

对变压器比率制动差动保护几个参数的再认识

代家鹏

(云南电网公司电力教育中心, 云南 昆明 650204)

摘要: 讨论了比率制动差动保护制动系数与制动特性曲线斜率的关系、制动系数与电流互感器误差及流出电流的关系及与灵敏度的关系。指出了启动电流, 最小制动电流和制动特性曲线斜率对保护制动特性的影响, 提出了在整定和使用该保护时应注意的一些问题。

关键词: 比率制动; 制动系数; 不平衡电流; 差动保护

Detailed analysis of several parameters about transformer percentage restraint type longitudinal differential protection

DAI Jia-peng

(Yunnan Power Grid Corporation Education Center, Kunming 650204, China)

Abstract: This paper analyses relations about percentage restraint type longitudinal differential protection restraint coefficient and restrained curve slope, restraint coefficient and error of current transformer, outflow current and sensitivity of the protection. It indicates that pick-up current, start-restraint current and the restrained curve slope affect restraint characteristic of protection, and proposes some problems when setting and using percentage restraint type differential protection.

Key words: percentage restraint; restraint coefficient; unbalanced current; differential protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)21-0073-04

0 引言

在实施变压器差动保护时, 如何防止区外短路故障差动回路不平衡电流增大而导致保护误动和如何提高区内轻微故障保护灵敏度问题是矛盾的两个方面。比率制动式差动保护原理较好地解决了上述矛盾, 但贯穿于该保护整定计算及原理中的启动电流、最小制动电流、制动系数、动作特性斜率等几个参数一直没有得到全面、正确的理解和足够的重视, 有些地方甚至混淆不清。本文就这几个问题进行分析比较, 以期大家在理解该原理时引起注意。

1 比率制动特性差动保护原理

变压器差动保护正常运行时, 流过差动回路的不平衡电流不大, 但区外短路故障时, 由于电流互感器的暂态饱和原因, 不平衡电流急剧增大, 其大小与以下三个因素有关: 差动保护中虽然采用了电流平衡调整措施, 但因调整不是连续的, 存在较小的不平衡电流, 通常用 Δm 表示, (初算时可取 $\Delta m = 0.05$); 变压器调压抽头改变时, 也会引起不平衡电流, 通常用 $\Delta \mu$ 表示 (初算时可取调压误差的一

半); 电流互感器的相角误差和变比误差, 主要是两侧电流互感器的相对误差, 流过的穿越电流越大时, 误差也越大。区外短路故障时差动回路的最大不平衡电流用 $I_{\text{unb.max}}$ 表示, 则:

$$I_{\text{unb.max}} = (K_{\text{aper}} K_{\text{ss}} K_{\text{er}} + \Delta u + \Delta m) I_{\text{K.max}} \quad (1)$$

式中: K_{aper} 为非周期分量系数, 可取 1.5~2.0; K_{ss} 为两侧电流互感器的同型系数, 变压器两侧电流互感器型号不同取 1.0; K_{er} 为电流互感器幅值误差, 可取 0.1。

注意, Δu 、 Δm 引起的不平衡电流与 $I_{\text{K.max}}$ 同相位, $K_{\text{aper}} K_{\text{ss}} K_{\text{er}}$ 引起的不平衡电流与 $I_{\text{K.max}}$ 有一定的相角差。所以, 区外短路故障时差动回路的不平衡电流随短路电流的增大而增大, 但不是线性增长关系。短路电流小时, 电流互感器误差较小, 不平衡电流不大, 短路电流较大时, 电流互感器进入饱和状态, 误差增大, 不平衡电流随之增加较快, 二者呈现非线性关系, (如图 1 所示中的曲线 1, 而非直线 3)。为保证区外短路故障时差动保护不误动, 其动作电流应整定为:

$$I_{op} = K_{rel} I_{unb.max} \quad (2)$$

式中： K_{rel} 为可靠系数，取 1.3~1.5。

如此整定的差动保护，动作值较大，能有效防止变压器区外短路故障时保护误动作，但反应变压器内部短路故障时灵敏性较差，为使差动保护在内部短路故障时有较高的灵敏度，必须从减小动作电流 I_{op} 上入手。采用比率制动式原理的差动保护，可以达到这一目的。比率差动原理是将差动电流与穿越电流相比较，以鉴别差动电流是故障电流还是不平衡电流，启动电流即最小动作电流 $I_{op,0}$ 的整定值按躲过变压器正常运行时的最大不平衡电流整定，

