基于暂态仿真的主变涌流对线路零序过流保护的影响研究

谭 靖[1]，肖 浩[2]，李 艳[1]，张安龙[1]，李银红[2]

(1.深圳供电局有限公司，广东 深圳 518048;
2.华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室，湖北 武汉 430074)

摘要：通过阐述变压器零序电流产生机理，指出变压器各相铁芯饱和差异是产生零序分量的根本原因。基于EMTDC/PSCAD 平台系统分析了剩磁、合闸角和变压器中性点接地方式对励磁涌流零序电流基波分量最大值的影响，分析结果表明当达到实际最大剩磁时通过调整合闸角可以获得最大零序电流基波分量。仿真分析还发现线路零序过流加速段保护在较大的励磁涌流零序电流下有误动风险，建议通过提高零序过流加速段定值或增加二次谐波制动原理来提高保护的可靠性。

关键词：变压器；励磁涌流；零序分量；零序过流保护

Study on influence of transformer magnetizing inrush current on the line zero sequence overcurrent protection by transient simulation

TAN Jing[1], XIAO Hao[2], LI Yan[1], ZHANG Anlong[1], LI Yinhong[2]

(1. Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518048, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Through the description of the generating mechanism of the zero sequence current transformer, this paper points out that the different core saturation of each phase of transformer is the fundamental causes of the zero sequence components. Based on EMTDC/PSCAD, the effect of residual magnetism, closing angle and the neutral grounding mode of transformer on the maximum of fundamental component of magnetizing inrush zero sequence component is analyzed. Results show that when the residual magnetism is maximum, adjusting the closing angle can obtain the maximum of zero sequence current fundamental component. In addition, it is found by simulation that there is disoperation risk in the line zero sequence overcurrent accelerating protection caused by the larger inrush current zero sequence component. Improving the reliability of protection by increasing the zero sequence current acceleration setting value or twice harmonic restraint principle is suggested.

Key words: transformer; magnetizing inrush current; zero sequence component; zero-sequence overcurrent protection

中图分类号：TM77 文献标识码：A 文章编号：1674-3415(2015)19-0149-05

0 引言

变压器在空投和外部故障切除后电压恢复暂态过程中将产生数值可与内部故障电流相比拟的励磁涌流，励磁涌流的产生机理以及对变压器差动保护的影响已经有了相应深入的研究[1-6]。但是变压器空投过程中产生的励磁涌流零序分量对于线路零序电流保护影响的研究却很有限。

文献[7]通过仿真手段对于变压器空投时零序电流的特点有了初步认识，指出衰减较慢的零序电流可能会导致变压器零序过电流保护误动。文献[8]针对励磁涌流中零序分量的产生原因做了一定的分析，但对零序分量的大小及其对线路零序电流保护的影响没有研究。文献[9]分析了对零序电流大小的影响因素，并初步研究了零序分量对线路零序电流保护的影响及改善方案。

本文基于 EMTDC/PSCAD 平台搭建了多台并列主变空投时的模型，在推导励磁涌流表达式的基础上，分析了剩磁、合闸角和变压器中性点接地方式对励磁涌流零序电流基波分量最大值的影响，通过仿真分析得出了线路零序过流加速段易发生误动的结论，并提出了相应的防范措施。

1　系统模型

某终端片网在负荷高峰时段由 220 kV M-H 甲、乙线供电，该双回线若故障跳闸则重合期间将形成图 1 所示等值模型。

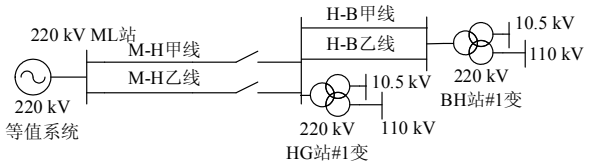


图 1 M-H 甲、乙线空载合闸等值模型

Fig. 1 Equivalent model of no-load switching-in of M-H A line and M-H B line

图 1 中系统主要参数如下：220 kV 等值系统正序阻抗为 0.26+j3.64 Ω，零序阻抗为 0.79+j5.85 Ω；HG 站#1 变额定容量为 180 MVA，高中低压各侧正序电抗分别为 j43.8 Ω、−j3.23 Ω 和 j27.93 Ω；BH 站#1 变额定容量为180 MVA，高中低压各侧正序电抗分别为 j45.2 Ω、−j3.54 Ω 和 j27.88 Ω。变压器零序阻抗按 0.8 倍的正序阻抗取值。

