

高阻抗母线差动保护原理及在中压母线中的应用

陈鹏¹, 桑珠旺堆²

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川成都 610072; 2. 西藏广播电视台, 西藏拉萨 850000)

摘要: 通过介绍高阻抗母线差动保护的原理, 分别对母线保护区外故障、区内故障、电流互感器饱和带来的差流影响三种不同工况下的高阻抗母线差动保护的工作原理进行了理论分析。以某国外项目正在实施的 33 kV 母线保护为例, 对电流互感器参数选型、稳定电阻的选择、保护整定值计算选择等进行实际的推导计算, 并给出最终的选型参数及整定值清单。

关键词: 高阻抗; 差动保护; 中压母线

中图分类号: TM426; U224.2+7

文献标志码: B

文章编号: 1001-2184(2024)05-0149-05

Principle of High Impedance Busbar Differential Relay Protection and Application for MV Busbar

CHEN Peng¹, Sangzhu Wangdui²

(1. Powerchina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan 610072;

2. Xizang Radio and TV station, Lhasa Xizang 850000)

Abstract: This article introduces the principle of high-impedance busbar differential protection, and the working principle of high-impedance busbar differential protection under three different working conditions: faults outside the busbar protection zone, faults inside the busbar protection zone, and differential currents caused by current transformer saturation. Taking the 33kV busbar protection being implemented in a foreign project as an example, the actual derivation and calculation of current transformer parameter, stabilizing resistor selection, protection setting value calculation, etc. are carried out, and final selection parameters and setting value list are given.

Key words: High impedance; Differential relay protection; MV busbar

1 概述

目前国内使用的母线差动保护均是基于电流差动的微机型保护装置, 主要应用于 110 kV 及以上母线保护。而中压系统(国内一般为 35 kV、10 kV)母线, 一般均未配置专用的母线保护装置, 常采用变压器后备保护、或线路后备保护作为 10 kV 母线保护; 因为需要和下一级保护在时间上配合, 中压母线故障时一般无法做到 0 秒速动。

随着电力系统对继电保护要求的不断提高, 对中压母线保护也提出了更高的要求, 希望配置能 0 秒速动的母线保护。国内现有采用配置弧光保护作为母线保护的方案, 但弧光保护探头的布置需要在开关柜上进行钻孔, 一般适用于新建项目; 弧光保护探头对环境洁净度要求较高, 且随着使用期限的增加, 弧光探头的灵敏度将会减低, 保

护效果将不可避免的下降。

国外的主流继电保护厂家(ABB、施耐德、西门子、GE、SEL 等)除了提供电流型差动保护装置, 还提供电压型的高阻抗差动保护装置, 高阻抗差动保护装置广泛应用于母线保护、变压器限制性接地保护、电动机保护等, 实现 0 秒(ms 级)速动。

2 高阻抗母线差动保护的基本原理

2.1 高阻抗母线差动保护接线

以单母线保护为例, 设该母线有 3 个支路, 高阻抗母线差动保护接线见图 1。高阻抗差动保护的只有 1 组电流输入, 所有支路的电流互感器二次侧按和电流方式接线, 汇聚后接入高阻抗差动保护装置。和电流进入保护装置流过内部的稳定电阻 R_{ST} (不同厂家 R_{ST} 差别较大, 一般在几百到

收稿日期: 2024-03-30

几千 Ω),当稳定电阻上的电压超过动作电压 U_{SET} 整定值或动作电流 I_{SET} ($U_{SET} = I_{SET} \times R_{ST}$),保护动作。图1中:虚线框内即为高阻抗差动保护装置,为抑制过电压,一般需要设置非线性电阻;3组电流互感器参数相同, R_{CT} 表示电流互感器内阻, R_L 表示二次电缆单边电阻(这也是为何当单相接地短路时需计及2倍 R_L 的原因);图中 V_R 是笔者为分析而增加的电压表。