$$I_{unb.max} = K_{rel} (K_{aper} K_{ss} K_{er} + \Delta u + \Delta m) I_n$$

此值明显减小，但区外短路故障时差动回路的不平衡电流显然会大于 $I_{op,0}$ ，为防止保护误动，必须使动作电流随不平衡电流的增大而增大，即有比率制动特性。鉴于在电流小于电流互感器额定电流时误差很小，不平衡电流仅为励磁电流之差，完全不需要比率制动特性，只要用最小动作电流就可避免负荷状态下的不平衡电流。为提高保护反应变压器轻微匝间短路的灵敏度，要求穿越电流大于电流互感器的额定电流时才起制动作用，满足此要求的制动特性应是折线型的，以此折线段来拟合不平衡电流随穿越电流增大的曲线。为使二者相似，其差动电流和制动电流按下式选择， I_1 和 I_2 为变压器两侧的电

$$I_{op} = |I_1 + I_2|, \quad I_{res} = \left(|I_1| + |I_2| \right) / 2 \quad \text{动作方程式:}$$

$$I_{op} \geq I_{op,0} \quad (I_{res} < I_{res,0}) \quad \text{电流差动判据 (3)}$$

$$I_{op} \geq I_{op,0} + S(I_{res} - I_{res,0}) \quad (I_{res} > I_{res,0})$$

比率制动判据 (4)

式中： I_{op} 为差动电流； $I_{op,0}$ 为启动电流即最小动作电流； I_{res} 为制动电流； $I_{res,0}$ 为最小制动电流； S 为 BC 制动段斜率（注意不是制动系数），其动作特性如图 1 中 ABC 段曲线 2 所示，同时满足以上 2 个方程保护动作。曲线之上为动作区，曲线下方为制动区。

2 制动系数 K_{res} 与特性曲线斜率 S 的关系

制动系数定义为动作电流与制动电流的比值，即 $K_{res} = I_{op} / I_{res}$ 。为了使差动保护在区外故障时不误动，必须使所选择的制动特性曲线上任一点的制动系数始终大于整定计算出的最小制动系数 $K_{res,0}$

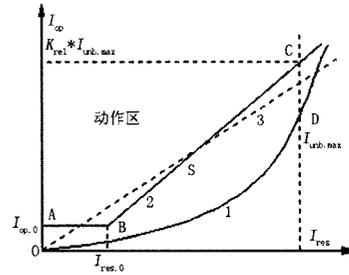


图 1 不平衡电流及比率制动特性曲线

Fig.1 Unbalanced current and percentage restraint curve

（最大制动系数只有在外部故障流过最大短路电流时才是必要的）。但制动系数与特性曲线斜率是两个不同的物理概念，将上式代入定义式，得

$$K_{res} = \frac{I_{op,0}}{I_{res}} + S \left(1 - \frac{I_{res,0}}{I_{res}} \right) = S + \frac{I_{op,0} - S I_{res,0}}{I_{res}} \quad \text{。由此式可}$$

知制动系数 K_{res} 的大小与 S 、 I_{res} 以及 $I_{op,0}$ 和 $S I_{res,0}$ 比值的大小有关，即制动系数与特性曲线斜率一般不相等，不要将两者混为一谈。比率制动系数实际上是一个变数，随以上因素的大小而变化。当 $I_{op,0} = S I_{res,0}$ 时，制动系数 $K_{res} = S$ ，为一个常数，此制动特性曲线的延长线过原点，是理想的比率制动特性曲线，只要选择一条斜率 S 大于整定计算的最低制动系数即可保证保护不会误动；当 $I_{op,0} > S I_{res,0}$ 时，制动系数 $K_{res} > S$ ，为一个变量，随制动电流的增大而减小，此时制动特性曲线在理想的比率制动特性曲线之上，也是选择一条斜率 S 大于整定计算的最低制动系数即可保证保护不会误动；当 $I_{op,0} < S I_{res,0}$ 时，制动系数 $K_{res} < S$ ，为一个变量，随制动电流的增大而增大，此时制动特性曲线在理想的比率制动特性曲线之下，即使选择一条曲线斜率大于整定计算的最低制动系数，当区外故障时流过的不平衡电流大于最小动作电流时，保护有可能误动。

