

基于二次谐波的自适应制动涌流方案

刘小宝, 吴崇昊, 宋艳, 姜利华

(国网电力科学研究院/南瑞集团, 江苏南京 210003)

摘要: 讨论了几种二次谐波变压器差动保护的原理, 分析了各自的可靠性和灵敏性, 结果表明: 虽然采用二次谐波制动原理, 但是不同制动涌流的方式, 制动效果存在较大的差别。二次谐波制动原理在特高压大型变压器保护中的应用还有待进一步改进和完善。在总结二次谐波制动的特点后, 提出了改进的制动方式, 同时针对励磁和故障时直流衰减的不同提出了自适应二次谐波的制动方式。应用该方法差动保护明显优于采用传统二次谐波制动判据的保护, 具有较好的工程应用价值。

关键词: 变压器差动保护; 励磁涌流; 二次谐波制动

Adaptive secondary harmonic restraint method for inrush current

LIU Xiao-bao, WU Chong-hao, SONG Yan, JIANG Li-hua

(Static Grid Electric Power Research Institute/NARI, Nanjing 210003, China)

Abstract: This paper analyzes the differential protection principles for secondary harmonic transformer and discusses their reliability and sensitivity. The results show that different restraint inrush methods have different restraint effects. In the EHV transformer protection system, the restraint method should be improved. This paper puts forward a new restraint method based on the characteristic of secondary harmonic method. Meanwhile, based on the difference of DC decaying when excitation and fault, an adaptive secondary harmonic restraint method is proposed. The transformer differential protection applying the proposed method is evidently superior to traditional transformer differential protection based on secondary harmonic restraint criteria, so the proposed method is available for engineering application.

Key words: differential protection; inrush current; secondary harmonic restraint

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0131-04

0 引言

现场运行的绝大部分电力变压器均采用差动保护作为其主保护。众所周知, 采用该原理的关键问题是如何快速地将空投或切除外部故障引起的励磁涌流与故障电流相区分。现在主要采用二次谐波制动原理识别涌流的方案, 在实践中有较广泛的应用^[1-2]。

但二次谐波制动方法在原理上有其不足之处, 易受系统其它因素产生的谐波的影响。一方面随着变压器铁芯材料的改进, 导致其磁饱和点降低, 剩磁较高且合闸角满足一定条件时, 三相励磁涌流中二次谐波含量可能较小^[3]。另一方面, 在(特)高压电力系统中, 由于长输电线(或电缆)分布电容以及串补电容谐振的影响, 故障电流中的二次谐波含量可能远大于15%, 使得采用二次谐波制动的保护长延时出口。如果电流互感器特性较差(易饱和), 故障电流波形中的谐波分量将更大, 采用较低的谐波制动比的差动保护甚至无法出口^[4]。

因此, 有必要对现有的二次谐波制动方案进行分析, 从而优化变压器差动保护的性。

1 几种二次谐波制动原理分析

由于变压器铁芯磁化特性的非线性、剩磁和空载合闸时电压的初相角等因素的影响, 励磁涌流呈现严重的非线性变形, 远远偏离电压的正弦特征, 典型的励磁涌流波形显示出明显的非对称性^[5]。其中的偶次谐波远高于奇次谐波, 所以, 变压器保护一般采用二次谐波制动, 即:

$$\left| \frac{I_{2nd}}{I_{op_fund}} \right| > k_{2set} \quad (1)$$

二次谐波制动的变压器差动保护谐波比一般为0.15~0.20, 在绝大多数情况下, 它能够区分是励磁涌流, 还是内部短路电流, 但它有以下不足:

(1) Y/△接线的三相电力变压器, 常会出现所谓的“对称性”谐波。由于在Yn侧的CT二次电流流向差动回路的是两相电流之差, 同时由于“助增

电流的存在”，易使得和差流近似对称，而这种对称接近于“奇对称”，其偶次谐波含量很少^[7]。此时如用分相制动原理则变压器差动保护装置可能会误动作。

(2) 变压器外部存在长线分布电容、无功补偿电容时发生内部短路，此时由于谐振的原因会产生各种谐波分量。当其中的二次谐波分量的比重足够大时，保护被制动，直至此谐波分量衰减得足够小时，才能开放保护。这种延时，可达0.1~0.2 s，对变压器同样构成不利的影

