

变压器纵联差动保护的分析与探讨

潘丁¹, 陈喜峰²

(1. 许继电气保护及自动化事业部, 河南 许昌 461000; 2. 许昌市电业局, 河南 许昌 461000)

摘要: 变压器纵联差动保护构成的原理具有较大的近似性, 而且部分保护参数具有不确定性。针对目前变压器纵联差动保护应用中的特点和现状, 提出优化变压器纵联差动保护动作参数和动作逻辑的具体办法, 经现场运行和具体事故分析, 表明可以提高变压器纵联差动保护的运行水平。

关键词: 变压器; 差流; 纵联差动保护; 综合制动

中图分类号: TM772 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)04-0022-04

0 引言

变压器纵联差动保护在电力系统中是比较成熟和重要的一种保护方式, 应用广泛, 原理成熟。但作为变压器纵联差动保护, 要切实满足继电保护速动性、可靠性、正确性的要求, 除进一步提高保护装置的可靠性外, 还需要在工作原理、整定计算等多方位进行改进和探讨, 本文提出对变压器纵联差动保护多方位优化和改进, 可以大大提高纵联差动保护的可靠性和正确动作率。

1 变压器差动保护动作参数的改进

1.1 差动保护动作灵敏度的改进

根据是 GB14285《继电保护和安全自动装置技术规程》(1993), 规定了变压器差动保护灵敏系数必须大于 2, 但明确指出是对电磁式继电保护的规定。随着数字式微机保护的普及, 尤其是数字信号处理器 DSP (Digital signal processing)、高精度 A/D 芯片及 CPLD (复杂可编程逻辑器件) 在继电保护中得到应用, 进一步提高了数据处理能力和运算速度, 所以微机保护都具备了动作离散值小、动作明确的特点。考虑到互感器的误差, 微机变压器差动保护灵敏系数降到 1.4 ~ 1.6 完全可以满足灵敏性的要求。

1.2 差动保护动作时间的改进

目前变压器纵联差动保护动作时间一味的强调了动作的速度, 却忽略了变压器纵联差动保护的的特殊性, 即变压器纵联差动保护构成的原理具有较大的近似性, 而且部分保护参数具有不确定性, 如变压器空载合闸角、变压器铁芯的剩磁及工作磁通与饱和磁通的关系等。变压器内部故障切除时间, 国际

标准 IEC76 - 5(1976)《电力变压器 第五部分 承受短路能力》规定, 当使用部门未提出其它要求时, 用于计算承受短路耐热能力的电流 I 持续时间为 2 s, 对自耦变压器和短路电流超过 25 倍额定电流的变压器, 经制造厂与使用部门协商后, 采用的短路电流的持续时间可小于 2 s。根据以上变压器制造和设计规范, 变压器在内部故障时 0.5 s 内能切除, 在外部故障时 1 s 内能切除, 均可保证变压器的安全性。在上述基础上, 再将切除一般故障的时间标准缩短一半, 可以确保变压器的安全性, 所以其动作时间可在其现有动作时间基础上适当延长, 整组动作时间延长至 60 ~ 100 ms 之间跳闸是可行的, 将会大大降低区外故障和空载充电时误动的可能性。同时, 当区内故障电流较大, 差流速断保护可以迅速跳闸 (差流速断整组跳闸时间 $t = 30$ ms)。这样即可快速切除具有较大差流的区内故障, 又可在很大程度上降低区外故障误动的几率 (变压器本身满足国标承受短路耐热能力的要求)。

1.3 适度调整差动保护动作电流和制动电流

根据 DL/T684《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》规定, 比率制动特性动作电流和制动电流整定范围为:

1) 最小动作电流为 0.2 ~ 0.5 倍主变压器额定电流, 一般工程宜采用不小于 0.3 倍主变压器额定电流。

2) 起始制动电流为 0.8 ~ 1.0 倍主变压器额定电流。

经过多年的运行考验, 按上述导则规定的整定值, 过于灵敏, 造成区外故障误动作的情况不少, 尤其是厂矿、企业用变压器保护。将差动保护最小动作电流适当提高 (如取 0.6 ~ 0.8 倍主变压器额定电

流,对钢厂企业变压器建议取 0.8 倍主变压器额定电流),起始制动电流适当降低(如取 0.5~0.6 倍主变压器额定电流),整体上不会降低区内故障差动保护动作的灵敏度,又提高了差动保护动作的可靠性。