不同于电流型母线保护装置,高阻抗差动保护实际是一种电压型差动保护装置。 R_S 稳定电阻 R_{ST} 较大(一般数量级在数百 Ω 或数千 Ω), $R_{CT} + R_L$ 或 $R_{CT} + 2R_L$ 相对较小(一般数量级在几 Ω 或十几 Ω), $R_{ST} \gg (R_{CT} + 2R_L)$;因此,在图1中将高阻抗母线差动保护装置接入或退出,高阻抗母线差动保护装置对回路的分流影响可以忽略,近似认为 V_R 读数不变,故可以近似的把高阻抗母线差动保护装置等效为1个电压表 V_R ,这也是为何称之为“高阻抗”的原因。

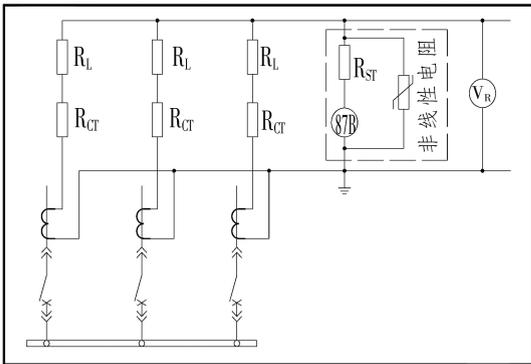


图1 高阻抗母线差动保护接线

基于上述分析,为简化分析,先做如下要求和假设:

- ① 电流互感器的励磁特性相同(具有相同的拐点电压和线性区间);
- ② 电流互感器的二次绕组内阻 R_{CT} 相同;
- ③ 采用低漏磁电流互感器,忽略的二次绕组电抗 X_{CT} ;
- ④ 电流互感器二次侧电缆电阻 R_L 相同;
- ⑤ 忽略电流互感器二次侧电缆电抗 X_L 。

基于上述分析及假设,对高阻抗差动保护功能原理进行详细分析。

2.2 当系统正常运行或当保护范围外故障且电流互感器未饱和时

区外故障,且电流互感器未饱和时电流、电压

见图2,当系统正常运行,或当保护范围外故障且电流互感器未饱和时,由于故障电流在各支路间形成环流,容易计算 $U_R = 0$,流入保护装置的电流为0,即保护装置采集到的电压为0(或电流为0),保护不动作^[1-3]。

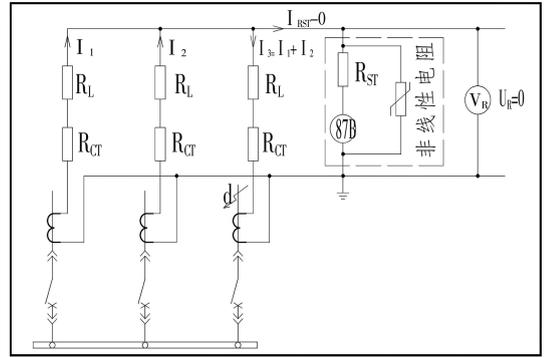


图2 区外故障,且电流互感器未饱和时电流、电压

2.3 保护范围外故障且该支路电流互感器饱和

区外故障,故障支路电流互感器饱和时电流、电压见图3,当保护范围外故障时,若短路点靠近母线时,且母线各支路有源支路较多,短路电流很大,按最不利情况考虑,故障支路的电流互感器完全饱和,其他支路未饱和,此时故障支路电流互感器励磁阻抗 ≈ 0 ,电流互感器二次端口电压也 ≈ 0 ;同时,故障电流在各支路间仍形成环流,流入高阻抗差动保护装置的电流可以忽略 ≈ 0 ,此时 $U_R = I_3 \times (R_{CT} + R_L)$,或 $U_R = I_3 \times (R_{CT} + 2 \times R_L)$ 。此时,只要设定动作值 $U_{SET} > U_R$,保护不动作。由此可以看出,高阻抗差动保护从原理上能够很好的克服电流互感器饱和带来的差流影响。