从以上分析中可看出，制动系数大于或小于制动曲线的斜率 S ，保护是否会发生误动，取决于 $I_{op,0}$ 与 $S I_{res,0}$ 的比值。在整定计算中，如果将制动系数 K_{res} 与特性曲线斜率 S 混同起来，简单地按斜率 S 大于最低制动系数来选取制动特性曲线，会造成整定错误，引起保护误动。一般 S 和 $I_{res,0}$ 在定值中由程序设定，更改不方便，为避免差动保护在区外故障时误动，要使 $I_{op,0} > S I_{res,0}$ ，必须合理地选择启动电流 $I_{op,0}$ 的值。

3 制动系数 K_{res} 与电流互感器误差和流出电流的关系

有些时候为叙述方便，也可把 K_{res} 和 S 视为一

体来考虑, 它们的取值同时受区外故障时电流互感器饱和误差和区内故障时流出电流的双重限制。在区外故障时, 防止保护误动的措施是制动曲线的选取, 但是, 区外故障时由于电流互感器饱和而产生的不平衡电流远远大于 10%, 这就是区外故障时的差动电流。同时, 不可忽视的是电流互感器饱和也会减少制动电流。假设区外故障时的穿越电流为 1, 饱和电流互感器的误差为 δ , 其余电流互感器误差不计, 则有:

$$I_{op} = |I_1 + I_2| = \delta \quad I_{res} = \left(|I_1| + |I_2| \right) / 2 = (2 - \delta) / 2$$

代入式 (4), 此时保护不应该动作, 则有:

$$\delta \leq I_{op,0} + S \left(\frac{2 - \delta}{2} - I_{res,0} \right) = I_{op,0} + S - \frac{1}{2} S \delta - S I_{res,0}$$

$$\delta \leq \frac{S}{1 + \frac{1}{2} S} + \frac{I_{op,0} - S I_{res,0}}{1 + \frac{1}{2} S}$$

即, 区外故障时允许电流互感器的误差 δ 与制动特性曲线的斜率 S 有关, 同时也受 $I_{op,0}$ 与 $S I_{res,0}$ 的比值影响: 当 $I_{op,0} = S I_{res,0}$ 时, 允许误差 δ 仅与斜率 S 有关, 当 S 取 0.3 时, $\delta \leq 26\%$, S 取 0.5 时, $\delta \leq 40\%$, 即 δ 随 S 的增大而增大, 当误差不超过上述值, 保护不会误动; 当 $I_{op,0} > S I_{res,0}$ 时, δ 随 S 的增大而增大的趋势有所减慢; 当 $I_{op,0} < S I_{res,0}$ 时, δ 随 S 变化的趋势有增有减, 关系不单一。总的来说, 制动特性曲线 S 取较大值也就是制动系数 K_{res} 取较大值, 则在区外故障时允许电流互感器有较大的误差而保护不会误动, 也就是区外故障时保护的安全性较高。但它们不能一味地取高值, 它们的大小同样受区内故障流出电流的限制。在变压器内部故障时, 差动电流等于短路电流之和, 当有电流流出时, 一方面会使差动电流减小, 另一也会使制动电流增大, 保护的灵敏性会有所下降。设区内故障时总短路电流为 I_k , 流出电流占总短路电流的比值为

$$Ext\% = I_{out} / I_k, \quad I_{op} = |I_1 + I_2| = I_k - I_{out},$$

$$I_{res} = \left(|I_1| + |I_2 + I_{out}| \right) / 2 = (I_k + I_{out}) / 2$$

代入式 (4), 此时保护应该动作, 则有:

$$I_k - I_{out} \geq I_{op,0} + S \left[\frac{1}{2} (I_k + I_{out}) - I_{res,0} \right]$$

$$1 - Ext\% \geq \frac{I_{op,0}}{I_k} + \frac{1}{2} S (1 + Ext\%) - \frac{S I_{res,0}}{I_k}$$

$$Ext\% \leq \frac{1 - \frac{1}{2} S}{1 + \frac{1}{2} S} - \frac{I_{op,0} - S I_{res,0}}{(1 + \frac{1}{2} S) I_k}$$

