

DOI: 10.7667/PSPC151135

变压器低压侧小区差动保护的思考

冯国东

(上海思弘瑞电力控制技术有限公司, 上海 201108)

摘要: 根据变压器低压侧小区差动保护原理和动作方程, 推导出低压侧不同故障类型时该保护的动作为。由推导发现, 当低压侧绕组内部特定处相间短路时, 非故障相差动会动作。同时详细分析了不同故障类型时, 流经变压器各侧短路电流的幅值和相位。综合分析得出: 由于变压器低压侧绕组采用三角形接法, 其绕组内相间短路时各相相互影响, 三角形绕组内短路电流会形成环流, 从而导致了非故障相差动动作。该结论对于工程事故分析具有一定的指导意义。

关键词: 低压侧小区差动; 分相差动; 相间短路; 绕组 TA; 环流; 三角形接法

Thoughts on the low voltage side transformer differential protection

FENG Guodong

(Shanghai SHR Electrical Power Technology Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

Abstract: According to principle and equation of low voltage side differential protection, this paper deduces its behavior when different type faults occurred at low side. It is discovered that the non fault phase differential protection acted when phase-to-phase fault occurred at specific place inside low side winding. Meanwhile, it analyzes in detail amplitude and phase when short circuit current went through transformer under different type faults occurred at low side. In summary, due to low voltage side winding adopting delta connection, each phase influences others when phase-to-phase fault occurred inside the winding, the short circuit current will go through the delta winding which leads to the non fault phase differential action. This conclusion has certain directive significance to the engineering accident analysis.

Key words: low voltage side differential protection; split phase differential protection; phase-to-phase fault; winding CT; circulating current; delta connection

0 引言

500 kV 变压器主保护一般配置如下: 配置纵差保护或分相差动保护, 若仅配置分相差动保护, 在低压侧有外附 TA 时, 应配置不需整定的低压侧小区差动保护, 如图 1 所示。

其中, 纵差保护是指由变压器各侧外附 TA 构成的差动保护, 该保护能反映变压器各侧的各类故障, 由图 1 中 TA1、TA4、TA7 和 TA3、TA6、TA9 构成; 分相差动保护是指将变压器的各相绕组分别作为被保护对象, 由每相绕组的各侧 TA 构成的差动保护, 该保护能反映变压器某一相各侧全部故障, 由图 1 中 TA1 和 TA2 构成(A 相为例); 低压侧小区差动保护是由低压侧三角形两相绕组内部 TA 和一个反映两相绕组差电流的外附 TA 构成的差动保护, 由图 1 中 TA2、TA5 和 TA3 构成(A 相为例)^[1-2]。

低压侧小区差动保护主要应用于自耦变压器, 其采用的 TA 有别于常规差动保护中所用 TA, 因而该保护具有特殊性。本文着重论述低压侧区内外相间故障时差动保护的动作为。由于三相短路时各相短路电流仍具有对称性, 不失一般性, 同时为了方便推导, 本文以变比 $N=1$ 的 Y0/d-11 双绕组降压

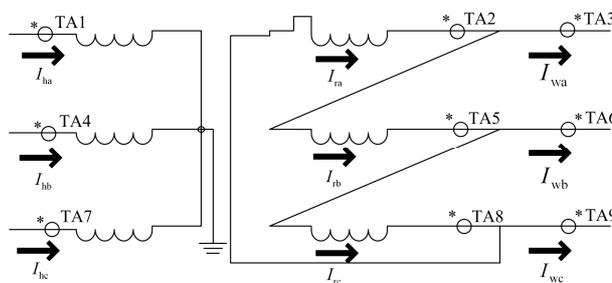


图 1 500 kV 变压器保护 TA 配置

Fig. 1 TA configuration of 500 kV transformer protection

变压器为例, 分析其低压侧不同故障点处 AB 相间短路, 该保护的動作行为, 找出其有别于常规差动保护之处。另外, 由于低压侧小区差动保护须和分相差动保护一起配置, 因而本文在论述各故障点处 AB 相间短路时也简要分析此时分相差动保护的動作行为。

图 1 中, I_{ha} 、 I_{hb} 和 I_{hc} 为高压侧绕组 TA 三相电流, I_{ra} 、 I_{rb} 和 I_{rc} 为低压侧绕组 TA 三相电流, I_{wa} 、 I_{wb} 和 I_{wc} 为低压侧外附 TA 三相电流。

