

DOI: 10.7667/PSPC171681

# 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

郭倩雯, 莫文雄, 郑方晴, 熊俊

(广州供电局电力试验研究院, 广东 广州 510054)

**摘要:** 对高压内置型变压器励磁涌流及其零序分量特性进行深入分析。结合该类型变压器结构特点, 指出与常规变压器相比, 高压内置型变压器涌流零序分量更大且衰减更为缓慢, 造成相关零序电流保护更容易发生误动。在PSCAD/EMTDC中搭建仿真模型, 分析了合闸角、剩磁和运行方式对高压内置型变压器空投时的励磁涌流零序分量的影响, 并给出了零序电流保护误动概率。建议通过优化零序电流保护定值、增加空载合闸运行及间隔时间、采用涌流抑制措施来保证变压器正常投运。

**关键词:** 高压内置型变压器; 励磁涌流; 零序分量; 误动概率

## Analysis and measures of zero sequence current protection malfunction caused by no-load high-voltage built-in transformer

GUO Qianwen, MO Wenxiong, ZHENG Fangqing, XIONG Jun

(Tests and Research Institute of Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510054, China)

**Abstract:** The characteristics of excitation inrush current and its zero sequence component of high voltage built-in transformer are studied and analyzed in this paper. Compared with the conventional transformer, the high-voltage built-in transformer inrush current zero sequence component is larger and decays more slowly under its structural characteristics, because the zero sequence current protection are more prone to misoperation. Based on EMTDC/PSCAD, the effect of residual magnetism, closing angle and operation mode on the zero sequence component of no-load transformer is analyzed. Besides, the misoperation probability of zero sequence current protection is given. It is recommended to ensure the normal operation of the transformer by optimizing the zero sequence current protection setting value, increasing no-load closing operation and interval time, and adopting inrush current suppression measures.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477090) and Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company (No. GZHKJXM20160038).

**Key words:** high-voltage built-in transformer; magnetizing inrush current; zero sequence component; malfunction probability

## 0 引言

随着电网互联, 系统容量不断增加, 阻抗减小, 短路电流也越来越大。为降低短路电流特别是变压器出口短路电流对变压器及其他电力设备的危害, 提高抗短路能力, 高压内置型高阻抗变压器作为一种有效的解决方案逐渐在电网中得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。作为一种特殊结构的变压器, 其在空投过程中可能出现变压器差动保护没有误动而后备保护——零序保护动作跳闸的现象。尽管关于变压器铁芯模型的

建立、励磁涌流的产生机理和差动保护的应对方案已经有了相应深入的研究<sup>[3-6]</sup>, 但是对于高压内置型高阻抗变压器涌流零序分量及其对相关零序保护误动影响的研究成果却很有限。

文献[17]仿真分析了变压器空投时零序电流的特点, 并指出涌流零序分量衰减较慢会导致零序过流保护误动。文献[18]对高压内置型高阻抗变压器的涌流特点开展研究, 并通过仿真模拟分析了诸多因素对于涌流零序分量幅值及其衰减特性的影响。文献[19]结合零序电流保护的整定原则, 分析了涌流零序分量对系统零序电流保护的影响, 并提出了相应的防范措施。

本文在推导变压器空投产生励磁涌流及其零序分量表达式的基础上, 结合高压内置型高阻抗变压器特殊结构分析了此类变压器涌流特点。通过仿真模拟分析了剩磁、合闸角以及系统运行方式对涌流零序分量的影响, 并结合具体整定值给出了相应的零序电流保护误动概率。最后对此类变压器空投时零序电流保护误动给出了相应的应对措施。

## 1 变压器空投涌流及其零序分量的产生

图 1 所示为单相变压器空载合闸等效电路模型。 $u(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha)$  为交流电源,  $R_s$  为系统等效电阻,  $L_s$  为系统等效电感,  $R_\sigma$ 、 $L_\sigma$  分别为变压器一次绕组漏电阻与漏电感,  $R_m$ 、 $L_m$  分别为变压器等效励磁电阻与等效励磁电感。设  $t=0$  时刻变压器空载合闸, 电压的合闸相位角为  $\alpha$ 、 $R = R_s + R_\sigma + R_m$ 、 $L = L_s + L_\sigma + L_m$ 、 $\psi = Li$ , 合闸回路的电压方程为