即, 区内故障时允许流出的电流 $Ext\%$ 也与制动特性曲线的斜率 S 有关, 同时也受 $I_{op,0}$ 与 $S I_{res,0}$ 的比值影响。当 $I_{op,0} \geq S I_{res,0}$ 时, 允许流出的电流 $Ext\%$ 仅与斜率 S 有关, 当 S 取 0.3 时, $Ext\% \leq 74\%$, S 取 0.5 时, $\delta \leq 60\%$, 即 $Ext\%$ 随 S 的增大而减小; 当 $I_{op,0} < S I_{res,0}$ 时, $Ext\%$ 随 S 的增大而减小的趋势有所减慢, 关系不单一。因此, 当制动特性曲线 S 取较大值也就是制动系数 K_{res} 取较大值, 则在区内故障时允许流出的电流较小, 也就若流出的电流超过上述值则保护的灵敏性下降, 保护可能会拒动。制动特性曲线和制动系数的取值与区外故障时允许电流互感器饱和误差及区内故障时允许流出的电流的大小有关, 可以初略地说, 其值与前者成正比, 与后者成反比。取值过大, 区外故障安全性高, 即使电流互感器饱和不平衡电流增大保护不容易误动; 但区内故障时允许流出的电流较小, 流出电流超过一定值, 保护灵敏性下降, 可能会拒动, 它们之间的关系不是纯粹的线性关系, 依然受 $I_{op,0}$ 与 $S I_{res,0}$ 的比值制约。

4 制动系数 K_{res} 与差动保护灵敏性的关系

变压器差动保护的灵敏系数一般要求大于等于 2.0 以上, 具体来说就是在最小运行方式下计算保护区内 (指变压器引出线上) 两相金属性短路故障时最小短路电流 I_k 和相应的制动电流 I_{res} , 根据 I_{res} 的大小在相应制动特性曲线上求得相应的动作电流 I_{op} , 于是灵敏系数 $K_{sen} = I_{k,min} / I_{op}$ 。对差动保护动作最不利的是单侧电源情况, 此时差动电流等于短路电流, 即 $I_{op} = I_k$, 制动电流为短路电流的一半,

$$I_{res} = \frac{1}{2} I_k。$$

$$K_{sen} = \frac{I_k}{I_{op,0}} = \frac{I_k}{S I_{res}} = \frac{I_k}{\frac{1}{2} S I_k} = \frac{2}{S} \quad \text{在曲线拐点之前,}$$

灵敏性很容易满足, 且与曲线斜率成反比关系; 但在曲线拐点之后用下式表示为:

$$K_{sen} = \frac{I_k}{I_{op}} = \frac{I_k}{I_{op,0} + S (I_{res} - I_{res,0})} = \frac{1}{\frac{I_{op,0}}{I_k} + S \left(\frac{1}{2} - \frac{I_{res,0}}{I_k} \right)} = \frac{1}{\frac{1}{2} S + \frac{(I_{op,0} - S I_{res,0})}{I_k}}$$

可见灵敏性不仅与曲线斜率有关, 还受 $I_{op,0}$ 与 $S I_{res,0}$ 的比值影响: 当 $I_{op,0} = S I_{res,0}$ 时, 灵敏性仅与曲线斜率 S 有关, 能与拐点前的灵敏性取得一致; 当 $I_{op,0} \neq S I_{res,0}$ 时, 灵敏性与曲线斜率 S 和 $I_{op,0}$ 与 $S I_{res,0}$ 的

比值关系不单一,情况比较复杂。即在曲线拐点之后,灵敏性不能与拐点前保持一致。所以,比率差动保护的灵敏度不仅与曲线斜率有关,还与最小动作电流和最小制动电流的选取有密切的关系,不能一味地靠降低曲线斜率来提高差动保护的灵敏度。

5 结论

通过上述三个方面问题的分析,我们可以知道,比率差动保护的最小动作电流、最小制动电流、制动曲线斜率和制动系数等几个参数互相影响。制动系数与制动曲线斜率不是一回事,有些时候认为是一样的,则默认的前提是承认了 $I_{op,0} = SI_{res,0}$ 的条件;制动系数的选择关系区外故障的安全性和区内故障的灵敏性,受饱和和电流互感器误差和流出电流的制约,同时也受 $I_{op,0}$ 与 $SI_{res,0}$ 比值的影响,在整个动作区灵敏性能否保持一致,也与 $I_{op,0}$ 和 $SI_{res,0}$ 的比值有关。