1 低压侧小区差动保护

低压侧小区差动保护电流取自变压器低压侧外附电流互感器和低压侧三角内部绕组电流互感器, 能反映变压器低压侧各类相间故障。其動作方程如式(1)~式(3)所示。

$$\begin{cases} I_{op} \geq 0.5 \times I_e \\ I_{op} \geq 0.5 \times I_{res} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_{op.a} = \dot{I}_{wa} - \dot{I}_{ra} + \dot{I}_{rb} \\ I_{op.b} = \dot{I}_{wb} - \dot{I}_{rb} + \dot{I}_{rc} \\ I_{op.c} = \dot{I}_{wc} - \dot{I}_{rc} + \dot{I}_{ra} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} I_{res.a} = \text{Max} \{ I_{wa}, I_{ra}, I_{rb} \} \\ I_{res.b} = \text{Max} \{ I_{wb}, I_{rb}, I_{rc} \} \\ I_{res.c} = \text{Max} \{ I_{wc}, I_{rc}, I_{ra} \} \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_{op} 为動作电流; I_{res} 为制动电流; I_e 为低压侧外附 TA 额定电流。其中 I_e 按变压器低压侧额定容量计算。 $I_{op.a}$ 、 $I_{op.b}$ 和 $I_{op.c}$ 分别为各相動作电流, $I_{res.a}$ 、 $I_{res.b}$ 和 $I_{res.c}$ 分别为各相制动电流。

低压侧小区差动保护動作特性和保护逻辑分别如图 2 和图 3 所示^[3]。

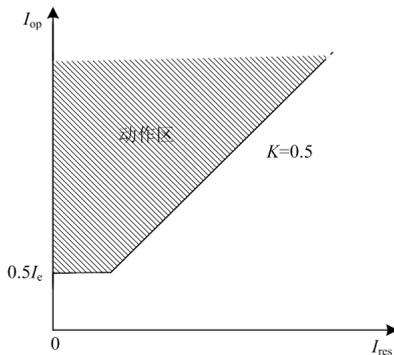


图 2 低压侧小区差动作特性

Fig. 2 Characteristics of low voltage side differential protection

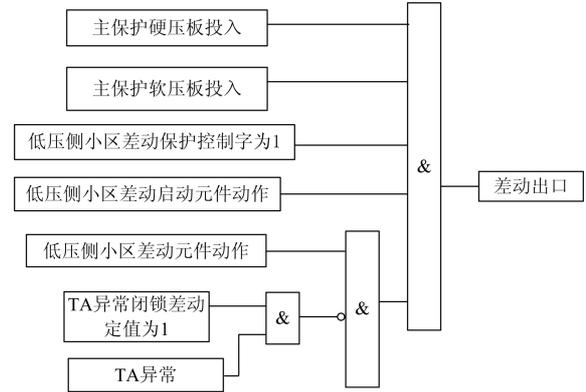


图 3 低压侧小区差动保护逻辑图

Fig. 3 Logic diagram of low voltage side differential protection

2 低压侧小区差动保护動作行为分析

根据低压侧小区差动保护各侧 TA 位置, 分别设置 4 处故障点, 依次分析各处 AB 相间短路时流经各侧 TA 的短路电流、低压侧小区差动保护和分相差动保护的動作行为。

2.1 低压侧小区差动区外相间短路

如图 4 中 M 和 N 两点所示, 该处相间短路对于低压侧小区差动保护而言属于区外故障, 流经各侧 TA 的电流均为穿越性电流, 低压侧小区差动应可靠不误动。此时流经各侧 TA 的短路电流如图 4 所示。

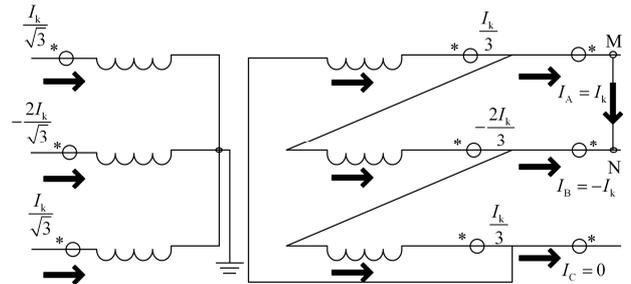


图 4 低压侧小区差动区外 AB 相间短路时电流分布

Fig. 4 Current distribution when AB phase-to-phase occurred outside of low voltage side differential protection

