

配电网电压互感器熔丝熔断防治措施的缺陷及新措施研究

梁志瑞¹, 赵梦雅¹, 牛胜锁¹, 刘海生², 梁爽², 郭亚成²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003;

2. 国网保定供电公司, 河北 保定 071000)

摘要: 利用 ATP-EMTP 建立了 10 kV 配电系统的数学模型, 对铁磁谐振和低频非线性振荡时的电压、电流波形进行了仿真。对现有的电压互感器熔丝熔断防治措施进行了仿真分析并对它们进行综合比较, 分析了它们的缺陷。提出一种电压互感器中性点经修正电压互感器并消谐器或线性电阻接地的防治措施, 消谐器或线性电阻起到抑制过电流、消耗谐振能量的作用, 修正电压互感器起到对电压互感器二次电压测量误差进行修正的作用。高压模拟试验结果验证了所提防治措施有较好的消谐效果。

关键词: 电磁式电压互感器; 熔丝; 铁磁谐振; 低频非线性振荡; ATP-EMTP; 配电网; 消谐

中图分类号: TM 451

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.09.003

0 引言

在中性点不接地运行的中压配电网中, 变电站母线上一般装设三相五柱式的电磁式电压互感器(以下简称电压互感器), 其一次侧中性点接地, 为保护和测量提供电压量。当雷电天气、母线空载合闸、间歇性弧光接地或接地故障消除瞬间等情况下系统回路受到外界强烈冲击时, 常常发生电压互感器高压熔断器(即熔丝)熔断等事故, 这既影响电能表的测量, 又易造成保护装置的误动作, 严重时还会导致电压互感器爆炸, 造成停电事故, 使电网不能安全、稳定运行^[1-4]。目前工程上虽然采取了许多技术措施, 但仍时常有相关事故发生。因此, 研究导致电压互感器熔丝熔断的主要原因、相关机理及现有防治措施的特点与缺陷, 提出更好的防治方法十分必要, 具有工程价值和现实意义。

1 电压互感器熔丝熔断的理论分析

在中性点不接地的配电网中, 各相对地电容冲击电流是造成电压互感器熔丝熔断的主要原因。

以单相接地故障为例。当系统正常运行时, 电压互感器励磁电感相对较大, 各线路对地电容储存电荷之和为 0, 三相保持对称, 系统中性点的位移电压相对较小。当单相接地故障发生时, 非故障相对地电压变为线电压, 同时各非故障相对地电容充电至与线电压对应的电荷^[5-7]。以接地点为通路, 这些电荷产生的电容电流在电源-导线-大地之间流通。

在接地故障消除的瞬间, 电流泄往大地的通道被切断, 同时各相对地电压需回到正常运行时的相

电压值, 原非故障相对地电容需找到相应的充、放电途径, 此时电流只能通过电压互感器一次侧中性点接地点流向大地。这种瞬变过程使电压互感器一次侧瞬间流过高出额定电流几十倍或几百倍的励磁涌流, 致使电压互感器铁芯发生深度饱和^[8-10]。由于电压互感器励磁电感的非线性特性, 其工作状态由非饱和区跃变到饱和区, 电感快速降低。此时, 若电压互感器励磁电感和线路对地电容形成匹配, 构成谐振回路, 则会引发铁磁谐振现象, 产生较大的谐振过电压、过电流, 使电网绝缘薄弱区域放电击穿, 发生相位反倾、电压互感器熔丝熔断等现象。若此配电网电容值过大, 当其参数远远超出铁磁谐振范围时, 就可能发生低频非线性振荡现象。

2 ATP-EMTP 仿真模型的建立

本文采用单相接地故障消除瞬间来激发振荡过程。由于振荡过程在零序回路中产生, 而线电压维持不变, 此时导线相间电容、用于改善功率因数的电容器组、负载变压器及负荷可不予考虑^[11]。

仿真模型如图 1 所示, 仿真模型参数如下: 假设 A 相发生单相金属性接地故障, K 为模拟接地开关; 三相电源电压等级为 110 kV; 磁饱和变压器为 Y_N/Δ 接线且变比为 110 kV/10 kV; 假设三相线路参数对称, 每相导线对地电容为 $C_0=0.005 \mu\text{F}/\text{km}$, 每相导线阻抗为 $Z_m=0.425+j1.433 \Omega$; 电压互感器由 3 台 JDZX19-10G 型号的单相电压互感器组成, 其励磁特性见表 1; 消谐器采用 LXQ(D) II.10 型号, 其伏安特性见表 2。为使仿真的故障为最严重情况, 设定故障开始时间为电压一个周期的正半周峰值, 故障消失时间为电压一个周期的负半周峰值^[12], 仿真持续时间为 2 s。

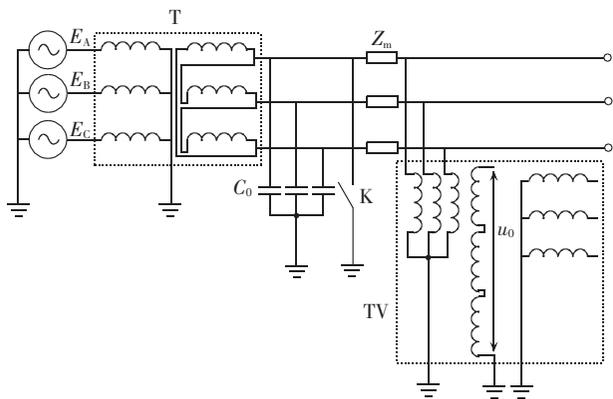


图 1 仿真模型
Fig.1 Simulation model

表 1 JDZX19-10G 型电压互感器的励磁特性参数

Table 1 Excitation parameters of JDZX19-10G PT

序号	i /mA	ψ /Wb	序号	i /mA	ψ /Wb
1	1.4	4.50	5	10.1	36.01
2	2.1	9.00	6	16.5	39.84
3	3.5	18.01	7	38.8	45.02
4	5.4	25.97	8	68.3	47.72

表 2 LXQ(D) II.10 型消谐器伏安特性
Table 2 Volt-ampere characteristics of LXQ(D) II.10 harmonic eliminator

