

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200289

防止超高压备自投诱发线路零序过流保护误动的对策初探

冯宝成¹, 田志浩², 摆世彬², 李桐², 蒙金有², 何俊峰¹, 孙仲民¹

(1. 南京南瑞继保工程技术有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 国网宁夏电力有限公司, 宁夏 银川 750001)

摘要: 高压内置型高阻抗变压器空载合闸时可能会产生高幅值的零序涌流, 该零序电流在上游线路中分配后很可能引起线路零序过流保护误动作。这一现象同样存在于变压器备自投过程中, 从而导致备自投失败。为解决这一问题, 首先从零序涌流特征出发, 结合零序涌流的半解析表达式, 量化分析零序涌流中断角和二次谐波含量特征, 并据此分析利用传统的中断角和二次谐波涌流识别判据进行零序涌流辨识的可行性。理论分析表明: 较相涌流, 零序涌流的中断角显著减小, 不适用于涌流识别; 二次谐波特征显著加强, 可作为识别零序涌流的可行方案引入零序过流保护, 保证变压器备自投正常进行。最后, 基于 PSCAD/EMTDC 的仿真结果验证了上述结论的正确性。
关键词: 超高压; 备自投; 高压内置型高阻抗变压器; 零序涌流; 零序过流保护

Study on countermeasures to prevent maloperation of zero-sequence overcurrent protection caused by ultra-high-voltage automatic device transfer

FENG Baocheng¹, TIAN Zhihao², BAI Shibin², LI Tong², MENG Jinyou², HE Junfeng¹, SUN Zhongmin¹

(1. Nari-relay Engineering and Technique Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China)

Abstract: There may be high-amplitude zero-sequence inrush generated by a high voltage built-in high-impedance transformer in the process of no-load closing. The zero-sequence inrush will distribute in the line and may cause the maloperation of the line zero-sequence over current protection. In addition, the above phenomenon exists when a spare transformer is put into operation, and the automatic device transfer operates unsuccessfully. In order to solve this problem, the characteristics of zero-sequence inrush are studied based on the formula of zero-sequence inrush in this paper. The dead angle and second harmonic of zero-sequence inrush are calculated and analyzed. On this basis, the feasibility of a dead angle and second harmonic breaking criterion to identify zero-sequence inrush is analyzed. The results show that the dead angle of zero-sequence inrush reduces so significantly compared with phase inrush that it cannot be regarded as a characteristic to identify zero-sequence inrush. The second harmonic component increases obviously, so the second harmonic breaking criterion is an advisable scheme to ensure that automatic device transfer is put into operation successfully. Finally, a simulation test based on PSCAD/EMTDC verifies the accuracy of the analysis results.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51677108) and the Science and Technology Project of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd. (No. SGNX0000DKJS1900578).

Key words: ultra-high-voltage; automatic device transfer; high voltage built-in high-impedance transformer; zero-sequence inrush; zero-sequence over current protection

0 引言

随着经济不断发展, 电力系统覆盖率大规模提升, 但同时电网中也在许多不确定性因素, 因此提高电网可靠性是电力系统的基本保证^[1-2]。变压器是

电力传输的枢纽设备^[3], 其发生故障时, 可能会导致下游供电中断, 对电网运行造成不利影响。因此, 在 330 kV 及以上的变电站中普遍配有备用变, 在主变因发生故障被隔离后, 变电站即启动备用变投入运行, 保证下游线路正常供电^[4-5], 提高电网可靠性。理论上, 备用变压器在投入运行时一般都会产生三相不平衡的励磁涌流, 在大电流接地系统中, 会进而形成零序涌流^[6]。该

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51677108); 国网宁夏电力有限公司科技项目资助(SGNX0000DKJS1900578)

零序涌流在允许零序分量流通的上游线路中分配后,若流经线路的零序涌流在相应的零序过流保护整定延时到达时仍旧处于动作门槛之上,就会引起对应的保护误动作。若该现象发生在备用变投运期间,即会造成备自投失败、下游负荷长期失电等严重后果。对于常规变而言,依靠后备保护的整定延时和动作门槛即可避免绝大多数合闸零序涌流引起的保护误动风险,因此相关案例在过去鲜有报道。

然而,这一问题在过去几年发生了变化。高压内置型高阻抗变压器(以下简称高压内置变)作为显著降低短路电流的可行方案之一,已在部分短路电流水平较高的地区被广泛采用^[7],随着西北地区发电基地的规模不断扩大,相应的限流压力也逐渐增加,此类变压器有望在西北地区 330 kV 超高压网络中应用和推广。与常规变压器相比,高压内置变由于高压绕组与铁芯间的空气气隙明显减小,其引发的零序涌流相比常规变也将显著增大,进而更易引发上游线路零序过流保护误动作^[6],上述问题已在 220 kV 电压等级高压内置变空载合闸试验中逐渐凸显^[8]。现场录波数据指出,通过优化定值,可减少上述误动案件的发生概率,但即使在定值最优的前提下,亦无法完全避免高幅值涌流引发的线路零序过流保护误动问题。值得注意的是,相较 220 kV 高压网络,330 kV 超高压输电网的阻性成分更低,故其衰减时间常数更大,变压器空载合闸涌流衰减更加慢。由此可见,高压内置变在超高压电力网络中的应用将进一步增加线路零序过流保护误动的风险,因此有必要针对高压内置变的零序涌流波形特征展开研究,提出能够准确识别零序涌流的闭锁判据,以防范高压内置变备自投引发的线路零序过流保护误动风险。

