4] 刘健,刘海,杨晓西,等. 零序电流互感器配大电阻的配电网单相接地故障检测[J]. 电测与仪表,2023,60(10):92-97.
LIU Jian, LIU Hai, YANG Xiaoxi, et al. Single-phase grounding fault detection based on zero-sequence current transformer with large resistance[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(10):92-97.
- [5] 李奎,徐子健,卢志伟,等. 电磁式漏电保护特性影响因素分析及其稳健性设计[J]. 电工技术学报,2023,38(14):3930-3942.
LI Kui, XU Zijian, LU Zhiwei, et al. Factors analysis and robust design of electromagnetic leakage protection characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2023,38(14):3930-3942.
- [6] 朱梦梦,王登,廖耀华,等. 直流电子式电压互感器延时特性分析与现场测试[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(3):126-132.
ZHU Mengmeng, WANG Deng, LIAO Yaohua, et al. Field test and analysis of delay characteristics of a DC electronic voltage transformer[J]. Power System Protection and Control,2023,51(3):126-132.
- [7] 王昊晴,刘宁,李向阳,等. 基于熔断器的组合式直流开断技术与验证[J]. 高压电器,2023,59(10):38-45+53.
WANG Haoqing, LIU Ning, LI Xiangyang, et al. Research and verification of combined DC breaking technology based on fuse[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(10):38-45+53.
- [8] 张程,刘佳静,蔡思静,等. 基于MEEMD与MP的电网低频振荡模式识别[J]. 智慧电力,2022,50(4):89-95.
ZHANG Cheng, LIU Jiajing, CAI Sijing, et al. Low frequency oscillation modal identification of power grid based on MEEMD and MP[J]. Smart Power,2022,50(4):89-95.
- [9] 李生虎,叶剑桥,张浩,等. 基于DFIG功率振荡阻尼器的电力系统低频振荡抑制综述[J]. 电力建设,2022,43(9):25-33.
LI Shenghu, YE Jianqiao, ZHANG Hao, et al. Review on low-frequency oscillation damping in power systems with DFIG-POD[J]. Electric Power Construction,2022,43 (9):25-33.
- [10] 申屠刚,吴正骅,王思家,等. 含光伏电站的电力系统低频振荡广域阻尼协同控制方法[J]. 中国电力,2022,55(12):69-77.
SHENTU Gang, WU Zhenghua, WANG Sijia, et al. Wide-area damping cooperative control method of low-frequency oscillations of power systems with photovoltaic stations[J]. Electric Power,2022,55(12):69-77.
- [11] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
YAO Huannian, CAO Meiyue. Power system resonant grounding[M]. Beijing:China Electric Power Press,2009.
- [12] 石启新,谈顺涛. 基于MATLAB的PT铁磁谐振数字仿真分析[J]. 长沙电力学院学报(自然科学版),2004,19(2):40-43+55.
SHI Qixin, TAN Shuntao. Digital simulation analysis of ferroresonance of electromagnetic potential transformer based on MATLAB[J]. Journal of Changsha University of Electric Power (Natural Science),2004,19(2):40-43+55.
- [13] 牛勃,吴旭涛,张国勇,等. 一起系统间歇性接地导致电磁式电压互感器的分析及改进措施[J]. 高压电器,2020,56(10):70-74+83.
NIU Bo, WU Xutao, ZHANG Guoyong, et al. Analysis and improvement measures of inductive voltage transformer fault caused by intermittent grounding[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(10):70-74+83.
- [14] PETERSON H A. Transactions in power system[M]. New York:John Wiley & Sons,1951.
- [15] 赵梦雅,梁志瑞. 配电网TV高压熔断器熔断影响因素的分析[J]. 电测与仪表,2016,53(21):76-81.
ZHAO Mengya, LIANG Zhirui. The analysis on the influence factors of TV fuses blowing in the distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(21):76-81.
- [16] 许明生,王倩. 配电网低频振荡过电压故障的计算与分析[J]. 科技与创新,2016(19):134-135.
XU Mingsheng, WANG Qian. Calculation and analysis of

- low frequency oscillation overvoltage fault in distribution network[J]. Science and Technology & Innovation,2016(19):134-135.
- [17] 吉兴全,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.
JI Xingquan, ZHU Yanghe, HAN Guozheng, et al. Simulation analysis of low frequency oscillation and study on resonance elimination measures in MV distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(8):2451-2455.
- [18] 陈绍英,葛栋,常挥,等.配电网超低频振荡的仿真计算研究[J].高电压技术,2004,30(5):18-19+22.
CHEN Shaoying, GE Dong, CHANG Hui, et al. Study and simulation calculation of very low frequencies oscillations in power distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(5):18-19+22.
- [19] 王亮,施围,沙玉洲,等.采用4TV法的配电网中铁磁谐振的研究[J].高电压技术,2005,31(10):15-17.
WANG Liang, SHI Wei, SHA Yuzhou, et al. Study on ferroresonance in the distribution system with 4TV method[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(10):15-17.
- [20] 刘健,常小强,张志华,等.基于零序电压的小电流接地系统高阻单相接地检测启动性能分析及其应用[J].供电,2023,40(9):27-35+73.
LIU Jian, CHANG Xiaoqiang, ZHANG Zhihua, et al. Analysis and applications of startup performance based on zero-sequence-voltage for single phase grounding fault detection of small current grounding systems[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(9):27-35+73.
- [21] 张永胜,刘守豹.配电网铁磁谐振综合抑制措施研究[J].高压电器,2016,52(11):137-142.
ZHANG Yongsheng, LIU Shoubao. Study of comprehensive suppression method for distribution network ferromagnetic resonance[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11):137-142.
- [22] 李国友,曹琪琳.电压互感器一次侧加装消谐器后三相电压不平衡原因分析[J].高压电器,2008,44(2):187-189.
LI Guoyou, CAO Qilin. Analysis of three-phase voltage imbalance after installing ferroresonance eliminator at voltage transformer primary side[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(2):187-189.
- [23] 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.
HE Lizhu, WU Jingfeng, ZHANG Lu, et al. Researches on ferromagnetic resonance calculation and harmonic elimination measures in substation based on EMTP-ATP [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5):210-216.
- [24] 余潇,卜广全,王姗姗.风电经柔直孤岛送出交流暂态过电压抑制策略研究[J].发电技术,2022,43(4):618-625.
YU Xiao, BU Guangquan, WANG Shanshan. Research on transient AC overvoltage suppression strategy of islanded wind power transmission via VSC-HVDC[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(4):618-625.
- [25] 李琰,赵莹,杜磊,等.计及分布式电源注入谐波的单相接地故障联合选线[J].电力工程技术,2023,42(4):113-121.
LI Yan, ZHAO Ying, DU Lei, et al. Combined line selection of single-phase grounding faults considering harmonic injection of distributed powers[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4):113-121.
- [26] 代姚.配电网铁磁谐振及弧光接地过电压特征识别与抑制方法[D].重庆:重庆大学,2010.
DAI Yao. Recognition and suppression methods for ferroresonance and grounding arc over-voltage in distribution power system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [27] 刘衍,龙国华,周求宽,等.开关型消弧激发PT过流的试验与仿真研究[J].高压电器,2017,53(2):87-94.
LIU Yan, LONG Guohua, ZHOU Qiukuan, et al. Experimental and simulation study on over-current of PT caused by switch type arc extinguishing[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(2):87-94.