序号	I /mA	U /V	序号	I /mA	U /V
1	1	603	5	59	2040
2	5	810	6	197	3640
3	10	1036	7	286	4500
4	28	1535	8	399	5430

仿真时通过系统对地电容值的变化来模拟母线出线总长度的变化,探究单相接地故障消除瞬间母线出线总长度对电压互感器一次侧过电流和系统谐振状态的影响,结果如表 3 所示。由表 3 可知,随着 10 kV 母线出线长度的增加,系统在单相接地故障消除时会依次发生高频谐振、基频谐振、分频谐振这 3 种典型状态的铁磁谐振。当母线出线长度超过铁磁谐振范围时,系统会发生低频非线性振荡。

表 3 不同 10 kV 母线出线总长度下的系统谐振状态

Table 3 Resonance state for different total lengths of 10kV bus feeders

对地电容/ μ F	母线出线总长度/km	谐振状态
0.002	0.4	高频谐振
0.01~0.02	2~4	基频谐振
0.03~0.1	6~20	分频谐振
0.15~2.5	30~500	低频非线性振荡

图 2、3 分别为 4 种谐振状态下的电压互感器一次侧三相电压、电流波形,各图中波形从上至下依次对应高频谐振、基频谐振、分频谐振和低频非线性振荡。这 4 种谐振状态的特点分别如下。

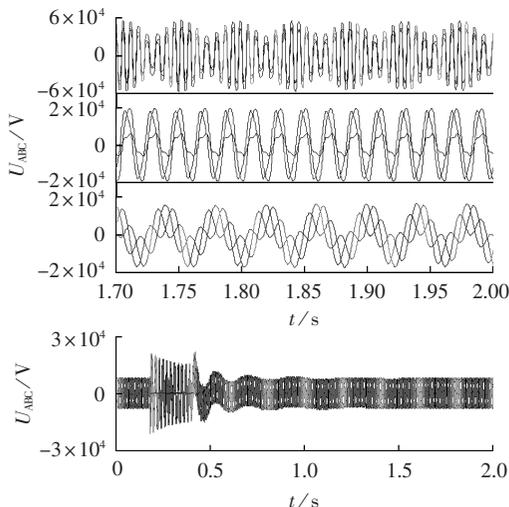


图 2 4 种谐振状态下的电压互感器一次侧三相电压波形

Fig.2 Three-phase waveforms of PT primary voltage for four resonance states

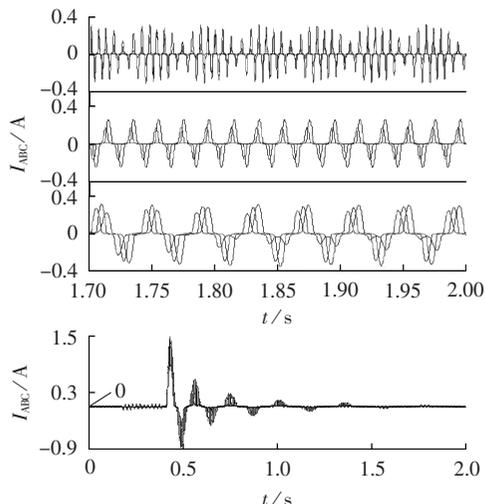


图 3 4 种谐振状态下的电压互感器一次侧三相电流波形

Fig.3 Three-phase waveforms of PT primary current for four resonance states

a. 高频谐振:三相电压同时升高,超过线电压,可达到系统正常时相电压的 4~6 倍,其主要危害就是在系统中产生较高的过电压,而中性点不接地系统对绝缘水平要求较高,所以高频谐振可能会造成非故障相绝缘薄弱区域被击穿,进而形成相间短路,产生更大危害。

b. 基频谐振:一相电压降低,其他两相电压升高超过线电压,易出现虚幻接地现象。

c. 分频谐振:三相电压同时或依次轮流升高,电压一般不超过 3 倍相电压,分频谐振发生概率在铁磁谐振中最大。实际运行中,电压表还会出现指针摆动的现象。

d. 低频非线性振荡:电压与电流经过一定时间后都会衰减;电流在振荡初始阶段可达安培级别;系

统对地电容较小时,电压互感器一次绕组电压振荡幅度较大,过电流幅值相对较小;而系统对地电容越大,则振荡频率越低。电压互感器一次绕组过电流越大,对系统威胁越大;且振荡频率和过电流幅值均呈衰减状态,随着系统对地电容的增加,衰减加快。

理论研究和实践经验表明,分频谐振和低频非线性振荡的危害最大,它们会使励磁电流急剧上升,甚至可达额定值的数百倍,这将会造成电压互感器熔丝熔断和电压互感器本身损毁等事故。

3 电压互感器熔丝熔断防治措施综合比较

消谐一般应从两方面进行:一是改变系统等值电感、电容参数来破坏谐振条件;二是通过阻尼作用消耗谐振能量^[13]。要彻底解决铁磁谐振和低频非线性振荡问题,最根本的是改善电压互感器的励磁特性,使其在一般过电压水平下不足以进入深度饱和区,进而无法构成谐振匹配参数,但这在实践中有较大难度。此外,改变系统中性点接地方式(系统中性点经消弧线圈接地或经小电阻接地)对电压互感器一次侧过电流的抑制效果很好,但系统中性点接地方式的改造是一项综合工程,投资较大且涉及的经济技术因素较多,若仅仅为了防治电压互感器熔丝熔断而进行改造,则代价太大,一般不予采用。也可选用电容式电压互感器,但其准确性受谐波影响大,且暂态特性不如电磁式电压互感器^[14]。因此,在现有配电网结构基础上,采用一定措施改造现有设施是具有现实意义的,且附加设备影响小、投资少,具有可行性。