针对高压内置变零序涌流导致上游线路零序过流保护误动问题,目前已有文献进行了相关分析。文献[7-8]结合系统的现场录波数据指出高压内置型变压器的励磁涌流具有幅值大、衰减慢,易引发上游线路零序过流保护误动的特点;文献[9]从励磁涌流的工程计算入手,分析了高压内置型高阻抗变压器结构对变压器实际参数的影响;文献[10-11]结合内置变的参数,对变压器的 PSCAD 仿真模型进行修正,为后续研究提供了仿真基础。但是,上述研究大都停留在零序涌流诱发线路零序过流保护误动机理层面,并未对高压内置变的零序涌流特征进行总结并提出应对上述误动现象的可行方案。

经过近百年的积累,关于励磁涌流识别方案亦成果丰硕^[12-20],但绝大多数是以相涌流为研究对象

针对差动保护展开的,其中二次谐波制动判据和间断角闭锁原理已被广泛应用在变压器保护中。若是可以借鉴传统的二次谐波原理或间断角闭锁原理,可在一定程度上降低上述误动问题解决方案的研究难度^[12]。然而,受三相励磁涌流互相补偿的影响,经三相合成后的零序涌流波形形态较相涌流已经发生明显改变。因此,传统的涌流识别原理是否仍旧适用,若传统方案适用,整定原则是否需要调整亦需进一步明确,均是需要深入探讨的问题。

鉴于此,本文在目前较为成熟的变压器零序分量表达式基础上,生成全覆盖性空载合闸场景,并基于 Matlab 编写计算程序自动化生成海量的全覆盖性合闸数据集,并对其进行批量化处理,分析总结零序涌流波形规律,为识别零序涌流判据提供指导。最后根据零序涌流波形特征分析结果提出适用于线路零序过流保护的涌流闭锁判据,并基于 PSCAD/EMTDC 平台对不同备自投和故障场景进行验证。

1 海量零序涌流数据的自动化生成方案

单相变压器励磁涌流已有成熟的理论模型。文献[12]给出了单相变压器空载合闸情况下励磁涌流表达式,具体如式(1)所示。

$$i_{\mu}(t) = \begin{cases} 0, & \Phi(t) < \Phi_s \\ (-\psi_m \cos(\omega t + \alpha) + \psi_{dc} e^{-t/\tau}) / L_{air}, & \Phi(t) > \Phi_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: $-\psi_m \cos(\omega t + \alpha)$ 为稳态交流磁链; $\psi_{dc} e^{-t/\tau}$ 为衰减直流磁链; α 为合闸角; 时间常数 $\tau = L_{air} / R$, L_{air} 为高压绕组的空心电感, R 为绕组的直流电阻; Φ_s 为饱和磁通点。设变压器铁芯剩磁为 $\psi(0^-) = \psi_r$, 由于铁芯磁链无法突变,故 $\psi_{dc} = \psi_r + \psi_m \cos \alpha$ 。

由于超高压变压器都是三相变压器组。对于三相变压器组而言,将三相合闸角与对应剩磁代入式(2)即可得三相涌流 I_A 、 I_B 、 I_C 表达式。当三相不同时合闸时,只需对合闸角进行调整即可。

受绕组接线方式的影响,高压内置变总励磁电流由 Y 侧电流与三角侧环流共同构成,且该环流为零序性质^[10]。变压器的零序等效电路如图 1 所示,由于阻性成分占比很小,可近似忽略,根据基尔霍夫电流定律得,流入系统的零序电流为式(2)。

$$3i_0^* = (i_{\mu A}^* + i_{\mu B}^* + i_{\mu C}^*) L_{2\sigma}^* / (L_{30}^* + L_{2\sigma}^* + L_{1\sigma}^*) \quad (2)$$

式中: $L_{1\sigma}^*$ 和 $L_{2\sigma}^*$ 分别为一次侧和二次侧的漏感; L_{30}^* 为系统零序电感。

式(1)、式(2)即为零序涌流的半解析理论模型。

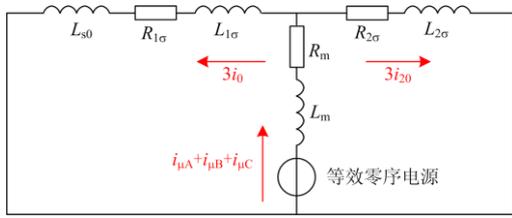


图 1 三相变压器空载合闸零序电路图

Fig. 1 Zero sequence circuit diagram when three-phase transformer no-load closes

在各项合闸条件已知的情况下，将各合闸参数代入式(2)即可计算得到特定合闸工况下的零序涌流表达式。为分析总结不同合闸条件下零序涌流的波形特征，本文利用 Matlab 编写零序涌流的仿真计算程序，自动生成海量合闸场景下的励磁涌流数据，具体过程如下：

1) 对变压器各关键参数进行设置。依变压器厂家提供的数据将高压内置变的饱和磁通点设为 1.2，衰减时间常数为 0.9 s，空心电感为 0.11 H。

2) 对变压器合闸条件进行设置，本文选取合闸角与剩磁两个关键合闸条件进行研究。在 $[0, 360^\circ]$ 之间以 5° 为步长选取合闸角，在 $[-1, 1]$ 之间以 0.1 为步长(三相剩磁均考虑理论上的最大值，且不考虑三相耦合关系)选取剩磁，将选取的合闸角与剩磁依次组合，共生成约 67 万种合闸场景。

