变压器励磁涌流原理及实际案例分析

王 顺，徐 超，张 健，段瑞海

（中交机电工程局有限公司，北京 100088）

摘要：变压器空载合闸时，由于铁心的磁饱和状态会产生很大的励磁涌流。通过励磁涌流数学模型，详细说明了其产生机理。在 MATLAB 中建立空载合闸仿真模型，分析了涌流特性及对电力系统的危害。对涌流造成变压器送电失败的实际案例进行了详细分析，提出了解决方法并验证有效。为避免涌流造成变压器投运失败，提出了适用于工程实际的应对措施。

关键词：变压器；励磁涌流；仿真模型；保护跳闸

The principle and practical case analysis of magnetizing inrush current in transformer

WANG Shun, XU Chao, ZHANG Jian, DUAN Ruihai

(CCCC Mechanical & Electrical Engineering Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: The magnetic saturation state of iron core will produce a large excitation inrush current, when the transformer is closed without load. Based on the mathematical model of inrush current, the mechanism of inrush current is explained in detail. The simulation model of no-load closing is established in Matlab, the characteristics of inrush current and its harm to power system are analyzed. In this paper, the actual case of transformer operation failure caused by inrush current is analyzed in detail, the solution is proposed and verified to be effective. In order to avoid transformer operation failure caused by inrush current, the corresponding measures suitable for engineering practice are put forward.

Key words: transformer; inrush current; simulation model; protection trip

0 引言

作为电力系统中的关键设备，变压器的稳定运行为系统的可靠性提供了坚实保障。电力变压器是通过铁心和绕组的电磁感应作用来达到改变交流电压的目的。在空载合闸时，变压器往往会产生较大的励磁涌流，可能造成继电保护误动作，导致变压器投入失败。

目前，针对涌流的研究主要集中在识别与抑制方法[1-3]，工程实践的应用研究和案例分析较少。深入研究励磁涌流对送电过程的影响，探讨适用于工程实践的有效应对措施，对提高系统可靠性，提升送电成功率和效率具有重要意义。对励磁涌流进行了数学推导和仿真分析，在剖析实际工程案例的基础上，总结了几点应对措施。

1 励磁涌流原理

1.1 励磁涌流定义

在正常运行情况下，变压器励磁电流较小，一般不超过额定电流的2%～5%[4]，现代大型变压器的励磁涌流通常不大于额定电流的1%。但在空载合闸或故障切除后恢复供电时，由于铁心的磁饱和状态，会在电压突变侧产生幅值很高的

瞬间冲击电流，这种在正常工况下产生的富含高次谐波的冲击电流即为变压器的励磁涌流。

1.2 励磁涌流产生机理

励磁涌流产生的根本原因在于铁心的磁通过饱和状态。图1为变压器铁心磁化特性曲线$\varphi=f(i_e)$，φ为变压器铁心的总磁通，i_e为励磁电流，φ_r为合闸时的剩磁通，φ_{sa}为饱和磁通。当铁心磁通未饱和时，励磁电流很小；当$\varphi\geqslant\varphi_{sa}$时，铁心处于磁饱和状态，若此时磁通继续增加，则励磁电流将急剧增大，从而产生励磁涌流。

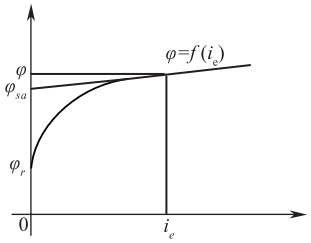


图 1　变压器铁心磁化特性曲线

Fig. 1 Magnetic characteristic curve of transformer core

为便于说明励磁涌流产生机理，以单相双绕组变压器为例来分析其励磁涌流特性。图2为单相变压器空载合闸原理图，U_1为一次侧电源电压，R_1是一次侧等效电阻，L_m是励磁电感，N_1是一次绕组线圈匝数，α为合闸时的电压相角。

由于漏感很小且励磁电阻远小于励磁电抗，这样可以得到合闸时的电压方程为

$$U_1=U_{1m}\sin(\omega t+\alpha)=R_1 i_1+N_1\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

由磁链公式得出$i_1=\dfrac{N_1\varphi}{L_m}$并代入式（1），得出磁通的一阶微分方程为

$$N_1\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}+\frac{N_1R_1}{L_m}\varphi=U_{1m}\sin(\omega t+\alpha) \tag{2}$$