2　零序分量影响分析

2.1 零序分量产生机理

对于图 2 所示变压器空载合闸模型，其中：u 为交流电源，R_1 为变压器一次侧电阻，L_1 为变压器一次侧漏感，R_m 为励磁电阻，L_m 为励磁电抗。

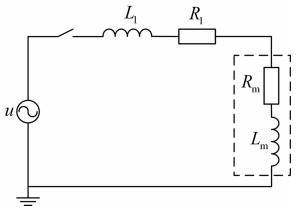


图 2 变压器空载合闸等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of transformer for no-load switching-in

假设加在变压器一次侧上的纯正弦电压为

$$u = U_m \sin(\omega t + \alpha) \tag{1}$$

令变压器一次侧绕组匝数为 1，考虑到变压器绕组漏抗压降较小，则回路电压方程式为

$$\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = U_m \sin(\omega t + \alpha) \tag{2}$$

则变压器空载合闸时铁芯磁通为

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + \Phi_m \cos\alpha + \Phi_r \tag{3}$$

式中：$\Phi_m = \dfrac{U_m}{\omega}$ 为对应电压 U_m 的磁通幅值；$\Phi_m \cos(\omega t + \alpha)$ 为稳态磁通；$\Phi_m \cos\alpha + \Phi_r$ 为暂态磁通，Φ_r 为变压器铁芯的剩磁。

设 $\theta = \omega t + \alpha$，则由变压器典型磁化曲线可得励磁电流表达式为

$$i_\mu = \begin{cases} 0, & 0 \le \theta \le \theta_1 \text{或} \theta \ge 2\pi - \theta_1 \\ I_m(\cos\theta_1 - \cos\theta), & \theta_1 < \theta < 2\pi - \theta_1 \end{cases} \tag{4}$$

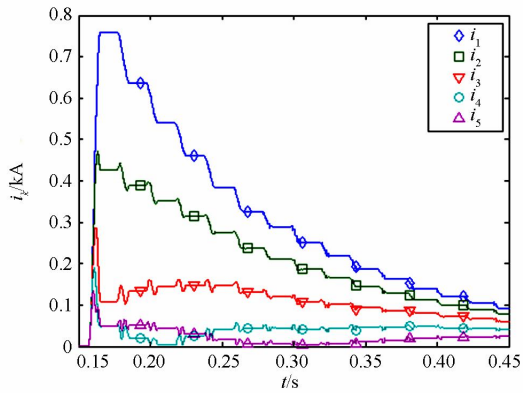
其中：

$$\begin{cases} I_m = \Phi_m / L_\mu \\ \theta_1 = \arccos\left(\dfrac{\Phi_m \cos\alpha + \Phi_r - \Phi_s}{\Phi_m}\right) \end{cases} \tag{5}$$

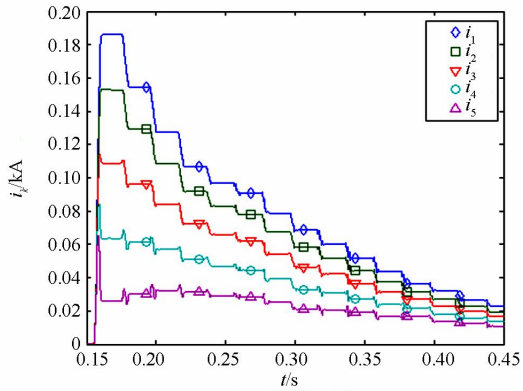
式中，Φ_s 为变压器饱和磁通。由式可知：励磁涌流中谐波成分与磁通幅值 Φ_m、剩磁 Φ_r、饱和磁通 Φ_s 以及合闸角 α 有关。

对于空载合闸三相变压器，由于各相剩磁以及合闸角等因素的差异，使得变压器各相铁芯饱和程度有差异，因而导致对各相励磁涌流谐波成分影响程度不同，产生了非对称非正弦的谐波电流，相应的会产生零序分量电流。