3) 将上述所设变压器参数及合闸条件代入基于 Matlab 编写的零序涌流仿真计算程序，得到不同合闸条件下零序涌流的分布特征。

上文建模对象均为变压器的零序涌流，对于线路中的零序涌流而言，源自变压器的零序涌流的各种频率分量会在变压器母线所连的出线中依照线路阻抗反比进行分配。若线路为纯感性，各频率分量的分配比例相同，则线路与变压器的零序电流波形特征完全一致；若线路中含有阻性成分，则在不同谐波成分下，线路阻抗的比值会发生变化。考虑到 330 kV 输电线路中阻性成分所占比例很小，所以对谐波分配影响很小，线路零序电流波形相较于变压器仅发生轻微变化，波形特性大致相同，基于变压器零序涌流的波形分析结果完全可为闭锁判据的研究提供参考。

2 零序涌流特征分析

2.1 零序涌流间断角变化区间理论分析

根据传统的间断角计算原理^[21]，编写 Matlab 程序对第 1 节生成的 67 万种合闸条件下的零序涌流间断角进行批量化提取，获取各合闸条件下的零序

涌流间断角。考虑到合闸场景集为四维矩阵，无法通过二维、三维图像进行直观描述，故本文通过控制两个变量，对间断角的变化规律进行绘图分析。

在电力系统实际运行中，存在两类典型剩磁工况^[22-23]：① 非平衡剩磁。由于直流电阻测试或直流偏磁等原因造成的铁芯剩磁，为三相非平衡性剩磁，以 $\psi_{ra} = -\psi_{rb} = -\psi_{rc}$ 剩磁关系最为常见；② 平衡剩磁。断路器开断所产生的剩磁，由于三相电压的对称性，三相剩磁之和为零，以 $\psi_{ra} = -0.5\psi_{rb} = -0.5\psi_{rc}$ 的剩磁关系最为常见。后文即以这两类最为常见的剩磁工况展开分析。

图 2 和图 3 分别为典型的非平衡剩磁与平衡剩磁条件下零序涌流间断角与 A 相合闸角和剩磁间的分布关系图。由图 2 和图 3 可知，分布图以 180° 合闸角和 0 剩磁为边界(图中黑色实线所示)分为四个对称区域，出于简化分析考虑，仅需对其中任一区域进行分析即可。

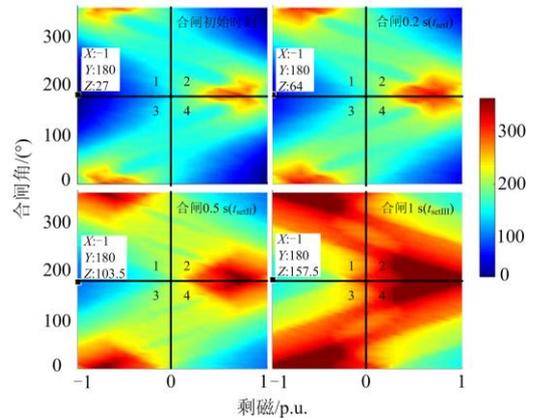


图 2 不平衡剩磁下，不同时刻零序涌流的间断角

Fig. 2 Dead angle of zero-sequence inrush at different time when the three phase remanence are unbalanced

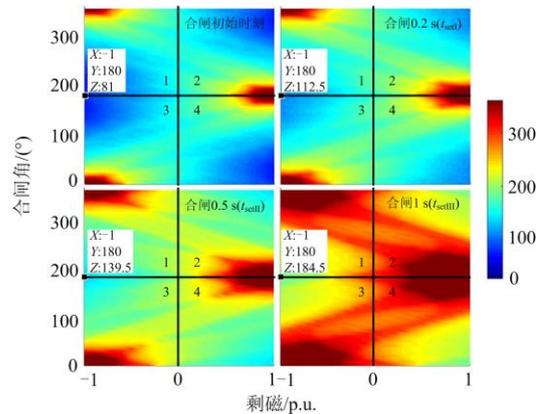


图 3 平衡剩磁下，不同时刻零序涌流的间断角

Fig. 3 Dead angle of zero-sequence inrush at different time when the three phase remanence are balanced

三相剩磁不平衡时, 变压器的零序涌流间断角如图2所示。由图2可知, 在三相剩磁为(-1,1,1) p.u., 合闸角为 180°时, 间断角达到最低值 27°(这也是 67 万组合闸场景下间断角数据中的最小值), 由相同方法计算可得此时相涌流的间断角也达到最低值 72°, 由此可见在上述合闸条件下零序涌流的间断角大幅减小。在三相剩磁平衡条件下, 变压器的零序涌流间断角如图3所示, 在 A 相剩磁相等的情况下, 平衡剩磁下的间断角略有增加。

由于涌流的间断区域实际对应于铁芯的不饱和状态, 当且仅当三相磁通均小于该饱和点时, 零序涌流波形才会出现间断。故无论三相剩磁是否平衡, 随着涌流逐渐衰减, 同一周期内, 三相磁通同时低于饱和磁通点的持续时间增加, 间断角也随之增大。变压器饱和磁通点越低, 间断角越小; 励磁涌流的衰减时间常数越小, 间断角随时间增长越快。计算结果表明, 其余剩磁条件下上述结论均成立, 分析过程同上, 在此不再详细展开论述。

2.2 零序涌流二次谐波含量变化区间理论分析

零序涌流除了含有明显的间断特征外还含有大量的二次谐波分量。根据对零序涌流进行傅里叶变换可分别求得零序涌流的基波幅值和二次谐波幅值, 并计算得到二次谐波含量 ppm2 如式(3)所示。

$$ppm2 = \frac{F_{2(\alpha, \phi_r, \tau, L_{air})}(t)}{F_{1(\alpha, \phi_r, \tau, L_{air})}(t)} \quad (3)$$

式中, $F_{i(\alpha, \phi_r, \tau, L_{air})}(t)$, $i=1$ 或 2 , 表示基波或二次谐波幅值随时间变化的函数。

根据式(3)所示二次谐波含量计算公式, 编写 Matlab 程序批量化提取第 1 节所得到的 67 万种合闸条件下的零序涌流中的二次谐波含量, 并选择上述两种剩磁关系下的计算结果进行绘图分析。