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha) = R \frac{\psi}{L} + \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

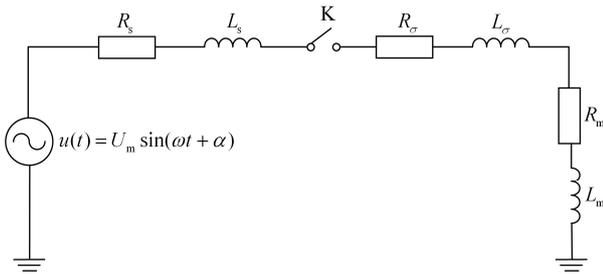


图 1 单相变压器空载合闸等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of single-phase transformer for no-load switching-in

考虑到铁芯中的磁链不能突变, 设变压器空载投入瞬间( $t=0$ )铁芯剩磁为  $\psi_r$ , 稳态磁链幅值为  $\psi_r = \frac{LU_m}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}}$ , 阻抗角  $\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R}$ , 时间常数  $\tau = \frac{L}{R}$ 。解微分方程(1)可得

$$\psi(t) = \psi_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + [\psi_r - \psi_m \sin(\alpha - \varphi)] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

在变压器空载合闸时,  $\omega L \gg R$ , 故  $\varphi \approx 90^\circ$ , 式(2)转化为

$$\psi(t) = -\psi_m \cos(\omega t + \alpha) + (\psi_r + \psi_m \cos \alpha) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

变压器励磁涌流对应的磁链由滞后于电源电压

$90^\circ$ 的稳态周期磁链和衰减的非周期磁链构成。变压器进入饱和后, 产生涌流, 此阶段磁化特性为非线性。为便于分析, 对其非线性磁化特性进行简化处理, 在饱和区域内假设励磁回路电感恒定。根据磁链与电流的关系, 近似得到励磁涌流的表达式为

$$i(t) = [-\psi_m \cos(\omega t + \alpha) + (\psi_r + \psi_m \cos \alpha) e^{-\frac{t}{\tau}}] / L \quad (4)$$

由式(4)可知, 对于单台变压器而言:

1) 涌流大小与合闸相角有关。在电压过零点(即合闸角  $\alpha=0^\circ$ )时空投, 铁芯中出现稳态磁链  $-\psi_m$ , 为保持在磁链守恒出现的非周期磁链以及周期磁链、剩磁共同作用下, 在合闸后半周期时励磁涌流达到最大值。

2) 涌流大小与剩磁有关。当剩磁方向与磁链  $\psi_m$  方向一致时, 涌流随着剩磁的增大而增大。若不考虑损耗及衰减, 在  $\alpha=0^\circ$  时合闸, 半个周期后涌流达到最大值  $i(t) = (2\psi_m + \psi_r) / L$ 。

3) 涌流大小与系统阻抗  $R_s$ 、 $L_s$  有关, 根据其稳态磁链  $\psi_m$  的关系可知, 当  $R_s$ 、 $L_s$  越大时,  $\psi_m$  越小。此外, 涌流的衰减时间  $\tau$  也与系统阻抗有关, 当  $L_s$  越大,  $R_s$  越小时,  $\tau$  越大, 涌流衰减速度越慢。

上述分析建立在单相变压器空载合闸等效电路模型基础上, 以此类比分析三相励磁涌流。假定三相铁芯的稳态磁链  $\psi_m$  以及衰减时间常数  $\tau$  相同。考虑到 A、B、C 三相相角依次相差  $120^\circ$ , 三相同时合闸时, 每相的剩磁可能不同, 分别用  $\psi_{rA}$ 、 $\psi_{rB}$ 、 $\psi_{rC}$  表示,  $\psi_s$  为饱和磁链。三相励磁涌流的表达式为

$$\begin{cases} i_{\mu A}(t) = [-\psi_m \cos(\omega t + \alpha) + (\psi_{rA} + \psi_m \cos \alpha) e^{-\frac{t}{\tau}}] / L & \psi > \psi_s \\ i_{\mu A}(t) = 0 & \psi < \psi_s \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} i_{\mu B}(t) = [-\psi_m \cos(\omega t + \alpha - 120^\circ) + (\psi_{rB} + \psi_m \cos(\alpha - 120^\circ)) e^{-\frac{t}{\tau}}] / L & \psi > \psi_s \\ i_{\mu B}(t) = 0 & \psi < \psi_s \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_{\mu C}(t) = [-\psi_m \cos(\omega t + \alpha + 120^\circ) + (\psi_{rC} + \psi_m \cos(\alpha + 120^\circ)) e^{-\frac{t}{\tau}}] / L & \psi > \psi_s \\ i_{\mu C}(t) = 0 & \psi < \psi_s \end{cases}$$