措施1:电压互感器一次侧中性点经消谐器接地。

这种措施是目前防治电压互感器熔丝熔断最常用的方法。消谐器是一种非线性电阻器,其原理与线性电阻相似,起到增加阻尼、消耗能量的作用,一般采用具有负温度特性的SiC制作。消谐器的非线性电阻特性为 $u=ki^\alpha$,其中 k 为电阻系数, α 为非线性系数^[15]。当系统正常运行时,消谐器两端电压低、阻值高,使谐振在初始阶段不易发展。单相接地故障发生时,消谐器两端电压高、阻值低,相对减少了对电压互感器开口三角输出零序电压的影响,但还是抬高了电压互感器一次侧中性点电压,使相对地电压和零序电压测量产生误差。因此,选择消谐器时,应注意其系数值的合理性, k 不宜太大, α 不宜太小,否则消谐器上的压降过大,使电压互感器二次测量零序电压降低,影响接地保护的正确动作。

针对分频谐振和低频非线性振荡情况,接入消谐器后的电压互感器一次侧电压、电流波形分别如图4、5和图6、7所示。可以看到,消谐器对过电压、过电流的抑制效果非常好,分频谐振的电压、电流几

乎无振荡,而低频非线性振荡的冲击电流由1.45 A降到了0.55 A,且迅速衰减。

措施2:电压互感器一次侧中性点经线性电阻接地。

从阻尼的角度看,电阻阻值越大越好,消耗谐振能量越多;从绝缘、保护的角度看,电阻阻值较大时,其两端电压越高,威胁电压互感器一次侧中性点绝缘安全,同时影响电压互感器开口三角零序电压输出。由于线性电阻与消谐器的消谐原理相似,所以对这2种措施进行对比分析。本文采用不同阻值的线性电阻 R 和LXQ(D)Ⅱ.10型消谐器进行仿真分析。

图8为不同阻值的线性电阻对应的电压互感器一次侧电流最大峰值。由图8可知,随着电压互感

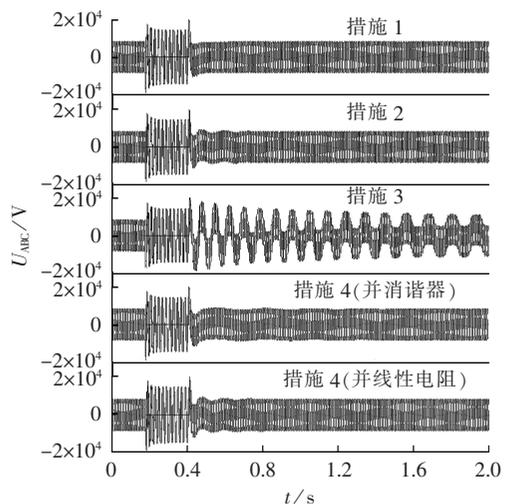


图4 分频谐振时,采用各防治措施后的电压互感器一次侧电压波形

Fig.4 Waveforms of PT primary voltage during half-frequency resonance for different preventive measures

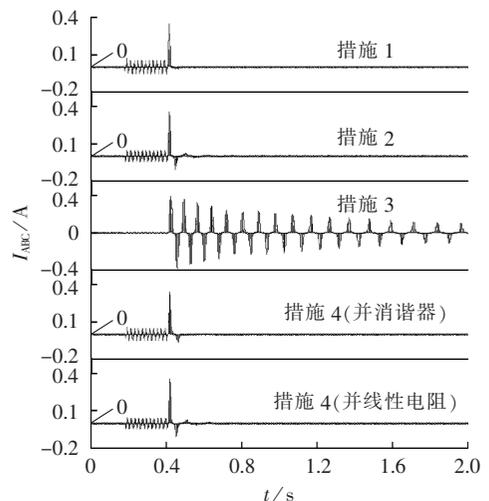


图5 分频谐振时,采用各防治措施后的电压互感器一次侧电流波形

Fig.5 Waveforms of PT primary current during half-frequency resonance for different preventive measures

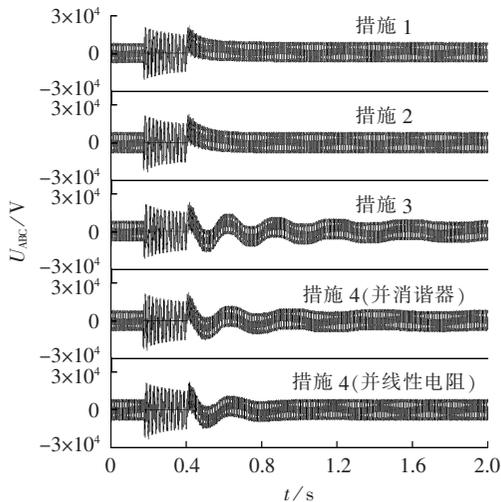


图 6 低频非线性振荡时,采用各防治措施后的电压互感器一次侧电压波形
Fig.6 Waveforms of PT primary voltage during low-frequency nonlinear oscillation for different preventive measures

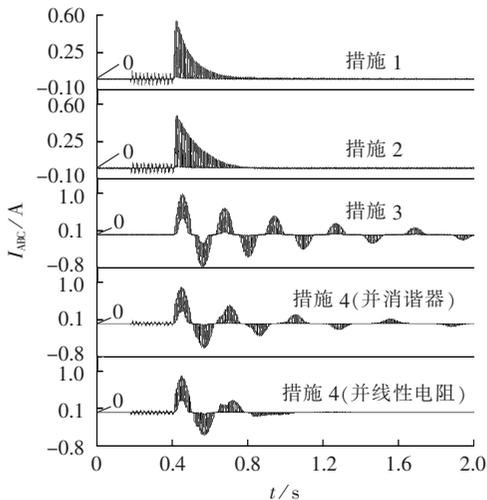


图 7 低频非线性振荡时,采用各防治措施后的电压互感器一次侧电流波形
Fig.7 Waveforms of PT primary current during low-frequency nonlinear oscillation for different preventive measures

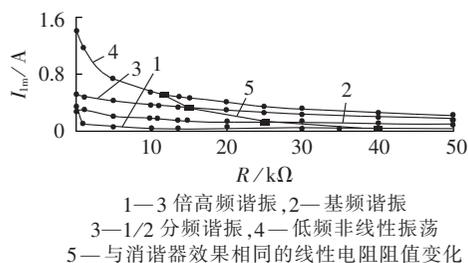


图 8 电压互感器一次侧中性点所接线性电阻阻值变化对一次电流的影响
Fig.8 Effect of resistance variation of linear resistor on PT primary current

