

变压器励磁涌流的识别与抑制

针对励磁涌流对变压器保护乃至电力系统的不良影响，首先分析了变压器空载合闸励磁涌流、过励磁和恢复性涌流的产生机理；其次在变压器励磁涌流识别中应用信息检索和模糊数学技术；最后为了更好地抑制变压器励磁涌流，提出了一种有效的解决方法，即将电容器并联至变压器的低压侧。动模实验结果表明，当变压器处于不同合闸角时，该解决方法均可有效抑制励磁涌流。

张召峰 孙庆森 王华兴 杨 雷/国网山东省电力公司泰安供电公司

0 引言

电力变压器作为电力系统中的功率交换枢纽和关键互联点，能否正确、稳定运行直接关系到整个电力系统的供电可靠性。随着时代的不断进步，国内电力变压器保护的整体性能在一定程度上已有较大提高，但相对于其他保护而言，其总体正确动作率依然偏低。在变压器差动保护中，不能准确、快速识别和有效抑制励磁涌流一直是变压器保护误动作的一个重大原因，所以深入研究电力变压器保护，提出更加准确地识别励磁涌流的方法和更加有效地抑制励磁涌流的措施，对于提高变压器保护的正确动作率具有十分重大的意义。

文章对励磁涌流所具有的不同特征进行深入分析，并提出了一种有效的识别方法，该方法主要以模糊信息检索为基础。同时，为了更好地抑制变压器励磁涌流，将电容器并联至变压器的低压侧，并对用于涌流抑制的电容值进行计算，可避免出现空载合闸时变压器励磁阻抗迅速下降的问题，从而有效抑制励磁涌流。

关键词/Keywords

变压器保护 ·
励磁涌流 ·
模糊信息检索 ·
涌流抑制 ·



张召峰/高级工程师

1 励磁涌流产生的机理

变压器励磁涌流的产生及其对变压器保护的影响与变压器绕组接线方式、电力系统运行方式和电流互感器饱和等情况均密不可分。因此，保护变压器应详细考虑不同因素的综合影响，不同因素包括如下：①励磁涌流制动的原理；②励磁涌流制动的具体方式；③励磁涌流以及二次电流具备的特征。

1.1 变压器空载合闸励磁涌流

变压器励磁涌流用 i_{μ} 表示，变压器铁心饱和时可引起励磁涌流，其铁心磁化曲线如图1所示。当 $\varphi < \varphi_s$ （即铁心处于不饱和状态）时，变压器铁心磁化曲线的斜率增速显著， i_{μ} 约等于零；当 $\varphi > \varphi_s$ （即铁心处于饱和状态）时，变压器铁心磁化曲线的斜率增速放缓， i_{μ} 与 φ 呈现线性关系，是正相关，即随着 φ 的不断增加， i_{μ} 亦呈现不断增加的趋势，最终形成励磁涌流。

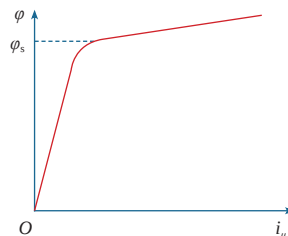


图1 变压器铁心磁化曲线

1.2 变压器过励磁

发电机与变压器均由铁心绕组组成，假设该铁心绕组的外加电压为 U ，则有

$$U = 4.44 f W B S \quad (1)$$

式中， f 为电压频率； W 为匝数， S 为铁心

截面积, B 为磁通密度。

因为 W 、 S 均为常数, 故可以写成

$$B = K \frac{U}{f} \quad (2)$$

式中, $K = 1/(4.44WS)$, 对于已知不变的变压器, K 默认是常数。

因此, 引起磁通密度增大的主要原因包括两方面: ① 提高电压; ② 降低频率。对于某一变压器, 额定工作磁通密度 $B_N = 1.7 \sim 1.8 \text{ T}$, 饱和磁通密度 $B_m = 1.9 \sim 2.0 \text{ T}$, 额定工作磁通密度与饱和磁通密度相差不大, 较易出现过励磁故障。

1.3 变压器恢复性涌流

无损变压器在区外故障发生前后的磁通与恢复性涌流如图2所示, 变压器的饱和磁通用 ψ_s 表示。无损变压器在正常工作和发生区外故障时, $\psi < \psi_s$, 变压器铁心处于不饱和状态, 此时励磁电感无穷大, 电流为零; 当排除故障时, $\psi > \psi_s$, 变压器铁心处于饱和状态, 励磁电感降速明显, 恢复性涌流即可产生。