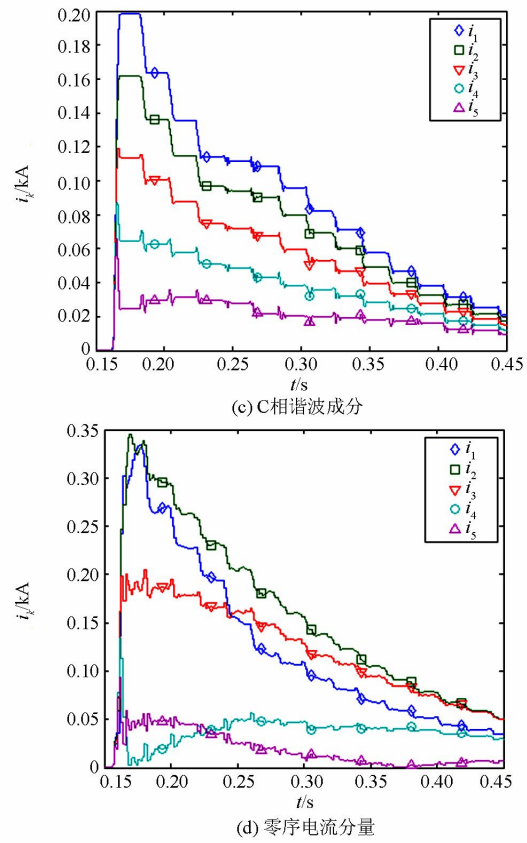
以图 1 中 BH 站#1 变空载合闸(A 相合闸为 0°)为例进行分析，A、B、C 三相励磁涌流谐波情况及零序电流见图 3 (图 3 中 i_1、i_2、i_3、i_4 和 i_5 分别表示基波、2、3、4 和 5 次谐波)。通过分析可知：对于特定次谐波，A 相中谐波幅值比 B 相和 C 相大，各相谐波分量衰减规律也有差异，形成了不对称的非正弦电流。



(a) A相谐波成分



(b) B相谐波成分



(c) C相谐波成分

(d) 零序电流分量

图 3 励磁涌流谐波成分

Fig. 3 Harmonics in magnetizing inrush currents

2.2 零序分量影响因素

2.2.1 剩磁及合闸角的影响

由前述分析可知，剩磁和合闸角是影响变压器励磁涌流的两个因素，显然为了取得励磁涌流零序分量基波最大值，需要不断改变三相剩磁和合闸角，进行大量仿真计算。表 1 即为 BH #1 变通过 MH 甲、乙线空投时的仿真计算结果。

表 1 不同剩磁情况下零序电流基波分量最大值

Table 1 Maximum fundamental component in zero-sequence currents for various residual fluxes

序号	剩磁			i_0/A	i_0/i_n	α/(°)
	A 相	B 相	C 相			
1	0	0	0	342.5	0.76	−30
2	0.35	−0.175	−0.175	498.8	1.10	−10
3	0.35	−0.35	0	581.8	1.29	−30
4	0.7	−0.35	−0.35	672.6	1.49	−10
5	0.7	−0.7	0	818.0	1.81	−30

注：ABC 三相剩磁都是基于额定磁通 Φ_m；i_0 为零序电流基波分量最大值；i_n 为 BH 站#1 变一次侧额定电流；α 为 A 相空载合闸角。

由表 1 可知，当变压器 ABC 三相剩磁分别为 0.7、−0.7(变压器铁芯最大剩磁)[10]和 0 倍额定磁通且 A 相空载合闸角为 –30° 时可获得最大零序电流基波分量，约为 2 倍变压器额定电流。

2.2.2 变压器台数及中性点接地方式的影响

中性点均接地的 HG#1 变和 BH#1 变同时受到励磁涌流冲击时，其零序等值电路如图 4 所示。

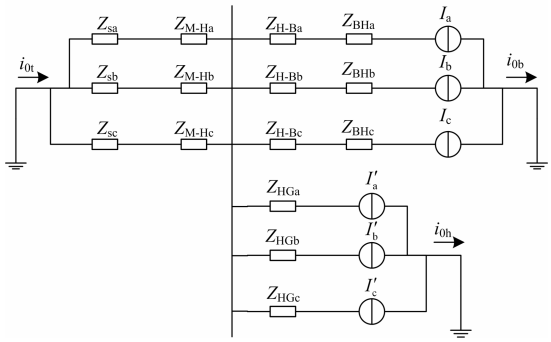


图 4 变压器励磁涌流零序等效回路

Fig. 4 Zero sequence equivalent circuit of magnetizing inrush currents

其中，中性点接地变压器可等效为一个衰减的含谐波分量的电流源，这些不对称且非正弦周期电流将在零序回路中产生零序电流。$Z_{sa、sb、sc}$、$Z_{M\text{-}Ha、M\text{-}Hb、M\text{-}Hc}$、$Z_{H\text{-}Ba、H\text{-}Bb、H\text{-}Bc}$、$Z_{BHa、BHb、BHc}$、$Z_{HGa、HGb、HGc}$ 分别对应图 1 中各元件的三相等值阻抗。不同条件下仿真分析得到的结果如表 2 所示。

表 2 HG#1 变和 BH#1 变中性点均接地时零序电流基波分量仿真结果

Table 2 Simulation results of fundamental component in zero-sequence currents with HG #1 transformer and BH #1 transformer's neutrals grounded