图4和图5所示分别为典型非平衡剩磁与平衡剩磁条件下零序涌流的二次谐波含量随合闸条件的分布关系图。由图4和图5可知, 二次谐波含量分布图同样以 180°合闸角和 0 剩磁为边界分为四个对称区域, 故同样对任一区域进行分析即可。

在三相剩磁为(-1,1,1) p.u., 合闸角为 105°时, 合闸初始时刻的二次谐波达到最小值 31.91%(这也是上述所有合闸场景集中的最小二次谐波含量), 远大于同样方法计算得到的相涌流二次谐波含量 3%, 由此可见在上述合闸条件下零序涌流的二次谐波含量大幅增加。计算结果表明, 无论三相剩磁是否平衡, 随着涌流衰减, 零序涌流的畸变程度加深, 尽管基波分量与二次谐波分量均逐渐减小, 但基波分量的衰减速度大于二次谐波分量, 因此二次谐波含

量随零序涌流衰减而不断增大。

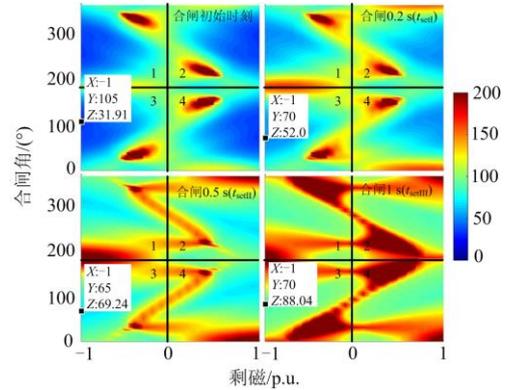


图4 不平衡剩磁下, 不同时刻零序涌流的二次谐波含量
Fig. 4 Second harmonic component of zero-sequence inrush at different time when the three phase remanence are unbalanced

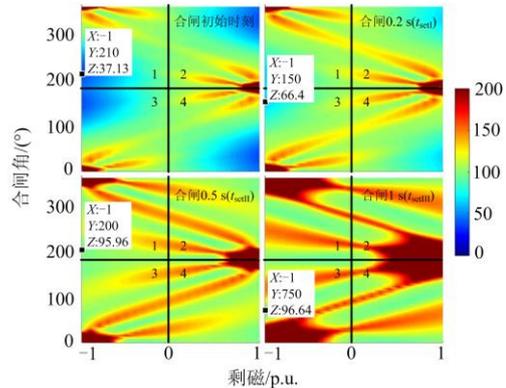


图5 平衡剩磁下, 不同时刻零序涌流的二次谐波含量
Fig. 5 Second harmonic component of zero-sequence inrush at different time when the three phase remanence are balanced

2.3 两种传统涌流闭锁判据的适用性分析

传统的间断角闭锁原理及二次谐波闭锁判据均应用于瞬时动作的差动保护, 故无需考虑其受涌流特征随时间变化规律的影响。而由于零序过流保护判据为带有动作延时的判据, 因此原保护与闭锁判据之间的动作逻辑将会直接影响传统判据及整定方案的适用性和整定原则。下文即对两种可能的配合逻辑展开详细分析:

1) 闭锁判据在动作延时到达时启动: 当零序电流超过整定门槛时即启动计时器, 到达动作延时后, 计算零序电流间断角或二次谐波, 若以上两种特征量小于门槛值, 则判为故障, 保护出口动作; 反之判为涌流, 保护闭锁。此时闭锁判据的整定值应依照保护延时到达时刻的涌流特征进行整定。但是, 在该配合逻辑下, 若变压器各自投后, 保护区内再发生故障, 则由于延时计时器的计时时刻早于故障

发生时刻，保护将可能由此发生抢跳，这对保护间的配合逻辑会产生不利影响，因此该配合逻辑的可行性较弱。

2) 保护启动同时启动闭锁判据：当零序电流超过整定门槛时，即启动闭锁判据并持续检测间断角和二次谐波含量大小，只有间断角或二次谐波含量低于门槛值，才启动计时器，延时切除故障。此时闭锁判据的整定门槛值应依照合闸初始时刻的零序涌流特征进行整定。该逻辑能够有效避免合闸后在故障工况下保护抢跳的问题。

根据 2.1 节分析可知，零序涌流工况下的间断角最低为 27°，同时依照基于浮动门槛的间断角计算原理可得，故障工况下，无论故障电流大小为多少，其间断角恒为 29°^[21]，大于合闸初始时刻的最小间断角为 27°。因此无论怎么调整闭锁判据的整定值，判据的安全性和可信赖性都无法同时得到满足，故间断角闭锁判据并非为闭锁零序过流保护的可靠选择。

同样地，由 2.2 节分析可知，零序涌流中二次谐波含量最小为 31.91%，对于故障工况而言，其零序电流通常呈现正弦形态，二次谐波含量几乎为零，两者差距显著，因此二次谐波闭锁判据不失为识别零序涌流的可行方案。考虑到零序涌流中最低二次谐波含量达 31.91%，远高于相涌流中的二次谐波含量，因此可将原差动保护二次谐波闭锁判据的常用整定门槛值 15%适当提高至 20%~25%。顺便指出，零序涌流二次谐波含量随时间呈增加趋势，该变化规律不仅不会对带有延时的后备保护产生不利影响，反而更加有利于保护维持涌流状态下的闭锁。