求解微分方程，并代入合闸初始状态时剩磁φ_r，得到磁通表达式为

$$\begin{cases}\varphi=\varphi_s+(\varphi_r-\varphi_s)\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}\\ \varphi_s=\dfrac{L_mU_m}{N_1\sqrt{R_1^2+(\omega L_m)^2}}\sin\left(\omega t+\alpha-\arccos\dfrac{R_1}{\sqrt{R_1^2+(\omega L_m)^2}}\right)\end{cases} \tag{3}$$

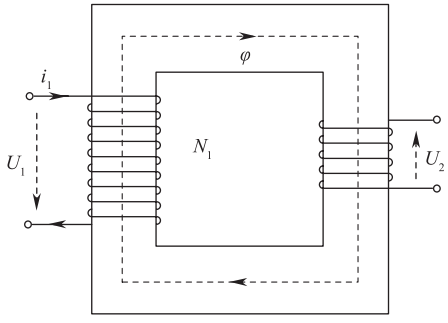
式中，φ_s为磁通稳态分量；$(\varphi_r-\varphi_s)\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}$为暂态分量，其中时间常数$\tau=\dfrac{L_m}{R_1}$，$(\varphi_r-\varphi_s)$是由初始条件确定的常数。

由于等效电阻R_1远小于励磁电抗ωL_m，因此可以得出$\arccos\dfrac{R_1}{\sqrt{R_1^2+(\omega L_m)^2}}\approx\dfrac{\pi}{2}$，则磁通表达式可化简为

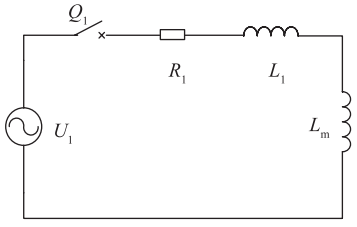
$$\begin{cases}\varphi=\varphi_m\sin(\omega t+\alpha-\dfrac{\pi}{2})+\left[\varphi_r-\varphi_m\sin(\alpha-\dfrac{\pi}{2})\right]\mathrm{e}^{-\frac{R_1}{L_m}t}\\ \varphi_m=\dfrac{L_mU_m}{N_1\sqrt{R_1^2+(\omega L_m)^2}}\end{cases} \tag{4}$$

由式（4）可知，变压器磁通稳态分量的幅值由N_1、R_1、L_m和U_m等电路参数共同确定，在电路参数确定的情况下，稳态分量幅值不变；暂态分量的幅值由合闸时的剩磁φ_r和相角α共同确定，并随着时间衰减。

当经过半个周期$\omega t=180^\circ$且合闸初相角$\alpha=0$时，磁通将达到最大值$\varphi\approx2\varphi_m+\varphi_r$，此时铁心严重饱和，从而产生励磁涌流。励磁涌流在第一个周期内达到最大值，以后随着时间慢慢衰减，直至进入稳定运行状态[5]。



（a）单相变压器铁心结构图



（b）空载合闸近似等效电路图

图 2　单相变压器空载合闸原理图

Fig. 2 Schematic diagram of no-load closing of single-phase transformer

2 MATLAB仿真分析

2.1 基于MATLAB的仿真模型

将变压器出厂试验报告中的空载试验数据代入式（5）~式（7），可以求出励磁电阻和励磁电感。以佛山地铁2号线湖涌停车场牵引及降压混合变电所为例，在MATLAB/Simulink中建立励磁涌流仿真模型，如图3所示。变压器铁心设置为磁饱和状态，通过开关模拟单台变压器合闸动作，同时忽略整流变压器移相角的影响。

$$R_{\mathrm{m}}=\frac{P_0}{3I_0^2} \tag{5}$$

$$Z_{\mathrm{m}}=\frac{U_{1\mathrm{N}}}{\sqrt{3}I_0} \tag{6}$$

$$L_{\mathrm{m}}=\frac{\sqrt{Z_{\mathrm{m}}^2-r_{\mathrm{m}}^2}}{2\pi f} \tag{7}$$