变压器空载合闸时，通常产生幅值很大的励磁涌流，且含有大量谐波。合闸中性点接地变压器等效为一个衰减的零序电流源，图2所示为零序等效网络。

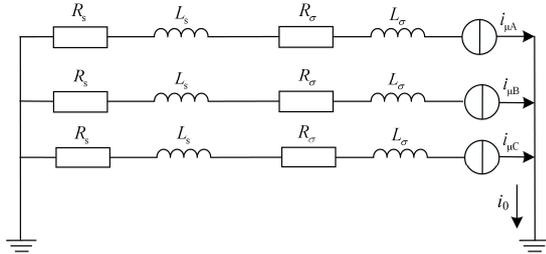


图2 变压器励磁涌流零序等效网络

Fig. 2 Zero sequence equivalent circuit of magnetizing inrush current

考虑到合闸时各相剩磁、合闸角以及系统参数的影响，使变压器各相进入铁芯饱和程度不同，三相励磁涌流中含有大量不对称分量。由于A、B、C三相电压相位差120°，无论任何时刻变压器空投，至少有两相出现不同程度的励磁涌流，其三相涌流之和不等于0，即产生了零序涌流*i<sub>0</sub>*：

$$i_0(t) = i_{\mu A}(t) + i_{\mu B}(t) + i_{\mu C}(t) \quad (6)$$

接地变压器以及电流互感器中性点流过的零序电流*i<sub>0</sub>*为每相零序电流的3倍。

## 2 高压内置型高阻抗变压器特殊性分析

高阻抗变压器由于具备可以降低系统阻抗、限制短路电流等诸多优势，得到越来越广泛的应用。其最大特点是中低压线圈的阻抗较标准值有很大的提高。为了同时满足变压器高阻抗的阻抗匹配的要求，行业内一般实现高阻抗的方式有四种：1) 增加绕组匝数，加大绕组主通道面积；2) 采用分裂绕组的方式；3) 低压绕组串联限流电抗器的方式；4) 高压内置方式。

对于双绕组变压器，第一种实现方式结构简单、成本低，为主流设计结构。但对于三绕组高阻抗变压器，第一、二种实现方式成本较高，一般不被变压器制造厂家采用。第三种方式就是在常规标准阻抗变压器的低压线圈中串联限流电抗器，从而使高中、中低的短路阻抗增加，达到高阻抗变压器的要求。第四种方式机构成熟、技术先进、可靠性高，是国内同行业普遍采用的一种方式。它将高压绕组放置于铁芯侧，通常三绕组高阻抗变压器高-中阻抗为标准阻抗，高-低阻抗及中-低阻抗为高阻抗，绕组排列为铁芯-高压-中压-调压-低压，如图3(b)所示。在满足高-中阻抗要求之后，中-低阻抗可以通过调整中-低之间的通道面积来满足要求，实现阻抗匹配。