综上所述，在线路零序过流保护中引入传统二次谐波闭锁原理以识别零序涌流，是避免零序过流保护在变压器备自投期间误动的更合适解决方案。添加二次谐波闭锁原理后，线路零序过流保护逻辑图如图 6 所示，其中， K 表示二次谐波含量， K_{set} 表示二次谐波制动门槛。当零序电流超过整定门槛时即启动零序过流保护，检测零序电流中的二次谐波含量 K ，若满足 $K \geq K_{set}$ 则表示当前为涌流工况，保护闭锁，计时器不计；若不满足 $K \geq K_{set}$ 则判断当前为故障工况，计时器开始计时，在对应的整定延时到达后，线路零序过流保护跳闸切除故障。

3 仿真验证

基于 PSCAD/EMTDC 搭建如图 7 所示的变电站备自投仿真模型，其中， G 为系统等值电源， $T1$ 为升压变， $T2$ 为变电站主变， $T3$ 为备用变压器， $L1$ 、 $L2$ 分别为低压侧负载和中压侧负载。在正常工

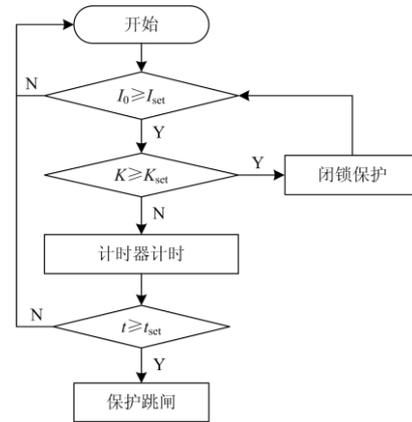


图 6 含二次谐波闭锁原理线路零序过流保护逻辑图
Fig. 6 Logic diagram of line zero-sequence over-current protection with second harmonic blocking scheme

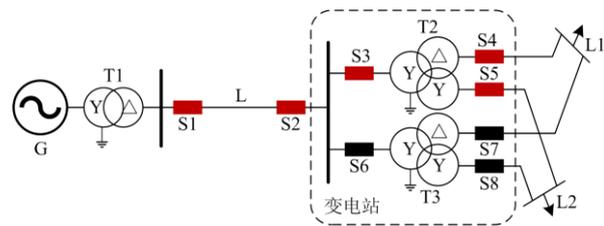


图 7 变压器备自投仿真模型

Fig. 7 Simulation model of automatic transformer transferring

况下断路器 $S1 \sim S5$ 闭合， $S6 \sim S8$ 断开，主变处于正常运行状态，备用变处于备用状态。其中 $T2$ 和 $T3$ 参数一致，均按照高压内置变设置：容量为 240 MVA，各绕组电压分别为 330/110/35 kV，高中阻抗为 13.5%，高低阻抗为 29%，中低阻抗为 18%；输电线路长度设为 20 km。

以断路器 $S1$ 处安装的零序过流保护为例，根据整定原则^[21]，设置三段式零序过流保护的整定值为 $I_{set}^I = 500 \text{ A}$ ， $t_{set}^I = 0.2 \text{ s}$ ， $I_{set}^{II} = 300 \text{ A}$ ， $t_{set}^{II} = 0.5 \text{ s}$ ， $I_{set}^{III} = 150 \text{ A}$ ， $t_{set}^{III} = 1.0 \text{ s}$ ，同时，闭锁判据以不将故障判为涌流工况为原则，考虑一定裕度后，间断角判据门槛取为 35°，二次谐波闭锁判据的门槛取为 20%。备自投逻辑设置为在主变被切除后 0.1 s，备用变投入运行，经过 0.5 s 后，负载侧断路器合闸，恢复供电。下面，即基于上述条件进行不同工况下的仿真验证。

算例 1：零序涌流半解析理论模型的可用性验证

设定上述仿真模型中断路器 $S1$ 、 $S2$ 处于闭合状态，其他断路器均断开，在 0.2 s，断路器 $S6$ 合闸，模拟高压内置变 $T3$ 空载合闸场景。此时变压器 $T3$ 的三相剩磁分别为(0.5, 0.5, -0.5) p.u.，合闸角为 0°；通过仿真计算得到合闸后前五个周波内的零序涌流波形如图 8 中黑色实线所示。同时，将以上

合闸条件与第 1 节所述的实际变压器参数代入零序涌流半解析数学表达式(1)和式(2)中, 得到由零序涌流半解析理论模型所模拟出的零序涌流波形, 如图 8 红色虚线所示。由图 8 对比可知, 根据数学模型计算得到的零序涌流波形几乎与仿真模型相同。为了进一步说明两波形的相似程度, 提取零序涌流波形的二次谐波含量及间断角, 结果如表 1 所示。由表 1 可知, 这两个零序涌流特征量的误差也仅有 6%。由此, 验证了零序涌流半解析理论模型的准确性, 同时前述基于零序涌流特征分析及结论的正确性也得到印证。

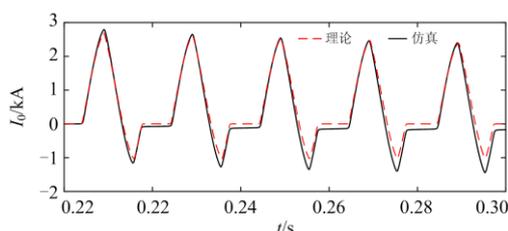


图 8 理论波形与仿真波形对比图

Fig. 8 Wave comparison diagram of theoretical model and simulation model

表 1 零序涌流的二次谐波含量及间断角大小

Table 1 Second harmonic component and dead angle of zero-sequence inrush

	二次谐波含量/%	间断角/(°)
理论模型	58	130.5
仿真模型	62	135

算例 2: 小涌流工况下高压内置变备自投场景

假设变电站主变 T2 在第 0.15 s 发生故障, 主变被切除后, 备自投装置启动, 备用变 T2 投入运行。图 9 所示即为备自投过程中负载 L1 侧电压波形和上游线路零序电流及其基波分量波形。