器一次侧中性点所接线性电阻阻值的增大,4 种状态下的电压互感器一次侧电流全部减小;当电阻较大时,4 种电流趋于平缓,其值相近;高频谐振时的

电流下降幅度最小,低频非线性振荡时的电流下降幅度最大。

由图 9 可知,当母线出线总长度一定时,总是存在某一阻值的线性电阻与消谐器抑制过电流的效果相同。当母线出线总长度发生变化时,与消谐器效果相同的线性电阻阻值的变化规律为:随着母线出线总长度的增加,即分别在高频、基频、分频谐振和低频非线性振荡的情况下,线性电阻的阻值逐渐减小,高频段时变化较快,低频段时趋于平缓(横坐标采用对数坐标)。因此,当母线出线总长度确定时,可采用固定阻值的线性电阻代替消谐器,而抑制过电流效果不变。

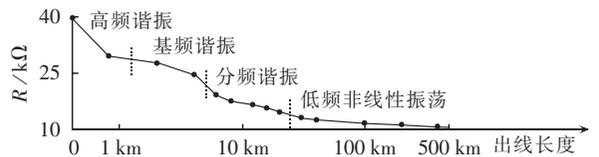


图 9 与消谐器效果相同的线性电阻阻值随母线出线长度的变化

Fig.9 Curve of resistance vs. total length of bus feeders for linear resistor with same effect of resonance eliminator

针对分频谐振和低频非线性振荡情况,采用 LXQ(D) II.10 型消谐器饱和时的阻值 $13.6 \text{ k}\Omega$ 作为线性电阻阻值,电压互感器一次侧电压、电流波形如图 4—7 所示。可以看到, $13.6 \text{ k}\Omega$ 电阻对过电压、过电流的抑制效果也非常好,与消谐器消谐效果相似。分频谐振时的电压、电流只有微小振荡,而低频非线性振荡时的冲击电流由 1.45 A 降到了 0.49 A ,其最大电流峰值比消谐器小,衰减速度几乎相同。

措施 3:电压互感器一次侧中性点经零序电压互感器接地。

三相电压互感器中性点和大地之间串接单相零序电压互感器,又称 4TV 法。此接法相当于改善电压互感器铁芯的励磁特性,使铁芯不易出现饱和,零序电压由零序电压互感器引出^[16]。同时,接地指示有足够的灵敏度。采用 4TV 接线方式的三相电压互感器必须是全绝缘型,对于户内安装的 35 kV 等级电压互感器,由于柜体空间狭小,无法采用全绝缘型,4TV 接线方式的应用受到限制^[17]。同一电网中,如有多组电压互感器,则必须每组均按此方式接线才能有效,且电压互感器中性点对地电压亦被抬高。

针对分频谐振和低频非线性振荡情况,接入零序电压互感器后进行仿真,电压互感器一次侧电压、电流波形如图 4—7 所示。可以看到,4TV 法的消谐效果比消谐器和线性电阻都要差。不论是分频谐振还是低频非线性振荡,其一次侧电压、电流振荡都较大,且不能较快地消除谐振,衰减时间较长,低频非

线性振荡时的冲击电流由 1.45 A 降到了 0.95 A, 仍易使电压互感器熔丝烧断。

措施 4: 电压互感器一次侧中性点经修正电压互感器并消谐器或线性电阻接地。

电压互感器一次侧中性点经消谐器或线性电阻接地相当于电压互感器一次侧中性点经阻抗接地, 等价于每相对地接入电阻, 消耗谐振能量, 使振荡快速衰减, 消谐效果较好。但是, 其接入会导致本应直接接地的电压互感器中性点不能直接接地, 因此造成电压互感器二次侧测量得到的三相对地电压和开口三角绕组输出的零序电压产生误差, 造成继电器误动或拒动, 影响电力系统的安全运行。

4TV 法虽然没有电压互感器一次侧中性点经消谐器或线性电阻接地的二次电压测量误差问题, 不会影响到绝缘监测^[18], 但是其消谐效果较差, 电压互感器一次侧电压、电流波形振荡幅度大且衰减慢。在系统电容值过大时, 4TV 法不能较快地消除谐振, 在大电流长时间作用下易使电压互感器熔丝熔断, 甚至烧毁电压互感器。

措施 1、2、3 是目前配电网消谐最常用的方法, 它们的缺陷在很多工程案例中都有沉痛的教训。针对措施 1、2、3 分别存在的问题与不足, 可将它们组合使用, 成为一种新方法, 即电压互感器中性点经修正电压互感器并消谐器或线性电阻接地。其中, 消谐器或线性电阻起到抑制过电流、消耗谐振能量的作用, 修正电压互感器起到对电压互感器二次电压测量误差进行修正的作用, 原理如图 10 所示。具体接线方式为:

- a. 将修正电压互感器的一次绕组与消谐器或线性电阻两端并联, 串接到母线电压互感器一次侧中性点与地之间;
- b. 母线电压互感器的二次侧 Y 形绕组中性点串接修正电压互感器二次侧的绕组 1 后接地;
- c. 母线电压互感器的二次侧剩余绕组串接修正

电压互感器二次侧的绕组 2 后接地;

d. 修正电压互感器的一次绕组与其二次侧绕组 1 的变比等于母线电压互感器的 Y/Y 绕组各相电压变比;

e. 修正电压互感器的一次绕组与其二次侧绕组 2 的变比等于母线电压互感器的 Y/Δ 绕组各相电压变比。

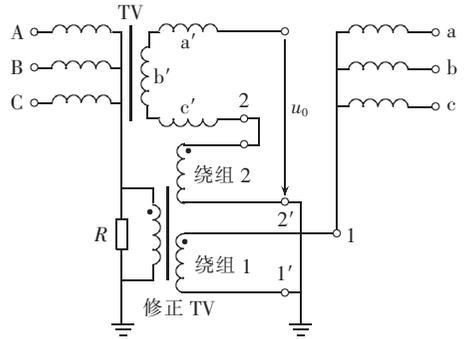


图 10 修正电压互感器并消谐器或线性电阻的原理图
Fig.10 Schematic diagram of correction PT connecting in parallel with resonance eliminator or linear resistor