因而需要对现有二次谐波制动方案进行研究，从而找到解决问题的方案，目前采用二次谐波制动的主要方案有：

1.1 单相制动单相方案

将公式(1)分别运用在A、B、C相上，当某相的二次谐波含量大于定值，则闭锁该相差动保护，否则开放该相差动保护^[8]。

在发生励磁涌流时，由于合闸角、剩磁的不同会出现各相的谐波含量也不一致，事实证明在励磁过程中会出现某相二次谐波含量小于7%的情况，如果单纯采用单相制动方案会出现误动的情况。

该方法可靠性较低，但灵敏性较高。

1.2 单相制动三相(交叉闭锁)方案

将公式(1)分别运用在A、B、C相上，当某相的二次谐波含量大于定值，则闭锁三相差动保护，当三相二次谐波含量均小于定值时才开放差动保护。

在变压器空投于区内故障时，会出现某相二次谐波含量较高，闭锁差动保护，随着故障的发展，三相二次谐波含量均小于定值时，保护才动作，造成保护延时。

在现实使用中采取了一些改进，采用三取二的方式，即只有两相二次谐波含量都大于定值时才闭锁差动保护。

该方法可靠性较高，但灵敏性较低。

1.3 平均二次谐波方案

将公式(1)进行改进，得：

$$\frac{1}{3} \left\| \frac{I_{A.2nd}}{I_{A.op_fund}} + \frac{I_{B.2nd}}{I_{B.op_fund}} + \frac{I_{C.2nd}}{I_{C.op_fund}} \right\| > k_{2set} \quad (2)$$

改进的公式采用平均二次谐波制动方案，即三相平均二次谐波比大于谐波制动比门槛，制动保护，否则开放保护，该方案较单相制动的可靠性增加^[9]。

该方案仅考虑二次谐波和基波比值平均，无法真实地反映各相谐波量实际的情况，在变压器空投于区内单相接地故障时，如果非接地相的二次谐波比较大，容易造成平均的二次谐波含量大于定值，

闭锁住差动。

1.4 基波和二次谐波相角闭锁方案

通过分析，在励磁涌流时，二次谐波的角度和基波角度存在一定的关系，当采用正弦模型时，二次谐波的角度和基波角度相差90°或者270°^[10-11]。

$$Angle = Angle(I_{2nd}) - Angle(I_{op_fund}) \quad (3)$$

其中： $Angle(I_{2nd})$ 为二次谐波的角度； $Angle(I_{op_fund})$ 为基波的角度。

当二次谐波和基波角度在90°或者270°时，可以适当提高二次谐波的制动比定值，否则降低二次谐波的制动比定值。

二次谐波角度和基波角度相差分析是建立在理想的涌流波形上，实际上由于△侧的助增效应和系统的谐波干扰造成二次谐波和基波的角度并不一定在90°或者270°附近，如果采用不当会出现误动的现象。

2 自适应的二次谐波制动原理

不同的二次谐波制动方式，其制动的效果是不一样的。本文根据现有的制动方式提出了利用平均谐波量，同时结合涌流时直流衰减情况自适应调节二次谐波量的单相制动方式。

2.1 利用平均谐波量的单相制动方式

从上面分析可以看出：虽然都采用二次谐波制动励磁涌流，但是不同的制动方式，制动的效果并不一样：有的灵敏度较低，但可靠性较高，有的灵敏度较高，但可靠性较低。因而有必要对二次谐波制动方式进行改进。

励磁涌流过程中，A、B、C三相的谐波含量各不相同，但一定会存在某一相或者某几相的谐波值较大，如果将各相的二次谐波值相加，形成二次谐波平均量：

$$I_{2nd_AV} = \frac{1}{3} \left(|I_{A.2nd}| + |I_{B.2nd}| + |I_{C.2nd}| \right) \quad (4)$$

然后将二次谐波平均量和各相基波值相比较，如果某相二次谐波大于定值就开放保护，否则闭锁保护，具体判据如式(5)所示：

$$\begin{cases} k_{ratio_A} = \frac{I_{2nd_AV}}{I_{A.op_fund}} \\ k_{ratio_B} = \frac{I_{2nd_AV}}{I_{B.op_fund}} \\ k_{ratio_C} = \frac{I_{2nd_AV}}{I_{C.op_fund}} \\ k_{ratio_x} > k_{2nd_set} \end{cases} \quad (5)$$