此时各相差动电流如式(4)所示。

$$\begin{cases} I_{op.a} = \dot{I}_{wa} - \dot{I}_{ra} + \dot{I}_{rb} = I_k - \frac{I_k}{3} - \frac{2I_k}{3} = 0 \\ I_{op.b} = \dot{I}_{wb} - \dot{I}_{rb} + \dot{I}_{rc} = -I_k + \frac{2I_k}{3} + \frac{I_k}{3} = 0 \\ I_{op.c} = \dot{I}_{wc} - \dot{I}_{rc} + \dot{I}_{ra} = 0 - \frac{I_k}{3} + \frac{I_k}{3} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, I_k 为变压器低压侧两相短路时的短路电流, 下同, 其他符号含义同前。

从上述分析中可以看出,此时各相差动电流均很小(考虑到差动回路有不平衡电流,实际差动电流并不为0),低压侧小区差动保护可靠不误动。

该故障点对于分相差动保护亦属于区外故障,从图4短路电流分布可以分析出,流经分相差动保护各TA的电流均为穿越性电流,分相差动保护在此种故障下可靠不误动^[4-5]。

2.2 低压侧小区差动区内相间短路

如图5中M和N两点所示,该处相间短路对于低压侧小区差动保护属于区内故障,低压侧小区差动保护应动作。此时流经各侧TA的短路电流如图5所示。

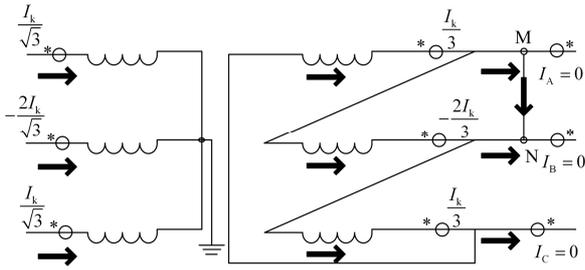


图5 低压侧小区差动区内AB相间短路时电流分布

Fig. 5 Current distribution when AB phase-to-phase occurred inside of low voltage side differential protection

此时各相差动电流如式(5)所示。

$$\begin{cases} I_{op.a} = \dot{i}_{wa} - \dot{i}_{ra} + \dot{i}_{rb} = 0 - \frac{I_k}{3} - \frac{2I_k}{3} = -I_k \\ I_{op.b} = \dot{i}_{wb} - \dot{i}_{rb} + \dot{i}_{rc} = 0 + \frac{2I_k}{3} + \frac{I_k}{3} = I_k \\ I_{op.c} = \dot{i}_{wc} - \dot{i}_{rc} + \dot{i}_{ra} = 0 - \frac{I_k}{3} + \frac{I_k}{3} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

依据低压侧小区差动动作方程,则在上述制动电流下对应的三相差动电流如公式(6)所示。

$$\begin{cases} I'_{op.a} = 0.5 \times I_{res.a} = \frac{I_k}{3} < I_{op.a} \\ I'_{op.b} = 0.5 \times I_{res.b} = \frac{I_k}{3} < I_{op.b} \\ I'_{op.c} = 0.5 \times I_{res.c} = \frac{I_k}{6} > I_{op.c} \end{cases} \quad (6)$$

可以看出,此时低压侧小区差动A、B两相差动保护动作,符合短路类型。

该故障对于分相差动保护同样属于区外故障,从图5短路电流分布可以分析出,分相差动保护在此种故障下亦可靠不误动^[6-8]。

2.3 低压侧小区差动区内外相间短路类型1

如图6中M和N两点所示,M点属于低压侧小区差动保护范围内,N点属于差动保护范围区外。此时流经各侧TA的短路电流如图6所示。

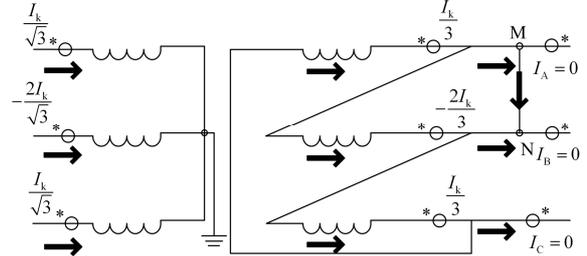


图6 低压侧小区差动区内外AB相间短路类型1电流分布

Fig. 6 Current distribution when AB type 1 phase-to-phase occurred inside and outside of low voltage side differential protection