实践证明,按照以上三原则适度调整定值,可以大大提高变压器纵联差动保护运行水平。

2 变压器差动保护动作逻辑的改进

2.1 提高保护抗 CT 暂态饱和的能力,提高程序判别的可靠性

变压器差动保护原理是建立在变压器稳态磁路平衡基础上的,是差动保护原理的一种拓展,不具有 100% 的准确度,而且这种平衡受其它因素影响较大,其中 CT 暂态过程中这种平衡关系将被打破,只有等到暂态过程衰减后,这种原先的平衡关系才能重新建立,因此变压器纵联差动保护需要有检测这种暂态特性的功能。研究表明,单纯比率制动特性的差动保护是无法躲过由于 CT 暂态饱和引起的差动保护误动。解决 CT 饱和而引起区外故障误动,除了提高电流互感器的准确限值系数外,按照 CT 饱和的特性,可以考虑在故障启动时循环检测 CT 运行工况,当检测到 CT 饱和时,采取限制措施防止误动。

2.2 综合制动逻辑判别在变压器纵联差动保护中的应用

2.2.1 励磁涌流特性分析

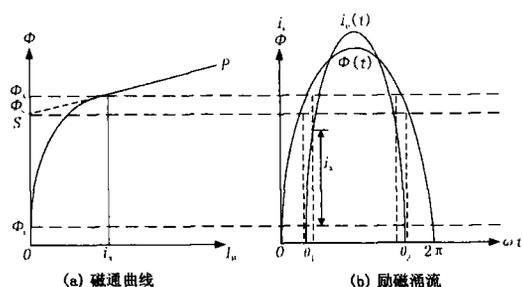


图 1 空投励磁涌流曲线图

Fig 1 No-load inrush current curve of the transformer

利用铁芯磁化曲线和磁通曲线 $\Phi(t)$ 可以画出励磁涌流在 $0 \sim 2\pi$ 内的电流波形如图 1 中的 $i_k(t)$ 。从图 1 中可以看出励磁涌流在一个周期内有两段 $0 \sim \theta_1$ 和 $\theta_2 \sim 2\pi$ 的值约为 0,即存在间断角。暂态磁通 $\Phi_{\max} \cos$ 和剩磁 Φ_r 实际空投都是衰减的,所以 $i_k(t)$ 也是逐步衰减的,将多个图中的 $i_k(t)$ 连起来,就可以得到空投的励磁涌流波形。

根据励磁涌流以非周期分量和谐波分量的形式出现,而且以二次谐波为主,含有其它高次谐波,存在间断角的特点来采用二次谐波、间断角原理制动目前应用相当广泛,但是,由于一些不确定外部因素的影响,仍不能达到预期的效果。采用综合相二次谐波制动原理、波形对称原理并行制动判别逻辑,可大大提高变压器纵联差动保护动作的可靠性和正确率。

2.2.2 采用差动电流中二次谐波最大值与基波最大值的比值来闭锁三相差动保护,即综合相制动逻辑

$$\frac{I_{2\max}}{I_{1\max}} > K_2 \quad (1)$$

$I_{1\max}$ 为差动电流中的最大基波电流; $I_{2\max}$ 为差动电流中的最大二次谐波; K_2 为谐波制动系数,一般整定范围为 0.15~0.20。

采用 32 位浮点 DSP 技术,其程序对基波和二次谐波均采用全周傅氏算法,每周采样 24 个点,程序判别出三相差动电流中最大二次谐波与最大基波电流比值大于定值 K_2 后,闭锁比率差动保护 6~10 ms

设 $x(t)$ 是周期函数,除基波分量外,还含有各次谐波和不衰减的直流分量,则 $x(t)$ 可表示为:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} [a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)] \quad (2)$$

就变压器纵联差动保护而言,考虑 CT 暂态饱和的因素,只要求计算出直流分量、基波、二次谐波、三次谐波分量。

式中:自然数 $n=0, 1, 2, 3$ (其它高次谐波在此忽略,不作考虑);

a_n, b_n 分别为各次谐波(包括基波)正弦项、余弦项的振幅, b_0 是直流分量值,根据傅氏滤波方程:

$$\begin{cases} a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(n\omega t) dt \\ b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(n\omega t) dt \end{cases} \quad (3)$$

式中: T 是 $x(t)$ 的周期。

微机保护处理时,采用梯形法则可求得式(3)的积分值(N 为保护在一个工频周期内的采样点,这里取 24, $x(k)$ 为 $x(t)$ 在 t_k 时刻的采样值)。

当 $n=1$ 时,基波分量:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^{24} x(k) \sin(k\frac{\pi}{12}) \\ b_1 = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^{24} x(k) \cos(k\frac{\pi}{12}) \end{cases} \quad (4)$$

同理,当 $n=2$ 时,二次谐波分量:

$$\begin{cases} a_2 = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^{24} x(k) \sin(k\frac{\pi}{6}) \\ b_2 = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^{24} x(k) \cos(k\frac{\pi}{6}) \end{cases} \quad (5)$$