具体的示意图如图1所示。

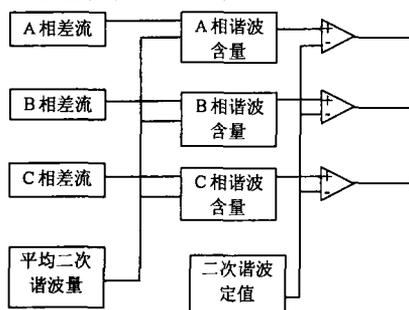


图1 平均谐波量的单相制动方式

Fig.1 Restraint method with summing-type harmonic sharing

通过二次谐波量平均值的方法, 保证在励磁涌流过程中发生故障, 即使非故障相有较大的谐波比, 但二次谐波平均量和故障相基波电流相比值会较小, 故障相保护仍会可靠地动作, 提高了保护的灵敏性。同时在励磁过程中出现一相二次谐波含量小于定值情况, 由于采用了二次谐波量平均值的方法可以提高该相的谐波比, 从而闭锁住差动保护, 提高保护的可靠性。

2.2 二次谐波制动系数的自适应

在发生故障的情况, 故障电流中的直流分量和励磁涌流中的直流分量衰减时间常数存在区别: 励磁涌流中的直流分量衰减较大, 衰减的时间较长。

在励磁涌流时直流分量较大, 且衰减较慢, 可以将一个周波的电流分成正半周和负半周, 令:

$$\begin{cases} \text{sum}_+ = \sum_{k=N}^1 i_k & (i_k > 0) \\ \text{sum}_+ = 0 & \end{cases} \quad \begin{cases} \text{sum}_- = \sum_{k=N}^1 i_k & (i_k < 0) \\ \text{sum}_- = 0 & \end{cases} \quad (6)$$

其中: k 为当前采样点; N 为一个周波的采样点数。

可以得到反映直流衰减情况的系数:

$$k_{dcr} = \frac{\min(\text{sum}_+, \text{sum}_-)}{\max(\text{sum}_+, \text{sum}_-)} \quad (7)$$

根据直流的衰减情况自动地调节二次谐波系数: 当直流衰减系数小于定值时, 自动将二次谐波的含量降低, 保证在故障时差动不受二次谐波闭锁, 相反当直流衰减系数大于定值时, 自动将二次谐波含量增加, 保证在励磁涌流时, 不会因为二次谐波含量较小而动作, 具体公式如式(8):

$$k_{ratio_x}(1 + (k_{dcr} - k_{dc_set})k_1) > k_{2nd_set} \quad (8)$$

其中: K_{2nd_set} 为二次谐波的定值; K_1 为二次谐波定值的自适应系数; K_{dc_set} 为衰减直流的内部定值。

K_{dc_set} 用来区分区内故障和励磁涌流时直流衰减情况, 当直流分量衰减较慢时自动地将谐波含量加大, 相反当直流分量衰减较快时甚至没有直流分量时, 将谐波含量适当的降低。

K_1 是根据直流的衰减情况调节二次谐波的定值。定值设置需要综合考虑保护的安全性和快速性, 在实际运行中 K_1 可以设置为1.0~1.4。 K_{dc_set} 设置为0.1。具体如图2所示。