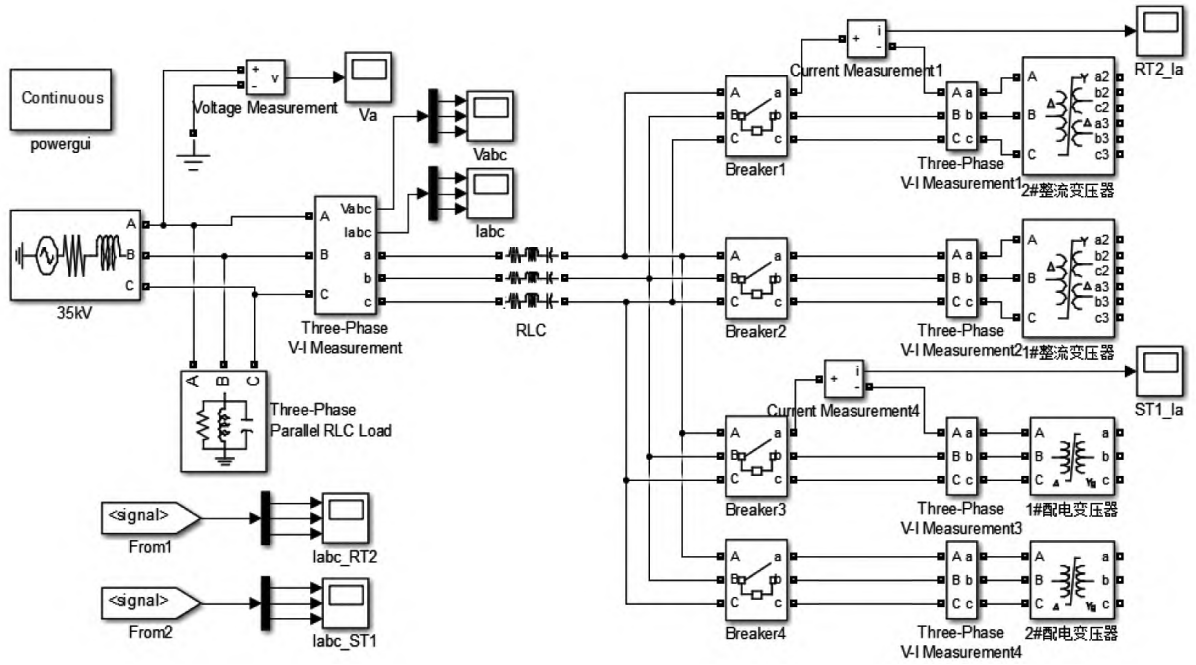


图 3 整流变压器励磁涌流仿真模型

Fig. 3 Simulation model of excitation inrush current of rectifier transformer

2.2 仿真分析

利用模型对单台35 kV/1.18 kV、2 500 kV·A、Dy5d0整流变压器进行仿真，分析其励磁涌流波形。

图4为2#整流变压器空载合闸后0.6 s内的励磁涌流仿真波形，A、B、C三相励磁涌流均偏向时间轴一侧，励磁涌流远远大于正常运行时的空载电流，涌流幅值在第一个周期达到最大值后随时间逐步衰减，三相因合闸初相角不同励磁涌流也不同。

图5为2#整流变压器A相励磁涌流前10个周期FFT分析图，励磁涌流含有很大的直流分量和高次谐波分量，总谐波畸变率THD达到34.22%。

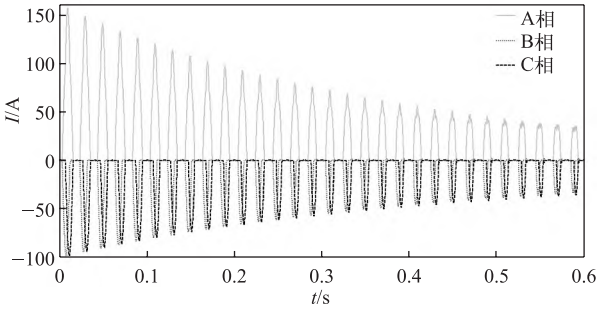


图 4 整流变压器空载合闸励磁涌流仿真波形

Fig. 4 Simulation waveform of rectifier transformer no-load closing excitation inrush current