序号	剩磁			i_{0h} /A	i_{0b} /A	i_{0t} /A
	A 相	B 相	C 相			
1	0	0	0	386.5	342.5	729.3
2	0.35	−0.175	−0.175	566.0	498.8	1 065.6
3	0.35	−0.35	0	659.6	581.8	1 242.2
4	0.7	−0.35	−0.35	766.0	672.6	1 439.4
5	0.7	−0.7	0	929.9	818.0	1 748.7

注：HG#1 变和 BH#1 变剩磁取值相同，均为表中所示；i_{0h}、i_{0b} 和 i_{0t} 分别为 HG#1 变、BH#1 变和 M-H 甲、乙线上零序电流基波分量最大值。

通过分析表 2 中 i_{0h}、i_{0b} 和 i_{0t} 三个量之间的关系可得：$i_{0t}=i_{0h}+i_{0b}$，即对于空载合闸于多台中性点接地变压器的线路，零序电流基波分量最大值为各中性点接地变压器通过的零序电流基波分量最大值之和。而对于中性点不接地的变压器由于不能提供零序通路，故励磁电流虽有涌流特征却不包含零序

分量。

3 对线路零序电流保护影响分析

3.1 仿真试验结果

为获得图 1 中线路空载合闸于多台中性点接地变压器时零序电流基波分量最大值，根据之前的分析结果可以将多台变压器剩磁均取为 0.7 倍额定磁通，线路合闸角取为 –30°。仿真结果如表 3。

表 3 仿真试验结果

Table 3 Simulation results

测试内容	零序基波分量最大值/A	零序基波分量 0.1 s 衰减值/A
M-H 甲线送电 (M 侧)	1 750.3	790.4
M-H 甲线送电 (H 侧)	1 748.7	788.2
M-H 乙线送电 (M 侧)	1 750.3	790.4
M-H 乙线送电 (H 侧)	1 748.7	788.2

3.2 M-H 甲、乙线保护动作情况分析

220 kV M-H 甲、乙线线路保护中配置了四段式方向零序电流保护作为线路接地故障的后备保护。零序Ⅰ段退出，因此不用考虑涌流零序分量的影响。零序Ⅱ段与相邻线路纵联保护配合，躲过线路对侧变压器的其他侧母线故障，并躲开非全相运行时的零序电流，故定值较大，此外还有至少 0.7 s 的延时，因此也不受涌流零序分量的影响。零序Ⅲ段与相邻线路零序Ⅱ段或Ⅲ段配合，且必须保证本线末端故障灵敏度，因此一般定值不大，甚至有可能躲不过线路对侧变压器的另一侧母线故障。正常运行时零序Ⅲ段时间与非全相运行时间配合，一般不小于 1.8 s，可以躲过涌流零序分量的影响。零序Ⅳ段按本线路发生高电阻接地故障能可靠启动整定，一般不大于 300 A，但零序Ⅳ段作为最后一段总后备保护，时间定值整定很长，一般不小于 3 s，能可靠躲过涌流零序分量的影响。在快速复电手合时，HG 站侧零序过流加速元件定值为 1 492 A，延时为 0.1 s(躲开关不一致合闸)，且不带方向判别。由表 3 可知，虽然在 0.1 s 后 HG 站侧零序分量衰减到 788.2 A，但是由于零序分量最大值达到了 1 748.7 A，则存在无法躲过涌流零序分量而误动的风险。

4 防范措施

为了可靠保证线路零序电流保护不会发生误动，则必须充分考虑涌流零序分量导致零序后备保护误动的解决方案。

4.1 提高零序过流加速段定值

从仿真结果和线路保护动作情况分析来看，主变励磁涌流零序分量主要是对线路零序过流加速段保护有误动风险，要可靠躲过励磁涌流零序分量，可通过提高线路两侧零序过流加速段定值的方案来实现。

经核算，M-H 甲、乙线双回运行时 HG 侧母线故障 ML 侧感受最小零序电流为 7 000 A，ML 侧母线故障 HG 侧感受最小零序电流为 1 600 A。而根据表 3 仿真结果可知，要躲过 1 700 A 的励磁涌流零序分量，按 1.5 倍可靠系数计算，需将 M-H 甲、乙线两侧零序过流加速段定值提高至 2 550 A。该定值能够保证在 HG 站侧母线故障时 ML 侧保护有足够灵敏度，但在 ML 站侧母线故障时 HG 侧保护却灵敏度不足，因此可以考虑在快速复电过程中，先合终端侧(HG 站)断路器再合电源侧(ML 站)断路器，则 HG 侧零序过流加速段不会动作，而 ML 侧零序过流加速段不会由于励磁涌流零序分量而发生误动。