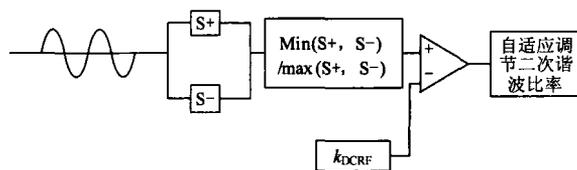


图2 二次谐波自适应原理

Fig.2 Secondary harmonic adaptive method

2.3 新判据在涌流时的性能

涌流时由于直流分量衰减较慢, 差流的正半周和负半周相差较大, 根据式(8)计算结果: 将差流中的谐波含量自动抬高, 能够有效地闭锁住差动。

以现场励磁涌流波形分析: ABC三相励磁涌流的直流分量较大, 且衰减较慢, 谐波含量如图3所示。

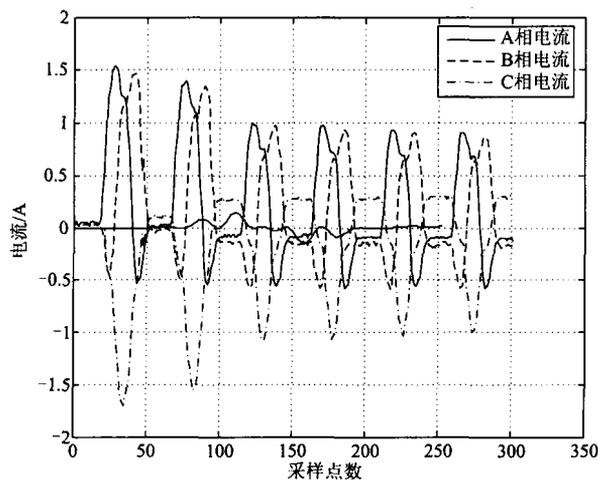


图3 现场三相励磁涌流波形

Fig.3 Transformer three-phase inrush current on site

各相的谐波含量如图4所示, 从图4可以看出二次谐波的含量有的相别较低, 甚至在10%左右, 如果不采取措施, 保护有可能误动, 采取式(8), 二次谐波含量自动调整, 具体调整的情况如表1所示。

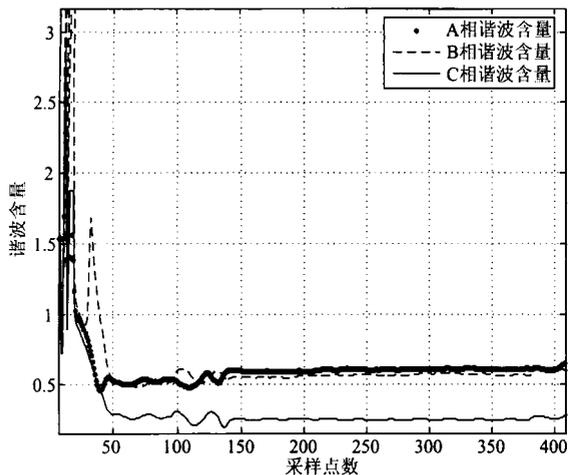


图4 三相谐波含量

Fig.4 Secondary harmonic ratio of three phase

表1 二次谐波自适应调整情况

Tab.1 Secondary harmonic ratio adaptive method result

周波谐波含量	调整前	调整后
0~20 ms最小谐波含量	70%	85%
20~40 ms最小谐波含量	35%	48%
40~60 ms最小谐波含量	13%	18%
60~80 ms最小谐波含量	16%	25%

2.4 新判据在空投故障时的性能

短路电流中直流分量的最大值发生在电压相角为0附近，由于绝缘击穿需要一定电压，产生的最大直流偏移的概率很小，当故障发生在电压幅值附近时，直流分量接近于0。

为了验证最严重的情况，按最大直流偏移情况考虑，假设电流互感器励磁阻抗为无穷大，二次侧直流分量的衰减时间常数即为一次侧短路电流的衰减时间常数，对于220~500 kV系统时间常数为60~100 ms，100 MW及以上的机组的衰减时间常数为140~280 ms。此时通过式(7)计算出来的 k_{dcr} 小于定值 k_{set} ， k_{set} 在设置时考虑系统最大衰减的时间常数因素。保证在故障时即使系统的衰减时间较大，但仍小于 k_{set} ，从而自适应的减小二次谐波量，不满足式(8)，保护动作。

3 结论

本文根据现有的制动方式提出了利用平均谐波量，同时结合直流自适应调节二次谐波含量的单相制动方式。在区内故障时，可以自适应降低故障相二次谐波的含量，不闭锁差动保护。在励磁涌流时，自适应地抬高二次谐波的含量，可靠地闭锁差动。

应用该方法的差动保护明显优于采用传统二次谐波制动判据的保护，具有较好的工程应用价值。

参考文献

- [1] Kulidjian A, Kaszteny B, Campbel B. New magnetizing inrush restraining algorithm for power transformer protection[C]. //Developments in Power System Protection, Conference Publication. Netherland: 2001.
- [2] 史世文. 大机组继电保护[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [3] 王维俭. 发电机变压器继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [4] 陈增田. 电力变压器保护[M]. 二版. 北京: 水利电力出版社, 1989.
- [5] 陈德树, 尹项根, 张哲, 等. 虚拟三次谐波制动式变压器差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 19-23.
- [6] 林湘宁, 刘沛, 刘世明. 变压器有载合闸的超饱和现象及对变压器差动保护的影响[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 6-10.
- [7] 周云波, 曹良. 一起主变压器差动保护误动事故及防止对策[J]. 电网技术, 2001, 25(12): 71-74.
- [8] 孙志杰, 陈云仑. 波形对称原理的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(4): 42-46.
- [9] 何奔腾, 徐习东. 波形比较法变压器差动保护原理[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(6): 395-398.
- [10] 陈德树, 尹项根, 张哲. 虚拟三次谐波制动式变压器差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 20-23.