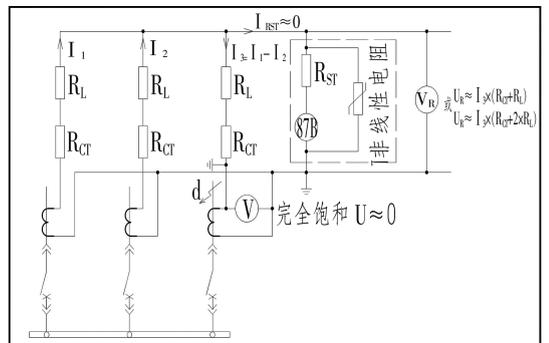


图3 区外故障,故障支路电流互感器饱和时电流、电压

可以直观的理解为:当电流互感器发生饱和,励磁阻抗不断降低,励磁电流不断增大,直至励磁阻抗近乎为0,所有故障电流全部转化为励磁电

流,而提供到外部负载的电流不断减小直至近乎为 0。随着提供到外部负载的电流不断减小,电流互感器负载端口的电压(绝对值)也不断较小,直至近乎为 0。而故障支路流入($R_{CT} + R_L$)或($R_{CT} + 2R_L$)的电流不变, ($R_{CT} + R_L$)或($R_{CT} + 2R_L$)两端的压降也不变,必然造成和电流接线形式的汇集点的 0 电位偏移。电流互感器发生饱和越深,0 电位偏移越多,偏移点从 R_L 开始向 R_{CT} 移动,直至近似完全偏移移到 R_{CT} 末端,此时可看做 R_{CT} 末端直接接地。

2.4 保护范围内故障时

区内故障时电流、电压见图 4,当保护范围内故障时,故障电流几乎(严格意义上要扣除电流互感器的励磁电流)全部流入保护装置,装置获得的电压信号 U_R (或电流信号 I_{RST})显著增大,只要该值大于 U_{SET} (或 I_{SET}),保护动作。为了达到 $U_R = U_{SET}$ (或 $I_{RST} = I_{SET}$),最小故障电流至少需要为每个电流互感器提供达到 U_{SET} 励磁电流,并为保护装置提供达到 U_{SET} 的电流,即:

$$I_{min} = (N \times I_{e(U=U_{set})} + I_{RST(U=U_{set})}) \times T^{[4-5]} \quad (1)$$

为满足灵敏度的要求,还应验算 $I_{Fmin}/I_{min} \geq 2$ 式中: I_{min} 为保护动作的最小故障电流, N 为支路数量, $I_{e(U=U_{set})}$ 为电流互感器在励磁电压为 U_{SET} 时的励磁电流, $I_{RST(U=U_{set})}$ 为保护装置在输入电压为 U_{SET} 时流过稳定电阻的电流, T 为电流互感器变比, I_{Fmin} 为区内故障最小短路电流。

显然,区内故障时,有源支路的应提供足够的短路电流,即:至少不允许所有的支路严重饱和。否则,如 2.3 中分析,如果所有支路严重保护,流入保护装置的和电流将为 0,保护将拒动。这就解释了为何国外继电保护厂家要求电流互感器的拐点电压 U_K 至少为启动电压 U_{SET} 的 2 倍以上,即 $U_K/U_{SET} \geq 2$,目的就是为了保证区内故障时电流互感器不发生完全饱和,有足够的电流流入保护装置。

3 中压母线的特点及相关设备配置

3.1 中压母线的特点

中压母线主接线型式一般采用单母线或单母线分段,任一时刻每段母线一般只有 1 个电源回路(电源来自进线断路器或母联断路器)。馈线回路一般均为负荷段,短路时不提供短路电流,电流互感器不易产生严重饱和;馈线回路数量差别较