4.2 完善零序过流加速段保护原理

从图 3 可以看出，励磁涌流的零序分量含有大量的二次谐波，且衰减时间与基波分量的衰减时间大致相同，因此可以利用谐波识别励磁涌流以闭锁零序过流加速保护。判别方程如式(6)。

$$I_{2nd} > K_{2xb} I_{1st} \tag{6}$$

式中：I_{2nd} 为零序电流中的二次谐波；I_{1st} 为零序电流的基波分量；K_{2xb} 为二次谐波制动系数。当判别出为励磁涌流时，只闭锁零序过流加速保护。

5 结论

(1) 励磁涌流中零序分量的产生是由于变压器各相铁芯饱和程度有差异，因而导致对各相励磁涌流谐波成分影响程度不同。

(2) 零序分量受剩磁和合闸角影响。对于中性点接地的变压器在剩磁为($0.7B_m$，$-0.7B_m$，0)且 A 相空载合闸角为 –30° 时可获得最大零序电流基波分量。

(3) 零序分量主要是对线路零序过流加速段保护有误动风险。可以通过提高零序过流加速段定值来可靠躲过励磁涌流中较高的零序分量；亦可通过二次谐波制动原理来闭锁零序过流加速段保护。

参考文献

[1] 李钷, 乌云高娃, 刘涤尘, 等. Preisach 模型剩磁计算与抑制励磁涌流合闸角控制规律[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 37-41.

LI Po, WUYUN Gaowa, LIU Dichen, et al. Calculation of residual flux based on preisach model and entering phase control of transformer to eliminate inrush current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 37-41.

[2] 张炳达, 黄杰. 基于差分双正交小波熵的变压器励磁涌流识别算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 9-13.
ZHANG Bingda, HUANG Jie. Identification of transformer inrush current based on difference biorthogonal wavelet entropy[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 9-13.

[3] 宗洪良, 金华烽, 朱振飞, 等. 基于励磁阻抗变化的变压器励磁涌流判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 92-95.
ZONG Hongliang, JIN Huafeng, ZHU Zhenfei, et al. Transformer inrush detected by the variation of magnetizing impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 92-95.

[4] 史泽兵, 郝后堂, 江卫良. 一种新型的励磁涌流制动方案[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 147-150.
SHI Zebing, HAO Houtang, JIANG Weiliang. A new restraint scheme for inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 147-150.

[5] 吕俪婷, 罗建, 黄正炫, 等. 电力变压器对称励磁涌流的仿真研究[J]. 继电器, 2007, 35(5): 4-6.
LÜ Liting, LUO Jian, HUANG Zhengxuan, et al. Simulation and analysis of the inrush of power transformer[J]. Relay, 2007, 35(5): 4-6.

[6] 孙洋, 黄家栋. 基于新型半周期波形正弦特征的励磁涌流判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 54-58.
SUN Yang, HUANG Jiadong. Novel theory of identifying inrush current based on half-cycle sine waveform[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 54-58.

[7] 张雪松, 何奔腾. 变压器和应涌流对继电保护影响的分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 12-17.
ZHANG Xuesong, HE Benteng. Influence of sympathetic interaction between transformers on relay protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 12-17.

[8] 杜继伟, 刘思珍, 王奔. 变压器励磁涌流导致零序分量产生的仿真分析[J]. 电气应用, 2007, 26(1): 27-31.
DU Jiwei, LIU Sizhen, WANG Ben. Study on principle of zero-sequence component caused by transformer inrush phenomenon[J]. Electrotechnical Application, 2007, 26(1): 27-31.

[9] 方愉冬, 徐习东, 朱炳铨. 变压器涌流对零序电流保护的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(9): 115-118.
FANG Yudong, XU Xidong, ZHU Bingshuan. Influence of transformer inrush on zero-sequence current protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(9): 115-118.

[10] 李明武, 梁冠安. 变压器有载合闸过程中故障分闸后铁心剩磁分析[J]. 高压电器, 2003, 39(5): 26-28.
LI Mingwu, LIANG Guanan. Analysis of transformer's residual flux due to fault trip during closing with load[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(5): 26-28.

收稿日期：2014-12-15；　　修回日期：2015-03-18

作者简介：

谭　靖(1985-)，男，工程师，从事继电保护整定计算及运行管理工作。E-mail: tanj_04@163.com

(编辑 魏小丽)