由图 9 可知, 在 0.15 s 主变故障后, 变压器差动保护迅速出口动作(20 ms 内), 断路器 S3、S4、S5 跳闸切除故障变压器。随着主变退出运行, 负载 L1 失压, 供电中断。依照预设的备自投逻辑, 在主变差动保护动作后 0.1 s(时间轴 0.25 s), 断路器 S6 闭合, 备用变投入运行, 此时其三相剩磁为(0.7, -0.7, -0.7) p.u., 合闸角为 180°。受变压器铁芯饱和的影响, 备用变合闸后线路中出现零序涌流。由于此时零序涌流幅值小于线路零序过流保护动作门槛, 保护并不会启动。在备用变压器合闸 0.5 s 后(时间轴 0.75 s), 负载 L1 侧断路器 S7 合闸, 负载恢复供电, 备自投成功。负载 L2 侧电压波形的变化趋势与 L1 相同, 断电、供电时间也完全一致, 只是

电压幅值大小因电压等级不同而存在差异, 篇幅所限, 不再以图形方式展开, 下同。

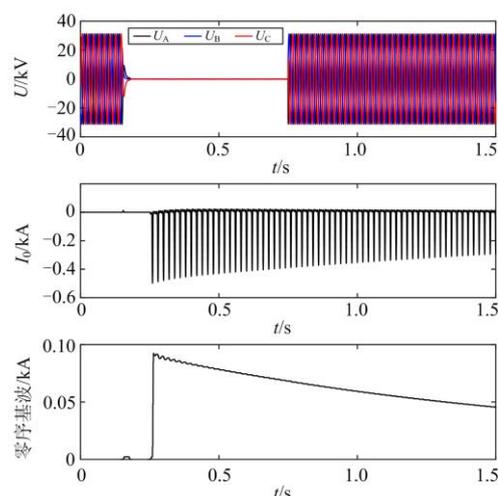


图 9 小涌流工况下, 高压内置变备自投期间电压电流波形
Fig. 9 Voltage and current wave during automatic device transfer of high-voltage built-in transformer when the inrush is not serious

算例 3: 大涌流工况下高压内置变备自投场景
将算例 2 场景下的备用变压器三相剩磁设为(-1,1,1) p.u., 其余仿真条件不变, 进行仿真模拟。图 10 所示为负载 L1 侧电压、线路零序电流及其基波分量波形。第 0.15 s 主变发生故障, 变压器差动保护迅速动作, 切除故障变压器, 备自投装置启动。理论上, 与算例 1 分析过程类似, 在备用变投入运行后, 负载侧应在 0.75 s 恢复供电。但是根据图 10 所示的负载 L1 侧电压可知, 此时恢复供电失败。

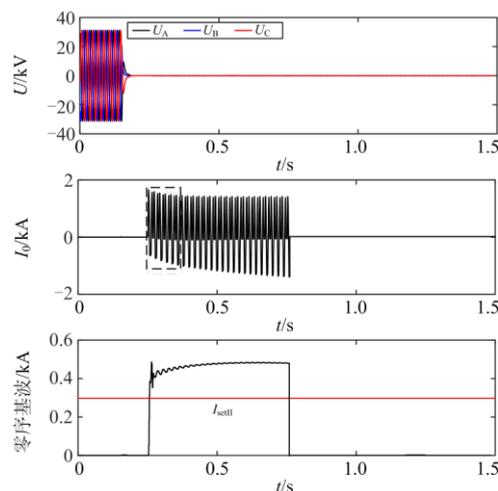


图 10 大涌流工况下, 高压内置变备自投期间电压电流波形
Fig. 10 Voltage and current wave during automatic device transfer of high-voltage built-in transformer when the inrush is serious

分析原因，这是由于在当前备自投工况下，备用三相铁芯饱和程度较深，零序涌流波形幅值超过了零序过流保护 II 段动作门槛值，在变压器投运后 0.5 s(时间轴 0.75 s)，线路零序过流保护误动作。因此，即使负载侧断路器在 0.75 s 合闸后，负载依旧无法恢复供电，备自投失败。

下面分别对引入二次谐波闭锁判据、间断角闭锁判据后高压内置变备自投场景进行分析。

在引入二次谐波判据后，负载 L1 侧电压、流经线路的零序电流波形及其基波分量波形如图 11 所示。由图 11 可知，主变因故障被切除后，备用变投入运行，尽管零序基波幅值超过零序过流保护 II 段整定值，但零序过流保护并没有因此误动，在断路器 S6 闭合后 0.5 s(时间轴 0.75 s)，断路器 S7 合闸，负载侧恢复供电，备用变成功投运。这是由于在备自投过程中，零序涌流的二次谐波含量在合闸后最低也有 70%，如图 12 所示，超过二次谐波整定门槛 20%，线路零序过流保护被成功闭锁。此外，由图 12 可知，随着涌流发展，二次谐波含量整体呈现上升趋势，故其始终大于二次谐波门槛值，因此在涌流存续期间保护不会误开放。

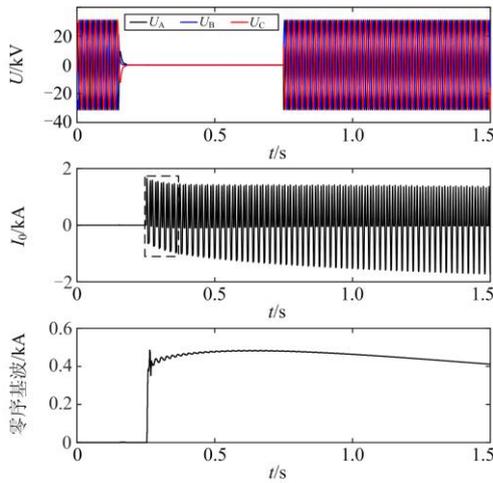


图 11 引入二次谐波闭锁判据后，电压和电流波形

Fig. 11 Voltage and current wave after second harmonic breaking criterion is used