(下转第139页 continued on page 139)

- 25 (5): 20-24.
- [4] Cheng Chuan-ping, Liu Chihwen, Liu Chun-chang. Unit commitment by lagrangian relaxation and genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15 (2): 707-714.
- [5] Fu Yong, Li Zu-yi. Security-constrained unit commitment with AC constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20 (3): 1538-1550.
- [6] Weerakorn Ongsakul, Nit Petcharak. Unit commitment by enhanced adaptive lagrangian relaxation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19 (1): 620-628.
- [7] 张炯, 刘天琪, 苏鹏, 等. 基于遗传粒子群混合算法的机组组合优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (9): 25-29.
- ZHANG Jiong, LIU Tian-qi, SU Peng, et al. Unit commitment optimization based on genetic algorithm and particle swarm optimization hybrid algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (9): 25-29.
- [8] Juste K A, Kita H, Tanak A E, et al. An evolutionary programming solution to the unit commitment problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14 (4): 1452-1459.
- [9] 李鹏飞, 都洪基, 郭亮, 等. 基于免疫算法的火电厂机组优化组合[J]. 继电器, 2007, 35(增刊): 365-368.
- LI Peng-fei, DU Hong-ji, GUO Liang, et al. Combinatorial optimization section of the thermal power plant based on immune algorithm[J]. Relay, 2007, 35 (S): 365-368.
- [10] Marcelino Madrigal, Victor H Quintana. Semidefinite programming relaxations for {0, 1} power dispatch problems[C]. //IEEE Power Eng Soc Summer Meeting Conf. Edmonton(Canada): 1999: 697-702.
- [11] 韦化, 吴阿琴, 白晓清. 一种求解机组组合问题的内点半定规划法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (1): 35-40.
- WEI Hua, WU A-qin, BAI Xiao-qing. An interior point semidefinite programming for unit commitment problems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (1): 35-40.
- [12] 李晓磊, 周京阳, 于尔铿, 等. 基于动态搜索线性混合整数法的机组组合新算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (21): 18-21.
- LI Xiao-lei, ZHOU Jing-yang, YU Er-keng, et al. Linear mixed integer programming algorithm for unit commitment based on dynamic search[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (21): 18-21.
- [13] Miguel Carrión, José M. A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (3): 1371-1378.
- [14] Chang G W, Aganagic M, James G, et al. Experiences with mixed integer linear programming based approaches on short-term hydro scheduling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16 (4): 743-749.
- [15] Venkatesh B, Jamtsho T, Gooi H B. Unit commitment—a fuzzy mixed linear programming solution[J]. Generation Transmission & Distribution IET, 2007, 5 (1): 836-846.
- [16] A software package for mixed integer linear programming, version 12.1.0[EB/OL]. <http://tomopt.com/tomlab/>.
- [17] Raglend I Jacob, Padhy Narayana Prasad. Solutions to practical unit commitment problems with operational, power flow and environmental constraints[C]. //IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006.

收稿日期: 2009-09-15; 修回日期: 2009-11-04

作者简介:

苏济归 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化与电力市场; E-mail: sjg2008@ncepu.edu.cn

舒隽 (1974-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力市场和电力系统分析相关理论及其应用;

谢国辉 (1981-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场、电力系统优化调度理论和方法。

(上接第 134 页 continued from page 134)

- [11] 朱亚明, 郑玉平, 叶锋, 等. 间断角原理的变压器差动保护的性能特点及微机实现[J]. 电力系统自动化, 1996, 20 (11): 36-40.
- ZHU Ya-ming, ZHENG Yu-ping, YE Feng, et al. Performance and digital realization of transformer differential relay based on dead angle philosophy[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20 (11): 36-40.

收稿日期: 2009-09-27; 修回日期: 2009-11-25

作者简介:

刘小宝 (1979-), 男, 硕士, 从事电力系统继电保护研究开发工作; E-mail: liuxiaobao@sgepri.sgcc.com.cn

吴崇昊 (1974-), 男, 博士, 从事电力系统继电保护研究开发工作;

宋艳 (1981-), 女, 硕士, 从事电力系统继电保护研究开发工作。