该图中流过各TA短路电流幅值和方向均与图5相同,结论亦同上^[9-11]。

2.4 低压侧小区差动区内外相间短路类型2

如图7中M和N两点所示,M点属于低压侧小区差动保护范围外,N点属于差动保护范围内。此时各侧TA的短路电流如图7所示。

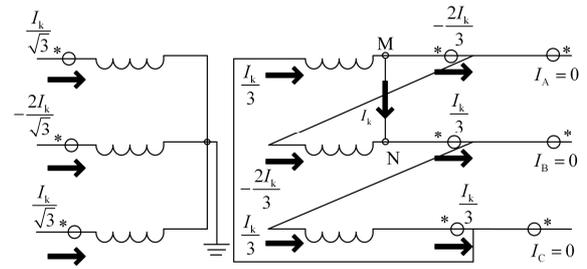


图7 低压侧小区差动区内外AB相间短路类型2电流分布

Fig. 7 Current distribution when AB type 2 phase-to-phase occurred inside and outside of low voltage side differential protection

此时各相差动电流如式(7)所示。

$$\begin{cases} I_{op.a} = \dot{i}_{wa} - \dot{i}_{ra} + \dot{i}_{rb} = 0 + \frac{2I_k}{3} + \frac{I_k}{3} = I_k \\ I_{op.b} = \dot{i}_{wb} - \dot{i}_{rb} + \dot{i}_{rc} = 0 - \frac{I_k}{3} + \frac{I_k}{3} = 0 \\ I_{op.c} = \dot{i}_{wc} - \dot{i}_{rc} + \dot{i}_{ra} = 0 - \frac{I_k}{3} - \frac{2I_k}{3} = -I_k \end{cases} \quad (7)$$

依据低压侧小区差动动作方程,则在上述制动电流下对应的三相差动电流如式(8)所示。

$$\begin{cases} I'_{op.a} = 0.5 \times I_{res.a} = \frac{I_k}{3} < I_{op.a} \\ I'_{op.b} = 0.5 \times I_{res.b} = \frac{I_k}{6} > I_{op.b} \\ I'_{op.c} = 0.5 \times I_{res.c} = \frac{I_k}{3} < I_{op.c} \end{cases} \quad (8)$$

可以看出,此时低压侧小区差动 A、C 两相差动保护动作,不符合短路类型。

从图 7 中还可以分析出,该故障对于分相差动保护属于区内故障,此时分相差动各相差流如公式(9)所示。

$$\begin{cases} I''_{op.a} = \dot{i}_{ha} - \dot{i}_{ra} = \frac{I_k}{\sqrt{3} \times \sqrt{3}} + \frac{2I_k}{3} = I_k \\ I''_{op.b} = \dot{i}_{wb} - \dot{i}_{rb} = -\frac{2I_k}{\sqrt{3} \times \sqrt{3}} - \frac{I_k}{3} = -I_k \\ I''_{op.c} = \dot{i}_{wc} - \dot{i}_{rc} = \frac{I_k}{\sqrt{3} \times \sqrt{3}} - \frac{I_k}{\sqrt{3} \times \sqrt{3}} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

无需再验算,此时分相差动 A、B 两相差动保护动作,符合短路类型^[12-13]。

上述 4 处故障实则为同一电气点,短路电流均为 I_k ,只是不同故障处流经各 TA 的短路电流分布略有区别^[14]。

其中,2.1 节和 2.2 节所描述故障属于典型的经 Y0/d-11 变压器传变后的短路电流计算,诸多文献中均有详细推倒;2.3 节和 2.4 节所描述故障属于三角绕组内部相间短路,文献[14]在校验直流换流站星角换流变压器差动保护灵敏度时对该处相间短路时流经换流变各侧 TA 的短路电流有详细分析和 MATLAB 建模仿真,本文不再详述^[15-16]。