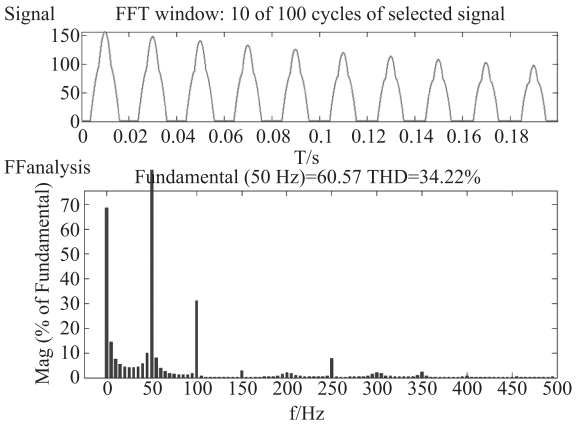


图 5　整流变压器励磁涌流 FFT 分析

Fig. 5 FFT analysis of excitation inrush current in rectifier transformer

2.3　励磁涌流的影响

在对电力系统继电保护进行整定计算时，都应考虑励磁涌流的影响，若整定值不匹配或励磁涌流过大，会发生继电保护装置动作不正常，导致变压器投运失败，严重时可能会造成系统大面积停电。励磁涌流对电力系统还存在以下危害：

1）励磁涌流含有丰富的高次谐波分量，谐波会导致电力系统电能质量降低，使设备产生过热、振动、噪声和绝缘老化等现象[6]。

2）使系统中正常运行的相邻变压器产生和应涌流，进而使继电保护误动作，造成大面积停电。

3）过大的励磁涌流会产生过大的电动力，严重时会导致变压器绕组和断路器产生不同程度的损坏，降低使用寿命。

4）励磁涌流中所含的直流分量过大，将导致电流互感器磁路饱和，影响测量准确性，甚至使保护失灵。

3　实际案例

3.1　案例描述

2019年12月25日，在佛山地铁2号线湖涌停车场牵引及降压混合变电所35 kV送电过程中，前后出现两次跳闸事件，分别为母联断路器保护跳闸和1#进线断路器保护跳闸。送电时采用绿场I环网单回供电，35 kV母联断路器合闸（2#进线柜101B断路器始终处于断开状态），两段母线并列运行方式。

事件1：对整流变压器RT2第一次全压冲击试验，进行35 kV开关柜断路器107遥控空载合闸操作后，35 kV母联柜过电流I段保护动作，断路器103跳闸。

事件2：对事件1进行处理后，对整流变压器RT1进行空载合闸时，1#进线柜过电流IV段保护动作，断路器101A跳闸。同时，对侧绿岛湖站牵引及降压变电所3#出线柜102C断路器过电流IV段保护动作跳闸。

3.2　案例分析及解决方法

事件1分析：断路器107合闸前，配电变压器ST1、配电变压器ST2和整流变压器RT1均为正常运行状态；断路器107合闸后，101A、104A、104B、106和107断路器均处于合闸状态，保护无动作；整流变压器RT2的本地断路器107未跳闸，上一级母联断路器103过电流I段保护跳闸，且保护动作时间小于0.2 s。

事件1解决方法：判断为母联柜过电流I段保护整定值不合理，在整流变压器RT2合闸时产生的励磁涌流大于电流整定值的情况下，母联断路器103过电流I段保护误动作。核查初步整定书，并与设计人员及供货商技术人员沟通后，确认将断路器107过电流I段保护时间定值由0调大至0.6 s。

事件2分析：断路器106合闸前，配电变压器ST1、配电变压器ST2均为正常运行状态，整流变压器RT2未投入运行；断路器106合闸后，104A、104B和106断路器均处于合闸状态，保护无动作；整流变压器RT1的本地断路器106未跳闸，上一级母联断路器103未跳闸，1#进线柜101A断路器跳闸，对侧绿岛湖站3#出线柜102C断路器跳闸；绿场I路两侧断路器均跳闸，但纵差保护（主保护）和电流比较保护（后备保护）未动作。

事件2解决方法：判断为停车场1#进线柜和

绿岛湖站3#出线柜过电流IV保护整定值不合理，在整流变压器RT1合闸时，产生的励磁涌流大于电流整定值的情况下，101A和102C断路器过电流IV段保护误动作。核查设计整定书，计算电流整定值并与设计及供货商技术人员沟通后，确认整定书中TA电流比与设备实际不一致，将停车场101A断路器和绿岛湖站102C断路器过电流IV保护电流定值均由0.16 A调大至1.5 A。