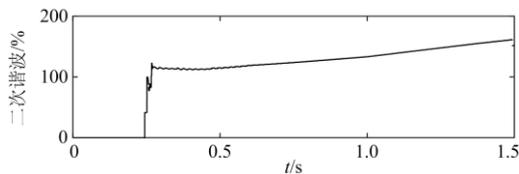


图 12 备自投过程中零序涌流的二次谐波含量

Fig. 12 Second harmonic component of zero-sequence inrush during automatic device transfer

改变备用变压器投运时的合闸条件，进行大量仿真试验，结果表明，当采用二次谐波闭锁判据作为涌流闭锁判据时，线路零序过流保护均不会误跳闸，备用变均能正常投运。

对于间断角闭锁判据，情况有所不同。备自投过程中间断角随时间变化关系如图 13 所示。

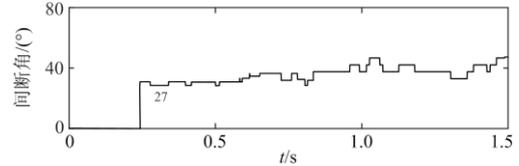


图 13 零序涌流间断角随时间变化关系

Fig. 13 Dead angle of zero-sequence inrush vs. time

由图 13 可知，间断角在合闸初期达到最小值 27°，低于间断角判据的整定门槛 35°，因此闭锁判据未能成功闭锁线路零序过流保护。若是将间断角判据的整定门槛值调整至 27°之下，则可避免上述闭锁判据拒动情况，其弊端将会在算例 4 展开分析。

算例 4 故障场景下两种判据的可用性分析

设 0.2 s 时线路发生单相接地故障，零序电流为如图 14 所示的正弦波形，提取其二次谐波分量，如图 15 所示。

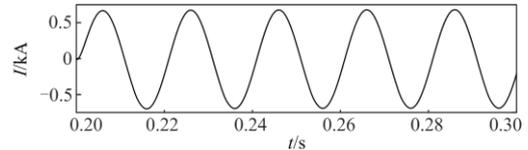


图 14 故障后零序电流波形

Fig. 14 Zero-sequence current after fault occurs

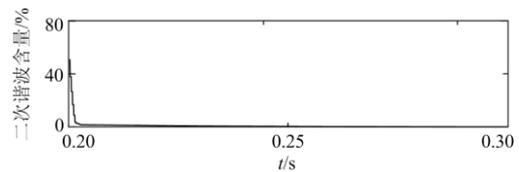


图 15 零序电流的二次谐波分量

Fig. 15 Second harmonic component of zero-sequence current

由图 15 可知，故障情况下的二次谐波含量经短暂的过渡过程(1 个周波)，迅速下降至 0%，并不会引起门槛值为 20%的闭锁判据动作，保护维持原有的跳闸逻辑。在纵联保护失效的情况下，零序过流保护 I 段在故障后 0.2 s 出口动作，切除故障。

本算例以单相接地故障为例，对二次谐波闭锁判据的可信赖性进行分析。故障位置和故障类型不同，仅影响电流的幅值大小而并不会改变零序电流的二次谐波含量。

顺便指出, 计算结果表明, 故障零序电流的间断角长期维持在 29° , 因此, 若是依照算例 2 所言, 将间断角判据的整定门槛调整至 27° 以下, 则导致该闭锁判据将故障工况全部识别为零序涌流, 保护无法正常出口, 严重影响保护的可靠性。综上, 无论如何调整间断角的门槛值, 传统的间断角识别逻辑难以完全区分故障和涌流工况。

4 结论

针对高压内置变备自投过程中高幅值慢衰减的零序涌流导致各段零序电流保护误动的问题, 本文通过零序涌流数学表达式对零序涌流波形特征进行分析, 并以此为依据就传统的二次谐波闭锁判据和间断角判据在零序过流保护中的适应性进行了理论分析和仿真验证, 形成如下结论:

1) 零序涌流的间断角明显减小, 最小可低至 27° , 导致涌流与故障情况下的间断角存在混叠, 不适用于区分零序故障电流和零序涌流, 因此不宜作为涌流闭锁方案引入零序过流保护。

2) 相比变压器差动保护所用的涌流(相涌流或线涌流), 零序涌流的二次谐波含量大幅提升, 均在 30% 以上, 因此, 在零序涌流工况下, 二次谐波的特征得到了强化, 二次谐波闭锁判据可作为零序过流保护的附加闭锁判据, 鉴别涌流工况, 及时实现上游保护的防误动闭锁, 提高备自投的成功率。