按图 10 连接后, 电压互感器二次侧的 a、b、c 各相对地电压为测得的真实相对地电压, u_0 为测得的真实零序电压。表 4 为系统发生 A 相接地故障时, 电压互感器中性点接线方式不同的测量误差情况。理想情况下, 当系统发生单相接地故障且电压互感器一次侧中性点直接接地时, 二次侧故障相电压为 0, 非故障相电压和开口三角电压输出均为 100 V。而实际中存在的电压误差对测量仪表的指示和继电器的输入值有直接影响, 为了保证其准确性, 应把电压互感器的误差限制在一定范围内, 通常以准确级表示。以 JDZX19-10G 型电压互感器为例, 计量二次绕组的准确级为 0.2 级, 误差限值为 $\pm 0.2\%$; 监测二次绕组的准确级为 0.5 级, 误差限值为 $\pm 0.5\%$; 剩余二次绕组的准确级为 6P 级, 误差限值为 $\pm 6.0\%$ ^[19]。

从表 4 可以看出: 电压互感器中性点经消谐器

表 4 系统发生单相(A 相)接地故障时的电压互感器二次测量误差情况
Table 4 Errors of PT secondary measurements for phase-A grounding fault

电压互感器中性点接线方式	状态□	U_A/V		U_B/V		U_C/V		U_0/V	
		有效值	绝对误差	有效值	绝对误差	有效值	绝对误差	有效值	绝对误差
直接接地		0	—	100.01	—	100.01	—	99.94	—
经消谐器接地	分频谐振状态	14.37	14.37	106.12	6.12	89.45	-10.56	101.80	1.86
经 13.6 kΩ 线性电阻接地	(10 kV 母线	4.85	4.85	101.36	1.36	98.31	-1.70	99.66	-0.28
经修正电压互感器并消谐器接地	出线 20 km)	0.04	0.04	100.06	0.06	99.94	-0.08	96.46	-3.48
经修正电压互感器并 13.6 kΩ 线性电阻接地		0.01	0.01	100.18	0.17	100.02	0.01	99.81	-0.13
直接接地		0	—	100.17	—	99.84	—	99.97	—
经消谐器接地	低频非线性振荡状态	14.43	14.43	106.06	5.89	89.58	-10.27	101.70	1.73
经 13.6 kΩ 线性电阻接地	(10 kV 母线	4.94	4.94	101.19	1.03	98.34	-1.51	99.56	-0.41
经修正电压互感器并消谐器接地	出线	0.04	0.04	100.03	-0.13	99.90	0.06	96.46	-3.51
经修正电压互感器并 13.6 kΩ 线性电阻接地	400 km)	0.01	0.01	100.13	-0.04	99.86	0.01	99.67	-0.30

注: 绝对误差的计算以电压互感器一次侧中性点直接接地时的二次测量电压为基准值。

或 $13.6\text{ k}\Omega$ 电阻接地时,虽然零序电压测量误差满足要求,但相对地电压测量误差均超过国家标准,最大达到 10.56% ,不符合要求;而电压互感器中性点经修正电压互感器并消谐器或线性电阻接地时,相对地电压和零序电压测量误差均满足要求,误差修正效果较好。

电压互感器一次侧中性点经修正电压互感器并消谐器或 $13.6\text{ k}\Omega$ 电阻接地的电压互感器一次侧电压、电流波形如图 4—7 所示。可以看到,其消谐效果与电压互感器一次侧中性点经消谐器或线性电阻接地相似;与 4TV 法相比,其电压互感器一次侧电压、电流波形振荡幅度较小且衰减较快,消谐效果更好。

综上所述,电压互感器一次侧中性点经修正电压互感器并消谐器或线性电阻接地的方法,综合了措施 1、2、3 各自的优点,弥补了各自的不足,使消谐效果和测量误差两方面均得到改善,其不但对电压互感器过电压、过电流抑制效果较好,而且有效解决了现有防治措施造成的测量误差问题,使电压计量、监测更准确。

4 高压试验验证

针对以上电压互感器熔丝熔断的防治措施,利用保定供电公司高压试验大厅的 10 kV 中性点不接地系统进行现场试验。

试验系统接线如图 11 所示:电源侧电压等级为 380 V ;变压器 T 变比为 $10\text{ kV}/0.4\text{ kV}$, 升压运行,容量为 $315\text{ kV}\cdot\text{A}$, Dyn11 接线方式;采用 JDZXF10—10 型电压互感器,变比为 $(10/\sqrt{3})\text{ kV}/(0.1/\sqrt{3})\text{ kV}/(0.1/3)\text{ kV}$;三相各采用 6 台 $7.57\text{ }\mu\text{F}$ 高压电容器组合使用,各相对地电容 C_w 取 $1.26\text{ }\mu\text{F}$ 或 $2.52\text{ }\mu\text{F}$, 来模拟 10 kV 母线总出线长度为 252 km 或 504 km 情