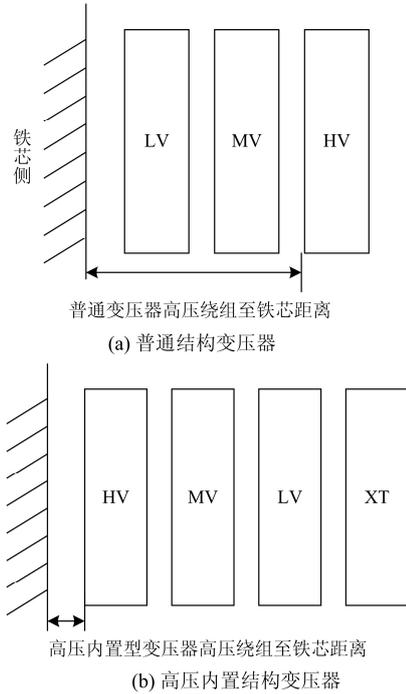


图3 变压器结构示意图

Fig. 3 Arrangement diagram of two kinds of transformers

相比于普通变压器的高压线圈置于外侧，如图3(a)所示，高压内置型变压器将高压侧绕组内置，具有变压器铁芯到高压侧的距离小、高压侧的线圈和铁芯的主要通道面积比普通的变压器小的特点，其高压线圈磁阻较小。综合考虑磁路长度和主通道面积的影响，较同等电压等级的变压器，高压内置型变压器具有励磁涌流大且衰减时间常数略大的特点。取某高压内置型高阻抗变压器参数和普通结构变压器参数进行仿真，系统参数为  $E_s = 220\angle 0^\circ$ 、 $Z_s = 4.3\angle 85^\circ$ ，单台高压内置型高阻抗变压器励磁涌流零序基波分量(3*I<sub>0</sub>*)和普通变压器励磁涌流零序基波分量对比结果如图4所示，在同等条件下空投变压器，高压内置型高阻抗变压器比普通变压器励磁涌流更大，且衰减常数也更大，衰减速度慢。

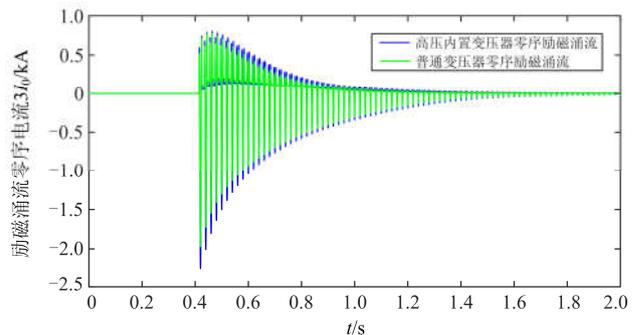


图4 高压内置与普通变励磁涌流3*I<sub>0</sub>*对比

Fig. 4 Zero-sequence of magnetizing inrush current 3*I<sub>0</sub>*

### 3 仿真模拟

由第 1 节分析可知, 变压器空载投运时, 励磁涌流的大小及其衰减时间与空载合闸角、系统运行方式、变压器剩磁等因素密切相关。三相变压器的相间作用影响使得涌流衰减特性更为复杂多变, 理论分析具有较大难度。参考广东电网某次变压器空投导致分段零序电流 II 段保护(整定电流: 0.18 kA, 动作时间 0.5 s)误动案例, 在 EMTDC/PSCAD 中搭建高压内置型高阻抗变压器模型, 对影响励磁涌流大小和衰减的因素——空载合闸角、剩磁、系统运行方式采用控制变量法进行分析, 为解决相应保护误动提供依据。

系统模型如图 5 所示, 系统参数如下:  $E=220\text{ kV}$ , 运行阻抗  $Z_s = 4.3\angle 85^\circ \Omega$ , 三相变压器额定电压 220/115/10.5 kV, 额定阻抗: 21%(M-L)/14%(H-M)/35%(H-L), 连接组标号 Ynyn0d11。

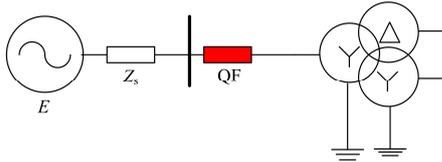


图 5 220 kV 系统等值模型

Fig. 5 Equivalent model of 220 kV system

#### 3.1 合闸角影响

为便于对比分析, 设定变压器在三相剩磁为(0、0、0) p.u.同时合闸, 对不同合闸角 0~360°(每隔 5°)进行仿真。记录合闸后零序电流  $3I_0$  在达到零序 II 段电流保护整定时间 0.5 s 时刻的幅值, 并与整定电流对比, 仿真结果如图 6 所示。

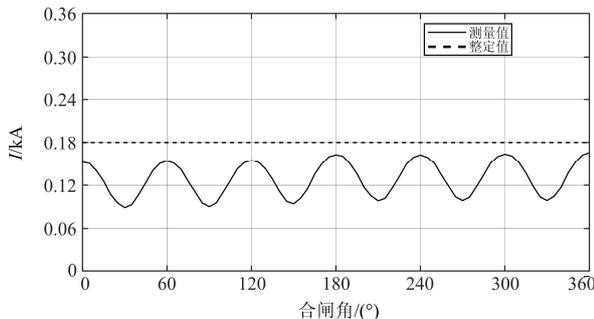


图 6 不同角度合闸时涌流零序分量

Fig. 6 Zero sequence component of inrush current when closing at different angles