因此,在整定计算时,必须对它们之间的关系给予重视,注意区外故障的安全性也要提高区内故障的灵敏性,必要时还要保证在整个动作区灵敏性的一致性。整定最小动作电流 $I_{op,0}$ 时,应尽量减小之, Δu 和 Δm 在微机保护中采用平衡系数来调整的情况下,可认为已接近 0, 正常运行的不平衡电流主要是由电流互感器的误差造成的,因此力争改善差动保护用电流互感器的暂态特性(采用 TP 级互感器),保持各侧电流互感器静态特性的一致性(各侧电流互感器二次负载的阻抗匹配,饱和特性的接近),将可减小 K_{aper} 和 K_{er} 的影响,使动作电流减小,但应注意与 $SI_{res,0}$ 大小和制动曲线斜率 S 的配合。最小制动电流的选择也应引起重视,拐点的位置对制动系数影响很大,位置越靠近原点,越容易

整定出理想的动作边界特性。实际使用中最小制动电流一般由软件在程序中固定,所以整定时应先选定拐点后在此基础上选一条制动曲线斜率 S , 最后验算最小动作电流、最小制动电流及制动系数和灵敏性,以期得到较理想的比率制动动作特性曲线。实际运行中,有些区外故障导致差动保护误动的原因为,很大程度上就是上述几个参数没有配合好造成的。

参考文献

- [1] 许正亚. 变压器及中低压网络数字式保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [2] 朱声石. 数字式比率差动继电器的通用特性[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(6): 6-9.
ZHU Sheng-shi. General Characteristics of Digital Percentage Differential Relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(6): 6-9.
- [3] 陆于平等. 差动保护灵敏度与启动电流、制动系数和原理之间的关系[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 51-55.
LU Yu-ping. Discussion on Relationship of Pick-up Current Restrained Actor and Principles to the Differential Protection Sensitivity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(4): 51-55.
- [4] 李天华等. 变压器比率制动差动保护的整定特性分析和反事故措施[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(8): 44-47.
LI Tian-hua, et al. Analysis and Improvement of Setting Characteristics for Transformer Percentage Differential Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(8): 44-47.

收稿日期: 2008-02-26; 修回日期: 2008-04-23

作者简介:

代家鹏(1972-), 男, 讲师, 从事继电保护及自动装置原理的教学培训和试验工作。E-mail: daijiapeng3322@sina.com

(上接第 23 页 continued from page 23)

- [2] 唐绪峰, 代凤鸣. 故障分量负序方向保护算法的改进[J]. 继电器, 2002, 30(1): 64-65.
TANG Xu-feng, DAI Feng-ming. An Improvement of Algorithm for Fault Component Negative-sequence Directional Protection[J]. Relay, 2002, 30(1): 64-65.
- [3] 王辉, 何奔腾, 李一泉. CVT 对零序(负序)方向保护影响的研究[J]. 继电器, 2006, 34(9): 1-4.
WANG Hui, HE Ben-teng, LI Yi-quan. Research of CVT's Influence on Zero-sequence(negative-sequence) Direction Protection[J]. Relay, 2006, 34(9): 1-4.
- [4] 金全仁, 杨智德, 张学深. 故障分量负序方向元件若干问题的研究[J]. 继电器, 2000, 30(1): 64-65.
JIN Quan-ren, YANG Zhi-de, ZHANG Xue-shen. Study on Negative Sequence Directional Protection Against Fault Component[J]. Relay, 2000, 30(1): 64-65.

- [5] 焦邵华, 刘万顺. 高精度快速负序算法的研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(21): 45-48.
JIAO Shao-hua, LIU Wan-shun. Study on Fast Negative Sequence Algorithm with High Precision[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(21): 45-48.

收稿日期: 2008-05-23

作者简介:

张弛(1978-), 男, 硕士, 从事继电保护专业工作;
E-mail: google@21cn.net
李一泉(1979-), 男, 博士, 研究方向为电力系统继电保护与自动控制等;
曾耿晖(1977-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护运行与控制等。