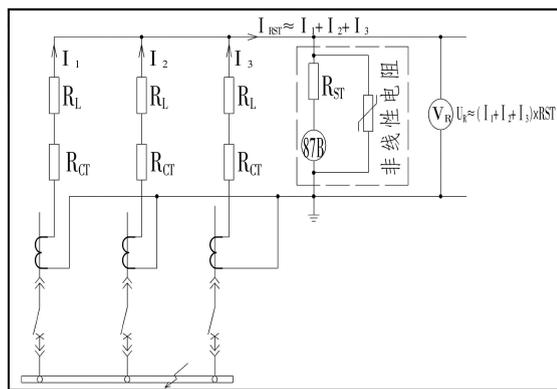


图 4 区内故障时电流、电压

大,少则 2~3 回,多则 10 余回。当区外故障时,故障电流仅流过电源支路和故障支路;当区内故障时,故障电流仅流过电流支路。

3.2 相关设备配置

中压母线主接线采用单母线接线型式,配置 1 套高阻抗差动保护装置;中压母线主接线采用单母线分段接线型式,每段母线作为一个保护区,分别设置 1 套(共 2 套)高阻抗母线差动保护装置,母联断路器同时作为 2 段母线的馈线看待。除配置保护装置外,还需要增加以下设备:

1) 进线电源和馈线支路增加 1 组专用电流互感器

2) 母联回路增加 2 组专用电流互感器(分别用于相邻两段母线保护)

4 高阻抗母线差动保护选型计算

笔者以正在实施的国外某 33 kV 母线案例进行详细介绍。国外某 33 kV 母线主接线及高阻抗母线保护配置见图 5。案例中拟使用的为西门子 7SR23 高阻抗差动保护装置,配套 7XG15 电阻箱(含非线性电阻)。容易求得:支路最大额定电流 419 A,母线三相短路电流 $I_{Fmax} = 3\ 230\ A$ 。

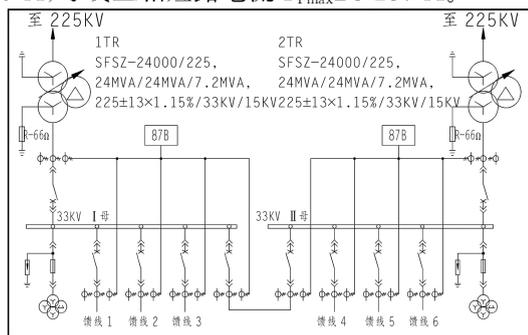


图 5 国外某 33 kV 母线主接线及高阻抗母线保护配置

4.1 差动保护专用电流互感器选型计算

高阻抗母线差动保护应采用励磁阻抗较高的低漏磁电流互感器,各支路电流互感器的变比和励磁特性应相同^[1-3]。根据参数,选择33 kV专用电流互感器参数如下:500/1,5P30,30 VA, $R_{CT} \approx 11.5 \Omega$ (制造厂提供)。33 kV电流互感器伏安特性曲线见图6,根据制造厂提供的电流互感器伏安特性曲线及数据,拐点电压 U_K 略大于1 200 V(1 202 V~1 221 V之间),取 $U_K=1 200$ V。

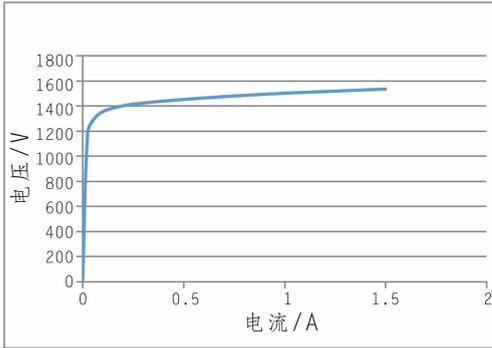


图6 33 kV电流互感器伏安特性曲线

4.2 动作电压 U_{SET} 初选

电流互感器二次侧电缆按 4 mm^2 ,20 m长计算, $R=\rho \times L/S=0.017 5 \times 20/4=0.087 5 \Omega$