由图 6 可看出, 在三相剩磁为 0 时, 零序电流呈现周期性变化的对称趋势, 周期接近 60°。在此

种情况下, 无论任何角度合闸, 零序电流基波分量的幅值都不会超过零序电流 II 段的整定值, 保护不会误动。

#### 3.2 剩磁影响

为探究变压器剩磁对励磁涌流的影响, 设定其他条件不变, 调整变压器剩磁为典型值<sup>[20]</sup>(0.3, -0.15, -0.15) p.u.、(0.5, -0.25, -0.25) p.u.、(0.9, -0.45, -0.45) p.u.时, 记录不同合闸角下零序电流  $3I_0$  在达到零序 II 段电流保护整定时间 0.5 s 时刻的幅值, 并与整定值作对比分析不同剩磁下保护误动概率, 仿真结果如图 7—图 9 所示。

在无剩磁情况下, 任何角度合闸零序电流 II 段保护都不会误动; 当剩磁为(0.3, -0.15, -0.15) p.u., 在区间 40°~120°以及 240°~320°区间合闸时, 零序电流 II 段保护误动, 误动概率为 44.4%; 随着剩磁的增加, 零序电流基波分量的峰值也不断增加, 且其周期越来越长, 保护误动概率也逐渐增大, 在剩磁为(0.9, -0.45, -0.45) p.u.时, 零序电流 II 段保护概率约为 56.9%。

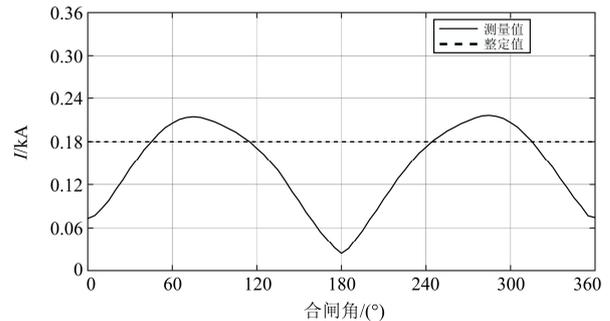


图 7 剩磁为(0.3, -0.15, -0.15) p.u.时零序电流保护误动概率

Fig. 7 Maloperation probability of zero sequence current protection when remanence is (0.3, -0.15, -0.15) p.u.

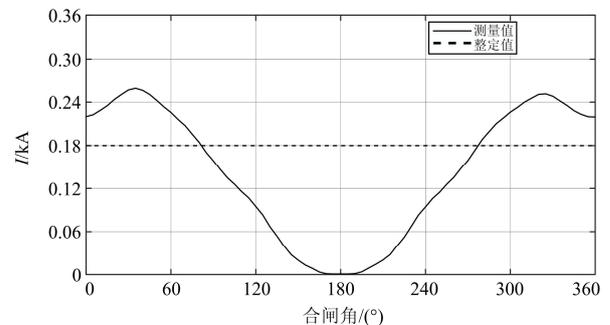


图 8 剩磁为(0.5, -0.25, -0.25) p.u.时零序电流保护误动概率

Fig. 8 Maloperation probability of zero sequence current protection when remanence is (0.5, -0.25, -0.25) p.u.

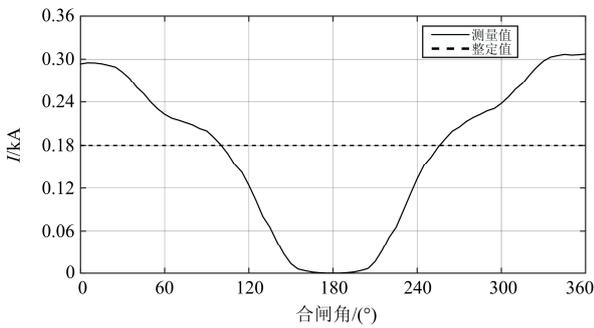


图 9 剩磁为(0.9, -0.45, -0.45) p.u.时零序电流保护  
误动概率

Fig. 9 Maloperation probability of zero sequence current protection when remanence is (0.9, -0.45, -0.45) p.u.