综合相逻辑制动兼顾了区外故障电压恢复或空载合闸、合闸于故障及内部故障,降低了区外故障电压恢复或空载合闸某相谐波含量较低时,造成误动作的可能,同时降低了在变压器内部故障或(空载)合闸于故障时,差动电流中含有二次谐波,引起差动保护拒动或延时动作的可能。所以,这种综合相闭锁逻辑全面涵盖了变压器故障特点,可以较好的识别励磁涌流和内部故障,是一种综合性较强的二次谐波闭锁逻辑。

2.2.3 采用三相差流波形的对称度值来闭锁三相差动保护的逻辑

假设差动电流为 $i_d(t)$,对其差分滤波后得到 $i_d(n)$,令 S_- 、 S_+ 分别为:

$$\begin{aligned} S_- &= |i_d(t) + i_d(t - \frac{T}{2})| = |i_d(n) + i_d(n - \frac{N}{2})| \\ S_+ &= |i_d(t) - i_d(t - \frac{T}{2})| = |i_d(n) - i_d(n - \frac{N}{2})| \\ \frac{S_-}{S_+} &> K \end{aligned} \quad (6)$$

式中: K 为衡量波形对称度值的一个固定常数, S_- 称为制动量、 S_+ 称为动作量。

根据励磁涌流波形存在间断角,且在一个工频周期内不对称角度 $\alpha = 120^\circ$ 的特点(实际故障电流在一个工频周期内不对称角度 $\alpha = 30^\circ$),当 $i_d(t)$ 是故障电流时, $S_- = 0, S_+ \neq 0$;当 $i_d(t)$ 是励磁涌流时, $S_- \neq 0, S_+ = 0$ 。考虑到故障电流可能含有较多高频分量和非周期分量,取不对称角度 $\alpha = 80^\circ \sim 90^\circ$ 为不对称角度值的临界角度,这样可以适应励磁涌流和故障电流的区分和判断。这种闭锁原理具有对铁芯剩磁适应能力强,合闸于内部故障的变压器时保护动作迅速,且受其它外部条件影响较小,综合适应故障能力较强。

2.2.4 综合相二次谐波、波形对称判别逻辑综合制动使用

波形对称原理,是反映波形的对称度,实质上是对故障电流和励磁涌流的综合反映。二次谐波原理是利用波形所含有二次谐波的数学特征来实现谐波分量制动。所以,每种闭锁逻辑都不能涵盖全部,这是由于故障电流和励磁涌流本身存在部分相同的数

学特征,如区外故障 CT暂态时,会产生一定的非周期分量,大容量高电压等级系统变压器空载合闸时励磁涌流可能会较小,长线路或电缆线路连接的变压器内部故障时也可能含有相当数量的二次谐波分量。

所以,采用综合相二次谐波逻辑与波形对称并行综合制动可以较好的适用于变压器纵联差动保护(见图 2)。

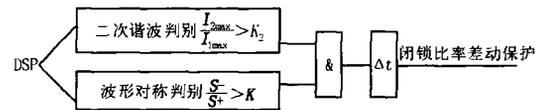


图 2 综合制动逻辑框图

Fig 2 Synthesical restraint logic

这种综合制动判别措施,既可以很好的适应准确判别故障,区内故障动作迅速,区外故障闭锁可靠,避免误动;而且还可以很好的解决剩磁、电压等级等外部因素对励磁涌流制动的干扰,具有较强的环境适应能力和判别能力。

3 误动分析举例

如某 110 kV 变电站变压器主保护 WBH - 812 差动保护装置在建成投运期间发生误动事故。其程序对基波和二次谐波均采用全周傅里叶算法,每周采样 24 个点,程序判别出三相差动电流中最大二次谐波与最大基波电流比值大于定值后闭锁比率差动保护 6 ms,反之,程序判别出三相差动电流中最大二次谐波与最大基波电流比值小于定值 6 ms 后开放比率差动保护。

保护谐波制动系数: $K_2 = 0.15$

如图 3、4 所示,由故障录波数据提炼出的三相差流中最大二次谐波与基波比值可以清楚的看出。

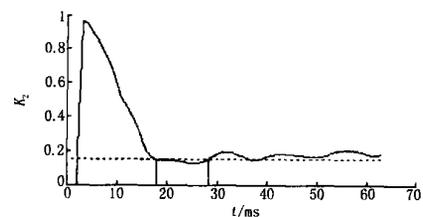


图 3 最大二次谐波电流与最大基波电流比

Fig 3 Max second harmonics current divided by max fundamental current

$\frac{I_{2max}}{I_{1max}} < K_2$ 的时间 ($t = 17.9 \text{ ms} \sim 27.2 \text{ ms} = 9.3 \text{ ms} > 6 \text{ ms}$) 已完全满足开放比率差动保护的条件,