U_{SET} 按最不利情况计算,该案例33 kV中性点采用小电阻接地,按单相接地短路电流取三相短路电流(I_{Fmax})保守计算。

$$\begin{aligned} U_{SET} &= I_{Fmax}/T \times (R_{CT} + 2 \times R_L) \\ &= (3 230/500) \times (11.5 + 0.084 5) \\ &= 74.8 \text{ V} \end{aligned}$$

取 $U_{SET}=80 \text{ V}$ 。

$U_K/U_{SET}=1 200/80=15 \gg 2$,满足要求。

4.3 稳定电阻 R_{ST} 和最小动作电流 I_{min} 电流初选

根据厂家资料,稳定电阻可选择 500Ω , $1 000 \Omega$, $2 000 \Omega$,基于高阻原理,应优先选择高电阻。通过对电流互感器伏安特性曲线的数据抓取,当 $U=U_{SET}=80 \text{ V}$ 时, $I_{e(U=U_{set})} \approx 0.001 2 \text{ A}$,考虑到抓取数据的误差保守计算,取 0.002 A 。

该例初选 $R_{ST}=2 000 \Omega$ 。此时流过稳定电阻的电流 $I_{RST}=U_{SET}/R_{ST}=80/2 000=0.04 \text{ A}$ 。对应一次最小动作电流 $I_{min}=(N \times I_{e(U=U_{set})} + I_{ST}) \times T=(5 \times 0.002 + 0.04) \times 500=25 \text{ A}$ 。即,当故障电流 $>25 \text{ A}$ 时,保护动作。考虑到CT $\pm 5\%$ 误差,正常运行时最大差流取 10% 额定电流

约为 $419 \times 10\%=42 \text{ A}$, $25 \text{ A} < 45 \text{ A}$,存在误动可能。重选 R_{ST} 和计算最小动作电流 I_{min} 。

重新选择 $R_{ST}=1 000 \Omega$,此时流过稳定电阻的电流 $I_{RST}=U_{SET}/R_{ST}=80/1 000=0.08 \text{ A}$ 。对应一次最小动作电流 $I_{min}=(N \times I_{e(U=U_{set})} + I_{ST}) \times T=(5 \times 0.002 + 0.08) \times 500=45 \text{ A}$ 。即,当故障电流 $>65 \text{ A}$ 时,保护动作。 45 A 仅略大于 42 A 。再次重选 R_{ST} 和计算最小动作电流 I_{min} 。

再次选择 $R_{ST}=500 \Omega$,此时流过稳定电阻的电流启动电流 $I_{RST}=U_{SET}/R_{ST}=80/500=0.16 \text{ A}$ 。对应一次最小动作电流 $I_{min}=(N \times I_{e(U=U_{set})} + I_{ST}) \times T=(5 \times 0.002 + 0.16) \times 500=85 \text{ A}$ 。即,当故障电流 $>85 \text{ A}$ 时,保护动作。 85 A 与正常最大差流 42 A 差值约2倍,有足够的安全裕度。

综上,初选 $R_{ST}=500 \Omega$, $I_{min}=105 \text{ A}$ 。

4.4 动作电压 U_{SET} 、最小动作电流 I_{min} 电流终选

根据初选初选的 I_{min} ,求得 $U_{SET}=I_{min}/T \times R_{ST}=105/500 \times 500=105 \text{ V}$ 。

$U_K/U_{SET}=1 200 \text{ V}/105 \text{ V}=11.4 > 2$,满足要求。

U_{SET} 从初选 80 V 到 105 V ,需重新代入计算。

通过对电流互感器伏安特性曲线的数据抓取,当 $U=U_{SET}=105 \text{ V}$ 时, $I_{e(U=U_{set})} \approx 0.001 5 \text{ A}$,考虑到抓取数据的误差保守计算,取 0.002 A 。

$I_{RST}=U_{SET}/R_{ST}=105/500=0.21 \text{ A}$,对应一次最小动作电流 $I_{min}=(N \times I_{e(U=U_{set})} + I_{ST}) \times T=(5 \times 0.002 + 0.21) \times 500=110 \text{ A}$ 。