### 3.3 系统运行方式影响

设定系统在大运行方式  $Z_s = 4.3 \angle 85^\circ$ 、小运行方式  $Z_s = 19.8 \angle 85^\circ$  两种方式下运行，其在不同合闸角下的仿真结果如图 10 所示。在大运行方式下任意角度合闸时保护误动概率为 62.6%，在小运行方式下保护误动概率为 56.9%。

系统运行方式对励磁涌流的影响主要体现为系统阻抗的影响，在不同的系统运行方式下，系统的等值阻抗不同，导致稳态磁链  $\psi_m$  不同。系统在大运行方式下的等值阻抗比小运行方式下的等值阻抗小，所以其稳态磁通幅值  $\psi_m$  较大。此外，系统等值阻抗不同也会对涌流的衰减速度产生影响。根据系统阻抗与衰减时间常数的关系可知，大方式运行情况下的励磁涌流零序基波分量衰减速度比小运行方式下慢，更容易导致零序电流保护误动。

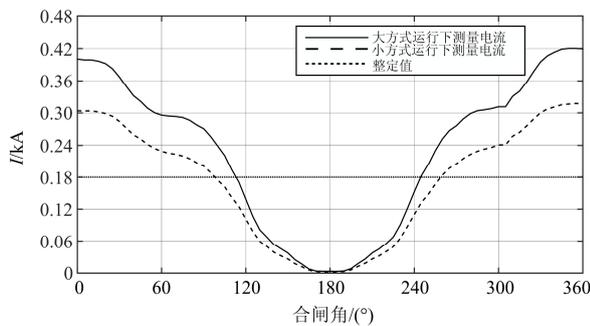


图 10 不同运行方式下零序电流保护误动概率

Fig. 10 Maloperation probability of zero sequence current protection under different operation modes

## 4 应对策略

### 1) 优化零序电流保护定值

由上述仿真分析可知，在达到整定时间时，涌流零序分量的幅值受到合闸角、剩磁、运行方式等

诸多因素的综合影响。可考虑结合实际运行情况，考虑系统最大运行方式下，空投变压器最大剩磁以及某确定合闸角情况下，对可能引起的零序电流保护定值重新整定，考虑变压器投运的成功率、保护灵敏度以及对电力系统的影响，适当提高整定电流、延长动作时间。

### 2) 增加空载合闸运行及间隔时间

由于空载合闸产生励磁涌流，并且衰减时间较长，建议每次合闸后，空载运行一段时间，这样有利于消除饱和和磁密，建议持续运行时间不小于 30 min，分闸后铁芯中仍留有一定剩磁，需要一定的退磁时间，建议分闸 1 h 后投运第二次。

### 3) 采用涌流抑制措施

在高压侧增加涌流抑制器装置空投主变时，可以利用涌流抑制器通过选相控制主变高压侧开关，抑制变压器空投时产生的励磁涌流。涌流抑制器通过测量和记录变压器退出时的剩磁极性，以此为依据在合闸时通过控制断路器合闸角度制造一个与剩磁极性相反的偏磁，剩磁与偏磁部分抵消，使得总磁通不越过饱和磁通从而实现涌流的抑制。

## 5 结论

本文主要研究了变压器空投时涌流零序分量的产生机理，分析了高压内置型高阻抗变压器的结构特点，其特殊性导致其励磁涌流较一般结构变压器大，并且衰减更为缓慢。通过仿真模拟分析了合闸角、剩磁以及系统运行方式对涌流零序分量的影响，得出主要结论如下：

- 1) 在不同角度合闸时，涌流零序分量也呈现周期性变化，且随着剩磁的增加，其零序分量随合闸角的变化周期逐渐增大；
- 2) 剩磁的增加导致涌流零序分量的基波峰值增大，可能导致零序电流保护误动的概率也增大；
- 3) 与在小运行方式下运行时相比，系统在大运行方式下变压器空投所产生的涌流零序分量更大，导致零序电流保护误动的概率也更大。