名称	基波	直流分量	2次谐波		
装置电源电压	0.000∠-43.6°	5.009	99999%	0.000∠-76.7°	139.3%
主变高压侧A相电流	4.998∠147.0°	-4.64	92.83%	0.727∠23.1°	14.54%
主变高压侧B相电流	3.072∠-6.5°	2.447	79.84%	0.626∠-99.8°	20.37%
主变高压侧C相电流	2.840∠-61.9°	2.276	80.13%	0.751∠158.2°	26.80%
主变中压侧A相电流	0.006∠-108.4°	0.094	1459%	0.003∠140.4°	49.01%
主变中压侧B相电流	0.003∠-58.2°	0.008	242.6%	0.004∠11.6°	123.9%
主变中压侧C相电流	0.004∠-170.4°	0.002	47.44%	0.002∠97.1°	57.46%
主变低压侧A相电流	0.001∠-155.7°	-0.001	178.8%	0.004∠146.6°	767.3%
主变低压侧B相电流	0.003∠-123.7°	0.002	46.49%	0.002∠150.0°	50.23%
主变低压侧C相电流	0.008∠-169.6°	0.015	201.2%	0.004∠159.1°	52.27%
主变第4侧C相电流	0.003∠51.7°	-0.003	114.9%	0.002∠141.7°	79.35%
主变第4侧B相电流	0.002∠55.5°	0.002	114.2%	0.002∠-35.4°	153.8%
主变第4侧A相电流	0.003∠-88.8°	0.011	422.8%	0.001∠75.0°	34.76%

图4 差动保护动作故障波形分析图

Fig 4 Faulty wave analysis of the percentage differential protection

所以差动出口符合程序开放条件。但如果附加波形对称制动判别,从故障录波数据分析,取不对称角度 $=80^\circ\sim 90^\circ$ 为不对称角度值的临界角度,这样,A、B、C三相全满足制动的要求。所以采用波形对称判别逻辑将完全可以避免二次谐波制动出现死区时导致差动保护的误动作。

4 结束语

综合上述分析,二次谐波制动原理的变压器保护,经过长时间的现场运行,绝大部分情况下是可以很好运行的,但随着外部条件的不同和变化,单原理逻辑制动很难满足所有的情况,但采取动作参数及

制动逻辑的改进,可大大提高差动保护动作的准确性和可靠性。但由于变压器差动保护的的特殊性,仅从原理上不能确保变压器差动保护正确动作率,还必须在定值整定等各方面来采取措施。

参考文献:

- [1] 李宏任.实用继电保护[M].北京:机械工业出版社,2002.
LI Hong-ren The Applied Protective Relaying[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [2] 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.
XU Zheng-ya Digital Protection for Power Transformer and Medium-Low Voltage Electric Power Net[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004.
- [3] 中国电力企业联合会标准化部.电力工业标准汇编第三分册 电机及变压器类[M].北京:中国电力出版社,1994.
Department of Standardization, China Electricity Council China Electric Power Standard Collection, Third Book, Part of Electrical Machine and Transformer [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1994.

收稿日期: 2005-07-20; 修回日期: 2005-08-17

作者简介:

潘丁(1976-),男,助理工程师,主要从事电力系统保护及自动化技术支持工作; E-mail: panding@xjgc.com

陈喜峰(1972-),男,工程师,主要从事电力系统继电保护管理工作。

Analysis of the transformer pilot differential protection

PAN Ding¹, CHEN Xi-feng²

(1. XJ Electric Protection & Automation Business Department, Xuchang 461000, China;

2. Xuchang Power Supply Bureau, Xuchang 461000, China)

Abstract: The theories of the transformer pilot differential protection are of similarity and the part of protection parameters are of uncertainty. According to the characteristic and present state of the transformer pilot differential protection, this paper puts forward its optimizing action parameter and action logic method. Practical operation and fault analysis verify that the method can advance the running level of the transformer pilot differential protection.

Key words: transformer; differential current; pilot differential protection; synthetical restraint

三峡工程成为我国技术引进消化吸收再创新的成功范例

举世瞩目的“三峡工程”不仅工程总量和装机容量位居世界第一,而且是当今世界技术水平最高的水电工程。更为重要的是,三峡工程充分发挥国家重大工程对技术创新的带动作用,形成了引进消化吸收再创新的“三峡模式”,实现了我国水电装备技术水平和自主创新能力的跨越。