综上,终选 $R_{ST}=500 \Omega$, $U_{SET}=105 \text{ V}$, $I_{SET}=0.21 \text{ A}$ 。

4.5 灵敏度校验

校验区内最小短路电流(I_{Fmin})取两相短路电流, $I_{Fmin}=\sqrt{3}/2 \times I_{Fmax}=0.866 \times 3 230=2 797 \text{ A}$

$I_{Fmin}/I_{min}=2 797/110=25.4 \gg 2$,满足要求^[3]。

4.6 非线性电阻配置

为避免故障时产生的峰值过电压过高带来的对设备和人员的伤害,当峰值过电压超过一定数值(厂家建议 $2 000 \text{ V}$)时需要配置非线性电阻^[3]。假设此时所有互感器均未饱和,此时 U_R 电压将达到最大。

根据厂家推荐计算公式

$$U_R = 2 \times \sqrt{2 \times U_K \times (U_{F_{\max}} - U_K)}$$

其中: $U_{F_{\max}} = I_{F_{\max}} \times (R_{CT} + 2R_L + R_{ST})$

$U_{F_{\max}}$: 保护装置电流输入端子上出现的最大理论电压

代入数据求得

$$\begin{aligned} U_{F_{\max}} &= I_{F_{\max}} \times (R_{CT} + 2R_L + R_{ST}) \\ &= 3\ 230/500 \times (11.5 + 0.084\ 5 + 500) \\ &= 3\ 305\ \text{V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_R &= 2 \times \sqrt{2 \times U_K \times (U_{F_{\max}} - U_K)} \\ &= 2 \times \sqrt{2 \times 1\ 200 \times (3\ 305 - 1\ 200)} \\ &= 4\ 495\ \text{V} > 2\ 000\ \text{V} \end{aligned}$$

因此需要配置非线性电阻限制过电压。

4.7 设备参数选型清单

该项目业主方要求配置 2 台母联断路器, 因此每台母联断路器只需配置 1 组专用电流互感器。国外某工程 33 kV 母线保护设备配置及保护定值单见表 1。

表 1 国外某工程 33 kV 母线保护设备配置及保护定值单

序号	名称	主要参数	单位	数量
1	差动保护装置	西门子 7SR23	套	2
2	辅助电阻	西门子 7XG, 500 Ω (含非线性电阻)	套	2
3	电流互感器	500/1, 5P30, 30 VA	组	10
4	动作电流	$I_{SET} = 0.21\ \text{A}$	—	—
5	动作时间	$T = 0\ \text{s}$	—	—

5 结 语

笔者对高阻抗母线差动保护原理进行了详细分析, 并对某国外工程案例进行了具体的选型计算。可以看出, 高阻抗差动保护能有效克服电流互感器饱和带来的影响, 保护整定计算简单, 保护灵敏度高。综上, 在中压系统中推广使用高阻抗母线差动保护, 为中压母线提供速动保护是有益的。

参考文献:

- [1] 电流互感器和电压互感器选择及计算规程: DL/T 866-2015 [S].
- [2] 袁季修, 盛和乐, 吴聚业. 保护用电流互感器应用指南 [M]. 北京: 中国电力出版社. 2003.
- [3] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 中国电力出版社. 2004.
- [4] 赵立东, 唐海燕. AP1000 核电厂中压母线高阻抗差动保护配置及整定计算分析 [J]. 电工技术. 2015(5): 33-35.
- [5] 刘锐. 高阻抗型差动保护 SEL587Z 的整定 [J]. 科技风. 2014(16): 47-48.

作者简介:

陈 鹏(1981-), 男, 四川荣县人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事水电站及变电站控制保护设计工作;

桑珠旺堆(1987-), 男, 西藏山人, 助理工程师, 本科, 从事供配电运行维护管理工作.

(编辑: 廖益斌)