解决完事件1和事件2后，重新进行送电倒闸操作，未再发生跳闸事件且试运行合格。

3.3 保护跳闸事件结论

经事中分析和事后研判，两次跳闸事件的发生，分别是因为过电流保护时间整定值不合理和过电流保护电流整定值不合理造成的。

事件1中，母联断路器103作为馈线断路器107的上一级，未满足过电流保护时间整定值应比下一级时限大的原则[7]，出现时限极差配合问题，直接导致越级跳闸。

事件2中，整定书中TA电流变比与实际不符，整定书计算线路对侧断路器过电流保护电流整定值过小，未躲过励磁涌流。在线路主保护和后备保护均不动作的情况下，断路器过电流IV段终极后备保护（长期投入电流保护）动作。在线路和柜内母线均未发生故障的情况下，线路对侧断路器跳闸，直接导致供电回路切除。

4 工程应对措施

为了降低励磁涌流对变压器及整个供电系统的危害，最好的方法是从根本上直接抑制涌流。现有的励磁涌流抑制方法主要有一次侧串电阻、低压侧接电容、选相合闸法和消除剩磁法等[8-9]，综合考虑适用性、可操作性和经济性，这些方法均有各自的缺陷，并没有大规模应用于实际工程中[10]。一般情况下，合理的保护整定值和规范的倒闸操作，可以躲过励磁涌流，避免变压器投运失败。综上，工程实际应对措施建议：

1）变压器空载合闸时，励磁涌流最大幅值可达到变压器额定电流的6～8倍[11]。在进行继电保护整定计算时，通常按8*In*甚至更大的幅值来考虑涌流的影响。

2）在送电前，详细核对各变电所保护整定值、设备容量和电流互感器电流比等，确保整定书与实际相匹配。

3）加强组织，协调设计院、供应商等单位相关技术人员到场配合，保障送电工作的顺利进行。

4）送电过程中，由调试经验丰富、理论水平较高的工程师主导，确保各项操作的安全、规范和有序。

5）针对多台大容量变压器，应考虑优化送电顺序和退出重合闸等处理措施。

5 结束语

变电所送电是对施工能力和技术水平的综合检验，成功送电的重要性不言而喻。对变压器励磁涌流产生原理进行了详细数学推导，建立了MATLAB仿真模型并进行了涌流特性分析。介绍了佛山地铁2号线湖涌停车场牵引变电所送电过程中整流变压器励磁涌流造成的两次跳闸事件，对该实际案例进行了详细分析，并阐述了解决方法。同时，提出了避免由于涌流导致变压器投运失败的工程实际应对措施，为地铁供电系统变电所等相关工程提供了类似经验，对提高送电成功率、缩短送电时间具有一定的参考意义。

参考文献

[1] 刘鹏辉，黄纯，石雁祥，等．配电线路励磁涌流自适应闭锁方案[J]．电工技术学报，2019，34(11)：2395-2404．

[2] 宋九渊，符玲，熊思宇，等．基于二阶泰勒系数的励磁涌流识别方法[J]．中国电机工程学报，2020，40(3)：1020-1030．

[3] 何源．电力变压器空载合闸励磁涌流的辨识研究[D]．重庆：重庆大学，2013．

[4] 潘洋，来磊，石雷兵，等．单相变压器空载合闸励磁涌流暂态特性建模与实验[J]．仪器仪表学报，2012，33(5)：1148-1153．

[5] 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．
[6] 孔硕颖．变压器励磁涌流分析与抑制方法研究[D]．南京：东南大学，2018：1-3．
[7] 闫石，钟素梅．基于数字通信保护技术的地铁35 kV备自投方案[J]．都市快轨交通，2020，33(5)：136-141．
[8] 丛伟，王伟旭，肖静，等．控制合闸电压幅值的变压器励磁涌流抑制方案[J]．电力系统自动化，2017，45(8)：159-165．
[9] 何小庆，刘淑萍，李攀宏，等．一种消除单相变压器励磁涌流的预充磁策略[J]．电力系统保护与控制，2014，42(17)：120-124．
[10] 张文涛，王渝红，丁理杰，等．变压器励磁涌流的抑制方法综述[J]．四川电力技术，2018，41(5)：56-62．
[11] 贺家李，李永丽，董新洲，等．电力系统继电保护原理[M]．北京：中国电力出版社，2017：259-260．

作者简介

王顺（1992—），男，硕士，工程师，从事轨道交通供电系统施工与调试管理工作。

（收稿日期：2021-04-23）