为应对变压器空投导致零序电流保护误动，本文建议采用优化零序电流保护定值、增加空载合闸运行及间隔时间、采用涌流抑制措施等对策以确保变压器的安全投运。

## 参考文献

[1] 刘刚, 黄华. 高阻抗电力变压器的设计思路[J]. 变压器, 2015, 52(9): 1-5.  
LIU Gang, HUANG Hua. Design thought of high impedance power transformer[J]. Transformer, 2015,

- 52(9): 1-5.
- [2] 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.
- [3] 傅伟, 赵莉华, 梁勇, 等. 多台变压器空载合闸励磁涌流及其抑制方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 28-33.  
FU Wei, ZHAO Lihua, LIANG Yong, et al. Study on no-load closing inrush current of transformer group and suppression measures[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 28-33.
- [4] WU Y H, DONG X Z, MIRSAEIDI S. Modeling and simulation of air-gapped current transformer based on Preisach theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 111-121. DOI: 10.1186/s41601-017-0046-0.
- [5] 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): 91-94.  
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): 91-94.
- [6] 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.
- [7] 刘小宝, 吴崇昊, 宋艳, 等. 基于二次谐波的自适应制动涌流方案[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 131-134.  
LIU Xiaobao, WU Chonghao, SONG Yan, et al. Adaptive secondary harmonic restraint method for inrush current[J]. Power System Protection and Control 2010, 38(18): 131-134.
- [8] 邵文权, 乔妮, 王建波. 基于波形互相关系数的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 14-20.  
SHAO Wenquan, QIAN Ni, WANG Jianbo. A novel algorithm of identify inrush current based on waveform cross-correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 14-20.
- [9] 周建平, 罗建. 变压器铁心剩磁的一种估算方法[J]. 热力发电, 2010, 39(3): 61-64.  
ZHOU Jianping, LUO Jian. A method of estimating residual magnetism in iron core of transformers[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(3): 61-64.
- [10] 姚东晓, 邓茂军, 倪传坤, 等. 变压器多侧励磁涌流产生机理及对差动快速动作区影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 36-41.  
YAO Dongxiao, DENG Maojun, NI Chuankun, et al. Transformer's multi-side inrush current generation mechanism and its influence on the differential protection's fast action zone[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 36-41.
- [11] 张召峰, 孙庆森, 张海峰, 等. 变压器励磁涌流中的信息熵识别[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 107-111.  
ZHANG Shaofeng, SUN Qingsen, ZHANG Haifeng, et al. Identification of information entropy in transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 107-111.
- [12] 孙庆森, 张海峰, 王猛, 等. 小波算法在变压器励磁涌流中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 121-125.  
SUN Qingsen, ZHANG Haifeng, WANG Meng, et al. Application of wavelet algorithm in the transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 121-125.
- [13] 陈继瑞, 张营伟, 刘洁, 等. 一种变压器保护采样可靠性及涌流识别方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 166-170.  
CHEN Jirui, ZHANG Yingwei, LIU Jie, et al. A research of transformer protection about sampling reliability and inrush current identification[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 166-170.
- [14] 王业, 陆于平, 蔡超, 等. 采用自适应数据窗电流的励磁涌流鉴别方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 702-711.  
WANG Ye, LU Yuping, CAI Chao, et al. A magnetizing inrush identification method applying adaptive data-window currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 702-711.
- [15] 王雪, 王增平. 基于波形时域分布特征的变压器励磁涌流识别[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 148-154.  
WANG Xue, WANG Zengping. Identification of transformer inrush currents based on waveform distribution characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 148-154.

- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 李晓华, 罗龙波, 谢金泉, 等. 高压内置型高阻抗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.
- [19] 方榆冬, 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 Bingquan. Influence of transformer inrush on zero-sequence current protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(9): 115-118.
- [20] 沃建栋, 郑涛, 万磊, 等. 基于合闸控制策略的变压器励磁涌流抑制措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 32-36.  
WO Jiandong, ZHENG Tao, WAN Lei, et al. Study on inrush current suppression method based on the breaker control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 32-36.

收稿日期: 2017-11-15; 修回日期: 2018-01-26

作者简介:

郭倩雯(1989—), 女, 硕士, 主要研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: guoqw@guangzhou.csg.cn

(编辑 魏小丽)