参考文献

- [1] 应飞祥, 姜燕波, 何民, 等. 含风储系统的电力系统可靠性评估进展与展望[J]. 智慧电力, 2019, 47(2): 1-8, 42.
YING Feixiang, JIANG Yanbo, HE Min, et al. Progress and prospect of reliability assessment of power system with wind farm and energy storage system[J]. Smart Power, 2019, 47(2): 1-8, 42.
- [2] 李格格, 李存斌. 基于扩充样本的电力系统可靠性动态与实时研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(1): 88-93.
LI Gege, LI Cunbin. Dynamic and real-time research on reliability evaluation of electric power system based on extended sample[J]. Smart Power, 2019, 47(1): 88-93.
- [3] 陈华, 王强, 刘晓坤. 基于 BAS-BP 模型的变压器故障诊断[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2020, 33(4): 635-639.
CHEN Hua, WANG Qiang, LIU Xiaokun. Transformer fault diagnosis based on BAS-BP model[J]. Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition, 2020, 33(4): 635-639.
- [4] 王庆磊. 景湖变电站 220 kV 备自投系统的研究与应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
WANG Qinglei. Research and application of 220 kV backup power automatic switch system in Jinghu substation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [5] 吕强. 发电厂启动备用变压器投入技术研究及应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
Lǚ Qiang. Research and application of power plant using backup transformer switching[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [6] 黄晶晶. 一起励磁涌流引起后备保护误动作的分析及探讨[J]. 南方能源建设, 2014, 1(1): 106-110.
HUANG Jingjing. Analysis and discussion on incorrect operation of backup protection caused by inrush current[J]. Southern Energy Construction, 2014, 1(1): 106-110.
- [7] 李晓华, 罗龙波, 谢金泉, 等. 高压内置型高压内置型变压器涌流特性对保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 108-114.
LI Xiaohua, LUO Longbo, XIE Jinquan, et al. Impact of inrush current characteristics of high-voltage built-in high-impedance transformer on relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 108-114.
- [8] 郭倩雯, 莫文雄, 郑方晴, 等. 高压内置型变压器空投导致零序电流保护误动分析及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 164-170.
GUO Qianwen, MO Wenxiong, ZHENG Fangqing, et al. Analysis and measures of zero sequence current protection malfunction caused by no-load high-voltage built-in transformer[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 164-170.
- [9] 李勇, 苏钟焕, 王然丰, 等. 高压内置型高阻抗变压器励磁涌流计算分析[J]. 变压器, 2017, 54(8): 1-5.
LI Yong, SU Zhonghuan, WANG Ranfeng, et al. Calculation and analysis of magnetizing inrush current of high impedance transformer with built-in high voltage winding[J]. Transformer, 2017, 54(8): 1-5.
- [10] 王育学, 曹文斌, 黄明辉, 等. 变压器零模涌流解析分析及其等值电路[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 3960-3968.
WANG Yuxue, CAO Wenbin, HUANG Minghui, et al. Mathematical analysis for zero-mode inrush current of transformer and its equivalent circuit [J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 3960-3968.
- [11] 尹根根, 曹文斌, 潘远林, 等. 高阻抗变压器零模涌流特性与动模试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 1-9.
YIN Xianggen, CAO Wenbin, PAN Yuanlin, et al. Study on zero-mode inrush current characteristics and dynamic physical simulation tests of high-impedance transformer[J].

- Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 1-9.
- [12] DAS S, ANANTHAN S N, SANTOSO S. Relay performance verification using fault event records[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 226-235. DOI: 10.1186/s41601-018-0094-0.
- [13] 郭倩雯, 莫文雄, 郑方晴. 一种基于部分 Hausdorff 距离的励磁涌流识别新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 35-42.
GUO Qianwen, MO Wenxiong, ZHENG Fangqing. A new method of inrush current identification based on partial Hausdorff distance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 35-42.
- [14] 姚东晓, 张凯, 贺要锋, 等. 变压器多特征励磁涌流识别方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 149-154.
YAO Dongxiao, ZHANG Kai, HE Yaofeng, et al. Research on multi feature recognition scheme of transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 149-154.
- [15] 吴梓亮, 曾耿晖, 李一泉, 等. 基于双门槛值的变压器 Hausdorff 距离快速保护新判据[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 128-135.
WU Ziliang, ZENG Genghui, LI Yiquan, et al. A novel criterion for fast protection of transformer based on Hausdorff distance and double threshold[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 128-135.
- [16] MARQUES J P, CARDOSO JUNIOR G DE MORAIS A P. New methodology for identification of sympathetic inrush for a power transformer using wavelet transform[J]. IEEE Latin America Transactions, 2018, 16(4): 1158-1163.
- [17] PENG F, GAO H, LIU Y. Transformer sympathetic inrush characteristics and identification based on substation-area information[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 33(1): 218-228.
- [18] 和敬涵, 李静正, 姚斌, 等. 基于波形正弦度特征的变压器励磁涌流判别算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 54-59.
HE Jinghan, LI Jingzheng, YAO Bin, et al. A new approach of transformer inrush detected based on the sine degree principle of current waveforms[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 54-59.
- [19] LU Z, TANG W H, JI T Y, et al. A morphological scheme for inrush identification in transformer protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 560-568.
- [20] WANG W, YAN L, JIN T, et al. Inrush current method of transformer based on wavelet packet and neural network[J]. The Journal of Engineering, 2019, 16: 1257-1260.
- [21] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [22] 焦在滨, 行武, 王钊, 等. 变压器励磁涌流负序二次谐波特征及机理[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 146-151.
JIAO Zaibin, XING Wu, WANG Zhao, et al. Features and mechanism of negative-sequence second harmonics of magnetizing inrush current in transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 146-151.
- [23] 丁富华, 邹积岩, 方春恩, 等. 相控真空断路器投切空载变压器的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 89-93.
DING Fuhua, ZOU Jiyan, FANG Chun'en, et al. Investigations on switching idle power transformer with phasing vacuum circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 89-93.

收稿日期: 2020-03-19; 修回日期: 2020-07-16

作者简介:

冯宝成(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail: fengbc@nrec.com

田志浩(1988—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电气工程、电力系统稳定分析; E-mail: nxbwddxy@163.com

摆世彬(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电气工程、电力系统稳定分析与控制。E-mail: dawn_chorus@163.com

(编辑 周金梅)