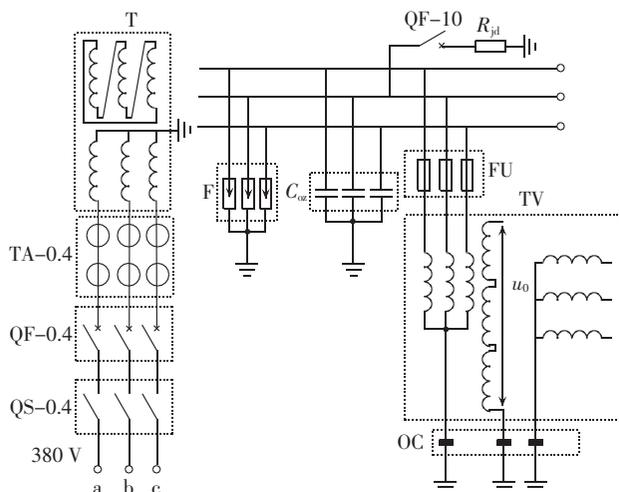


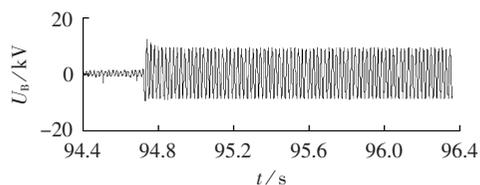
图 11 10 kV 试验系统接线图

Fig.11 Wiring diagram of 10 kV test system

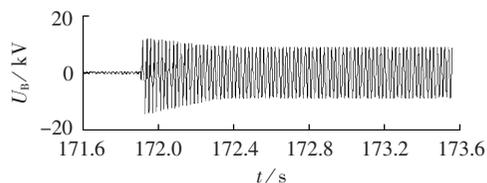
况;高压熔断器 FU 的额定电流为 0.5 A ;拆接点 OC 为安装消谐器、线性电阻或零序电压互感器而设置。此外,灵活广域测量单元(FPMU)用于测取各相电压互感器二次侧电压和部分开口三角电压, 10 kV 侧电流测量装置的各无线测量探头安装在电压互感器高压入口及其中性点处,用于测取各相电压互感器一次侧电流及中性点电流。

试验模拟在单相(B相)接地故障发生和故障消除的过程中,各种防治措施对电压互感器一次侧电压、电流的影响,结果如图 12、13 所示。

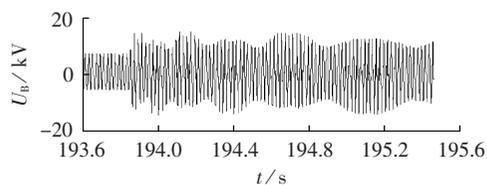
- 电压互感器一次侧中性点经消谐器接地的抑制谐振效果很好,电压几乎无暂态过程,冲击电流迅速衰减,单相接地故障消除后能马上恢复稳定状态。
- 电压互感器一次侧中性点经线性电阻接地:



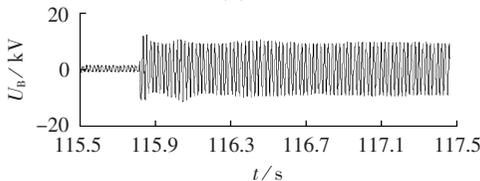
(a) 电压互感器一次侧中性点经消谐器接地



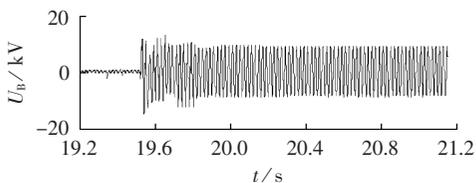
(b) 电压互感器一次侧中性点经线性电阻($50\text{ k}\Omega$)接地



(c) 4TV 法



(d) 电压互感器一次侧中性点经修正电压互感器并消谐器接地



(e) 电压互感器一次侧中性点经修正电压互感器并线性电阻($50\text{ k}\Omega$)接地

图 12 $C_w=1.26\text{ }\mu\text{F}$ 时,采用各防治措施后的电压互感器一次侧电压波形

Fig.12 Waveforms of PT primary voltage for different preventive measures when $C_w=1.26\text{ }\mu\text{F}$

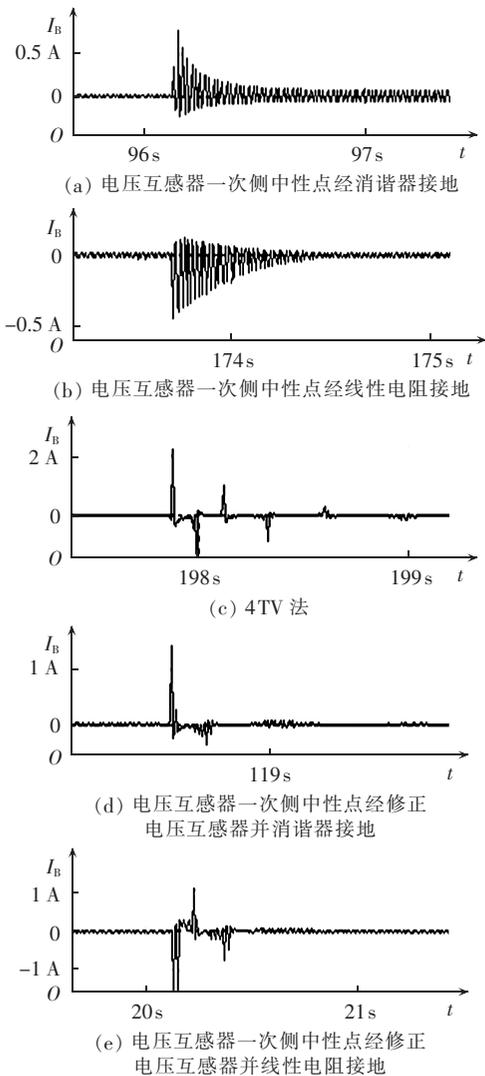


图13 $C_{\omega}=1.26 \mu\text{F}$ 时,采用各防治措施后的电压互感器一次侧电流波形

Fig.13 Waveforms of PT primary current for different preventive measures when $C_{\omega}=1.26 \mu\text{F}$

取 $50 \text{ k}\Omega$ 和 $200 \text{ k}\Omega$ 的线性电阻进行试验,单相接地故障消除后均有暂态过程。与 $50 \text{ k}\Omega$ 电阻相比,经过 $200 \text{ k}\Omega$ 电阻接地时的冲击电流更小,但电压、电流衰减时间更长。二者均无明显反复振荡过程,衰减时间较短。与采用经消谐器接地的措施相比,经过 $200 \text{ k}\Omega$ 电阻接地的冲击电流值较小,这证明了经较大阻值的线性电阻接地比经消谐器接地的抑制效果更明显,但衰减时间稍长。

c. 4TV 法:单相接地故障消除时,电压、电流振荡较为明显,对地电容越大,振荡持续时间越长,证明4TV法在系统电容值过大时消谐效果较差。与消谐器和线性电阻相比,4TV方式的振荡幅度更大、衰减更慢,证明消谐器和线性电阻比4TV的消谐效果好。