3 结语

综上所述,本文分析了变压器低压侧不同故障类型相间短路时,低压侧小区差动及分相差动保护的動作行为。最后得出:对于低压侧小区差动保护,由于低压侧绕组采用三角形接法,其绕组内特定处相间短路时各相相互影响,三角形绕组内短路电流会形成环流,从而会导致非故障相差动动作。该结论对于工程事故分析具有一定的指导意义。

参考文献

[1] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

- [2] 国家电力调度通信中心. 国家电网继电保护培训教材[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [3] 高春如. 大型发电机组继电保护整定计算与运行技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [4] 王维俭. 电气主设备继电保护原理和应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [5] 刘家军, 徐玉洁, 罗明亮. 直流输电中换流变压器零序过流保护的探讨[J]. 中国电力, 2014, 47(6): 22-25.
LIU Jiajun, XU Yujie, LUO Mingliang. Investigation on converter transformer's zero-sequence over-current in HVDC system[J]. Electric Power, 2014, 47(6): 22-25.
- [6] 张健康, 粟小华, 夏芸. 750 kV 变压器保护配置及整定计算探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 89-94.
ZHANG Jiankang, SU Xiaohua, XIA Yun. Discussion on protection configuration and setting calculation for 750 kV transformer[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 89-94.
- [7] 颜丽娟, 杨淑英, 倪腊琴, 等. 500 kV 中性点经小电抗接地 自耦变压器后备保护整定计算的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 77-81.
YAN Lijuan, YANG Shuying, NI Laqin, et al. Study on backup protection setting for 500 kV auto transformer with neutral point grounding by small reactance[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 77-81.
- [8] 宋小会, 杨建翔, 郭志忠, 等. 交流特高压变电站站用变保护技术方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 110-115.
SONG Xiaohui, YANG Jianxiang, GUO Zhizhong, et al. Protection of station transformer of UHV AC substation station technology solutions[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 110-115.
- [9] 张健康, 粟小华, 胡勇, 等. 智能变电站保护用电流互感器配置问题及解决措施[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 140-145.
ZHANG Jiankang, SU Xiaohua, HU Yong, et al. Problems and solutions of configuration scheme of current transformer used by protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 140-145.
- [10] 承文新, 刘志超. 变压器差动保护涌流制动原理分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(11): 90-92.
CHENG Wenxin, LIU Zhichao. Analysis of inrush restraint theory for transformer differential protection[J].

- Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11): 90-92.
- [11] 王文浩, 何文林, 卢孔实, 等. 电力变压器状态仿真技术研究[J]. 高压电器, 2014, 50(12): 66-70.
WANG Wenhao, HE Wenlin, LU Kongshi, et al. State emulation technology for power transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12): 66-70.
- [12] 孙鸣, 石婷婷, 门富媛. 特高压变压器短路电压比取值的分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(5): 56-61.
SUN Ming, SHI Tingting, MEN Fuyuan. Analysis of UHV transformer short-circuit voltage ratio[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(5): 56-61.
- [13] 李本瑜, 辜新宇, 张凯. 变压器中性点接地刀闸自动控制技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(3): 69-73.
LI Benyu, GU Xinyu, ZHANG Kai. Study on transformer neutral point ground switch automatic switching technology[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(3): 69-73.
- [14] 郝俊芳. 直流换流站星角换流变差动保护的灵敏度校验[J]. 中国电力, 2014, 47(9): 118-121.
HAO Junfang. Research on sensitivity checking of Wye/delta converter transformer differential protection in DC converter station[J]. Electric Power, 2014, 47(9): 118-121.
- [15] 李国庆, 谭龙, 王振浩, 等. 单相接地故障对换流器内部环流影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 1-7.
LI Guoqing, TAN Long, WANG Zhenhao, et al. Research of the influence on the circulation for AC system single-phase ground fault[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 1-7.
- [16] 牟龙华, 姜斌, 童荣斌, 等. 微电网继电保护技术研究综述[J]. 电器与能效管理技术, 2014(12): 1-7.
MU Longhua, JIANG Bin, TONG Rongbin, et al. Overview on micro-grid relay protection[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2014(12): 1-7.

收稿日期: 2015-07-03; 修回日期: 2016-02-23

作者简介:

冯国东(1967-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护装置的研究和开发。E-mail: fengguodong10000@sohu.com

(编辑 张爱琴)