d. 电压互感器一次侧中性点经修正电压互感器并消谐器接地:与经消谐器接地相比,经修正电压互感器并消谐器接地后的电压、电流有振荡过程但很

快衰减,冲击电流稍大。与4TV法方式相比,其冲击电流较小,证明修正电压互感器并消谐器比4TV法的消谐效果好。

e. 电压互感器一次侧中性点经修正电压互感器并线性电阻接地:取修正电压互感器并 $50 \text{ k}\Omega$ 电阻和 $200 \text{ k}\Omega$ 电阻进行试验。与修正电压互感器并 $50 \text{ k}\Omega$ 电阻相比,修正电压互感器并 $200 \text{ k}\Omega$ 电阻时的冲击电流更小,但电压、电流衰减时间更长。与经消谐器和线性电阻接地相比,经修正电压互感器并线性电阻时的冲击电流更大,且电压、电流出现振荡过程。与经修正电压互感器并消谐器相比,二者消谐效果相似。

关于电压互感器中性点经修正电压互感器并消谐器或线性电阻接地方法对电压互感器二次电压测量误差的修正效果,其物理模拟试验已在实验室搭建的 380 V 三相系统进行了试验,验证了其良好效果^[20]。

5 结论

本文针对配电网电压互感器熔丝时常熔断的事故,基于 ATP-EMTP 仿真软件,对电压互感器熔丝熔断的主要原因及其防治措施进行了分析研究和综合比较,同时提出了一种可进行测量误差修正且消谐效果很好的新型防治措施,并通过高压模拟试验进行验证分析,得到的结论如下。

a. 电压互感器一次侧中性点经消谐器接地的消谐效果最好。电压互感器一次侧中性点经线性电阻接地时,其阻值越大,抑制过电流越好,但衰减时间越长。当母线出线总长度一定时,总是存在某一阻值的线性电阻与消谐器抑制过电流的效果相同,随着母线出线总长度的增加,该线性电阻的阻值逐渐减小。因此,当母线出线总长度确定时,可采用固定阻值的线性电阻代替消谐器,而其抑制过电流效果不变。

b. 4TV 法在系统电容值过大时不能较快地消除谐振,且采用该方法后,电压、电流都有较大的振荡,总体上抑制效果稍差。在实际工程中,这种接线方式发生事故的概率较高。

c. 电压互感器一次侧中性点经修正电压互感器并消谐器或线性电阻接地的方法,综合了电压互感器一次侧中性点经消谐器或线性电阻接地和4TV法各自的优点,弥补了各自的不足,不但对谐振产生的过电压、过电流抑制效果较好,而且可使电压计量、监测更准确,提高了消谐效果,减小了测量误差,提高了系统运行的安全性和可靠性。

d. 高压模拟试验得到的数据和结论,与仿真得到的结论一致,成功验证了各防治措施对电压互感器一次侧过电压、过电流的抑制效果,同时也得到了在单相接地故障消除时电压互感器一次侧电压、电

流的普遍规律。

参考文献:

- [1] 王明钦,陈维江,李永军,等. 油田 35 kV 系统电压互感器高压熔断器异常熔断故障的抑制措施[J]. 电网技术,2012,36(12):283-288.
WANG Mingqin, CHEN Weijiang, LI Yongjun, et al. A counter measure to deal with abnormal fusing of high voltage fuse for potential transformer in 35 kV oilfield power distribution system[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 283-288.
- [2] 周丽霞,尹忠东,郑立. 配网 PT 铁磁谐振机理与抑制的试验研究[J]. 电工技术学报,2007,22(5):153-158.
ZHOU Lixia, YIN Zhongdong, ZHENG Li. Research on principle of PT resonance in distribution power system and its suppression[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(5): 153-158.
- [3] 杨斌文,李文圣. 电压互感器铁磁谐振的产生与消除[J]. 电力自动化设备,2010,30(3):134-136.
YANG Binwen, LI Wensheng. Causes of PT ferroresonance and countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(3): 134-136.
- [4] 陈飞,田园. 10 kV 电压互感器高压熔丝频繁熔断的分析[J]. 高电压技术,2005,31(9):88-89.
CHEN Fei, TIAN Yuan. Frequent melting of 10 kV high voltage fuse link[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(9): 88-89.
- [5] 李静一. 配电网 PT 低频非线性振荡分析与抑制措施研究[D]. 北京:华北电力大学,2007.
LI Jingyi. Study and analysis of PT low frequency non-line oscillation and suppression measure in power distribution networks[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2007.
- [6] 滕永禧,许明,李向军,等. 10 kV TV 高压熔丝频繁熔断的分析[J]. 高电压技术,2008,34(1):204-206.
TENG Yongxi, XU Ming, LI Xiangjun, et al. Frequent melting of 10 kV high voltage fuse link[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 204-206.
- [7] 梅成林,张超树. 电压互感器铁磁谐振分析[J]. 电网技术,2008,32(增刊):311-313.
MEI Chenglin, ZHANG Chaoshu. Analysis of voltage transformer ferroresonance[J]. Power System Technology, 2008, 32 (Supplement): 311-313.
- [8] 周浩,余宇红,张利庭. 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(22):26-32.
ZHOU Hao, YU Yuhong, ZHANG Liting. Comparative study on ferromagnetic resonance elimination measures in 10 kV power distribution system by simulation method[J]. Power System Technology, 2005, 29(22): 26-32.
- [9] 李琼林. 2 起 35 kV 侧 CVT 熔断器熔断故障原因探析及解决措施[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):142-146.
LI Qionglin. Two case studies for 35 kV CVT fuse breakdown and solutions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(1): 142-146.
- [10] 鲁铁成. 电力系统过电压[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [11] 张玲. 电压互感器铁磁谐振过电压及防止[J]. 电力自动化设备,2000,20(3):29-31.
ZHANG Ling. Ferroresonance over-voltage on power transformer and its prevention[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(3): 29-31.
- [12] 娄欣. 配电网电压熔丝熔断的研究[D]. 保定:华北电力大学,2013.
LOU Xin. Research on breaking reasons and preventive methods of voltage transformer fuse in distribution network[D]. Baoding:North China Electric Power University, 2013.
- [13] 董维. 中压配电网铁磁谐振及抑制措施研究[D]. 保定:华北电力大学,2012.
DONG Wei. Research on ferroresonance and suppression measures in medium voltage distribution network[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012.
- [14] 赵翠宇,管益斌. 电压互感器与开关断口电容铁磁谐振的分析与预防[J]. 电力系统自动化,2002,26(2):72-74.
ZHAO Cuiyu, GUAN Yibin. Analysis and prevention of ferromagnetic resonance between voltage transducer and switched fracture capacitor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 72-74.
- [15] 许志龙. 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):27-29,38.
XU Zhilong. 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, 38.
- [16] 梁志瑞,董维,刘文轩,等. 电磁式电压互感器的铁磁谐振仿真研究[J]. 高压电器,2012,48(11):18-23.
LIANG Zhirui, DONG Wei, LIU Wenxuan, et al. Simulation analysis on ferroresonance of potential transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11): 18-23.
- [17] 陈维贤,陈禾. 配电网中电压互感器消谐、单相消弧和单相永久性故障切线问题的解决方案[J]. 高电压技术,2012,38(4):776-781.
CHEN Weixian, CHEN He. New methods of suppressing potential transformer resonance, single-phase arc grounding and fault-line breaking in distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 776-781.
- [18] 周小梅. 配电网铁磁谐振抑制措施的研究与分析[D]. 北京:华北电力大学,2008.
ZHOU Xiaomei. Practical research on fault location in distribution networks[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2008.
- [19] 王锡凡. 电气工程基础[M]. 西安:西安交通大学出版社,2009.
- [20] 梁志瑞,苏海峰,牛胜锁,等. 带修正电压互感器的消谐器:CN102-170121A[P]. 2011-08-31.

作者简介:



梁志瑞

梁志瑞(1959—),男,河北磁县人,教授,博士,主要从事电力系统自动化、电力系统监测与故障诊断技术的教学与研究工作;

赵梦雅(1990—),女,天津人,硕士研究生,主要从事地方电力系统自动化方面的研究(E-mail: jenny19901011@126.com);

牛胜锁(1980—),男,河北高邑人,讲师,博士,主要从事电能质量与仪器方面的教学与研究工作。

(下转第 32 页 continued on page 32)

- tion of Micro-grid considering regulation of interactive power [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1013-1023.
- [23] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.
- DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Economic operation optimization for microgrids including NaS battery storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.
- [24] 丁明, 王波, 赵波, 等. 独立风光柴储微网系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 575-581.
- DING Ming, WANG Bo, ZHAO Bo, et al. Configuration optimization of capacity of standalone PV-wind-diesel-battery hybrid microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 575-581.
- [25] 廖强强, 陆宇东, 周国定, 等. 基于削峰填谷的钠硫电池储能系统技术经济分析[J]. 电力建设, 2014, 35(4): 111-115.
- LIAO Qiangqiang, LU Yudong, ZHOU Guoding, et al. Technical

and economic analysis on NaS battery energy storage system based on peak shaving[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(4): 111-115.

作者简介:



张明锐

张明锐(1971—), 男, 甘肃民勤人, 副教授, 博士, 研究方向为分布式发电与微网技术、电力系统能量管理与优化运行、轨道交通牵引供电系统(E-mail: zmr@tongji.edu.cn);

谢青青(1990—), 女, 江苏高淳人, 硕士研究生, 研究方向为微网能量管理与优化运行;

欧阳丽(1975—), 女, 湖南永州人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为分布式能源集成应用。

Sizing and siting of BESS for grid-connected microgrid with electric vehicles

ZHANG Mingrui¹, XIE Qingqing¹, OUYANG Li²

(1. College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Central Academe Shanghai Electric Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China)

Abstract: Based on the grid-connection of EVs(Electric Vehicles) and the modular design of BESS(Battery Energy Storage System), the energy management of EV and the optimal allocation and operation of BESS are researched for the grid-connected microgrid. Two kinds of electricity price guide mechanism are introduced, and the coordinated EV charging mode and the coordinated EV charging & discharging mode are established. The installed capacity of nodal BESS is discretized, and a sizing and siting model of BESS is built, which takes the minimum sum of daily BESS investment cost and operational cost as its objective and considers the BESS energy constraint coupled between adjacent intervals. With the KNITRO solver, the DCOPTF(Direct Current Optimal Power Flow) method and the ACOPTF(Alternating Current Optimal Power Flow) method are applied respectively to solve the MINLP(Mixed Integer NonLinear Programming) problem. Simulative results show that, the ACOPTF method can accurately configure the modular quantity of BESS and their sites, the BESS capacity needed in the coordinated EV charging & discharging mode is dramatically smaller than that in the coordinated EV charging mode, the participation of EV in the islanded microgrid can enhance the redundancy of reserve capacity and the reliability of microgrid operation.

Key words: battery energy storage system; sizing and siting; electric vehicles; energy storage; energy management; mixed integer nonlinear programming; microgrid

(上接第 24 页 continued from page 24)

Defects of measures against PT fuse melting in distribution network and research of new measure

LIANG Zhirui¹, ZHAO Mengya¹, NIU Shengsuo¹, LIU Haisheng², LIANG Shuang², GUO Yacheng²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Grid Baoding Electric Power Supply Company, Baoding 071000, China)

Abstract: A mathematic model of 10 kV power distribution system is established with ATP-EMTP and the voltage and current waveforms during the ferroresonance or low-frequency nonlinear oscillation are simulated. The existing measures to prevent the PT(Potential Transformer) fuses melting are simulated and compared. Their defects are analyzed and a countermeasure is proposed, which connects the neutral point of PT to ground via, in parallel, a correction PT and a resonance eliminator or linear resistor. The resonance eliminator or linear resistance is used to suppress the over-current and consume the resonance energy, while the correction PT to correct the measuring error of the secondary voltage. The results of high-voltage simulation test verify that the proposed measure has better resonance cancellation effect.

Key words: electromagnetic voltage transformer; fuse; ferroresonance; low-frequency nonlinear oscillation; ATP-EMTP; distribution network; resonance cancellation