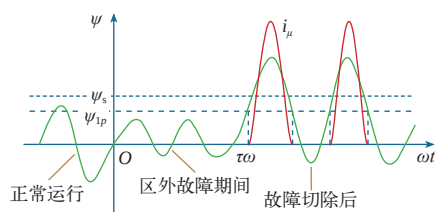


图2 无损变压器在区外故障发生前后的磁通与恢复性涌流

2 变压器励磁涌流识别技术

在变压器励磁涌流的识别过程中巧妙结合模糊数学理论, 基于该理论中模糊逻辑隶属度以及权重相关概念, 确定不同内容的不同置信度, 不同内容包括: ① 多个输入量; ② 相关励磁涌流识别判据。该法基于不同励磁涌流识别判据具备的优势, 通过模糊推理得到最终的跳闸决策。

差动回路中产生过电流的原因有四种: ① 内部故障 (X_1); ② 励磁涌流 (X_2); ③ 过励磁 (X_3); ④ 排除故障后的恢复性涌流 (X_4)。可将上述原因作为信息元, 其特征项为2次谐波

(d_1)、波形间断角 (d_2)、波形对称度 (d_3)、低电压 (d_4)、5次谐波含量 (d_5) 和时间差 (d_6)。因此, 可列出信息元及其特征项关系的矩阵 K 为

$$K = \begin{matrix} & d_1 & d_2 & d_3 & d_4 & d_5 & d_6 \\ \begin{matrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (3)$$

当起动电流小于差动电流时, 对变压器电气量特征进行相应提取, 并确定此种差流下的工况种类。

1) 对于该对象可用一个 n 维行矢量来表示, 具体如下

$$X_r = (\phi_{r1}, \phi_{r2}, \phi_{r3}, \dots, \phi_{rn}) \quad (4)$$

其中

$$\phi_m = \begin{cases} 1 & X_r \text{ 中有特征项 } d_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

采用 m 行 n 列的矩阵 K 对信息元集合 X 进行表示, K 中元素为0或1, 即

$$K = \begin{matrix} & d_1 & d_2 & \dots & d_{n-1} & d_n \\ \begin{matrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_m \end{matrix} & \begin{pmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \dots & \phi_{1n-1} & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \dots & \phi_{2n-1} & \phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \phi_{m1} & \phi_{m2} & \dots & \phi_{mn-1} & \phi_{mn} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (6)$$

2) 依据不同特征的隶属度函数, 可确定 n 维查询行矢量 Q 。

3) 预先确定 Q 的符合函数 $f(X, Q)$, 代入 X_j , 计算得 $r_j = f(X_j, Q)$, 再对 r_j 进行计算, 从而确定最大值, 判定查询对象隶属 X_j 一类; 也可对门槛值 L 进行设定, 当 $r_j \geq L$ 时, 可判定查询对象隶属 X_j 的何种工况。

3 励磁涌流抑制方法

3.1 低压侧并联电容器基本原理

变压器空载合闸时, 若磁通饱和, 则励磁阻抗迅速减小, 直接导致励磁电流迅速升高。因此, 为提高励磁阻抗, 应考虑有效抑制励磁涌流。

将适当大小的电容并联至变压器的低压侧，观察并联电容后的等效电路如图3所示。由图3发现点画线框内出现并联谐振。当额定频率固定为 ω_0 时，励磁阻抗 $Z(\omega_0)$ 可无穷大，有效抑制了励磁涌流，阻抗 Z 的频率特性如图4所示。

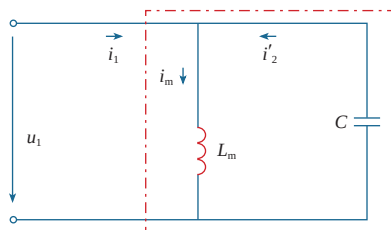
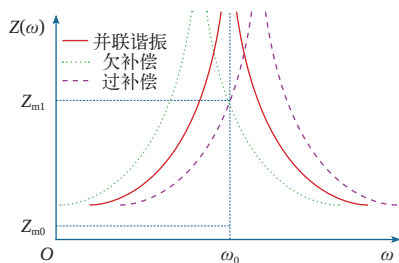


图3 并联电容后的等效电路

图4 阻抗 Z 的频率特性

将适当大小的电容并联至变压器低压侧。带有涌流抑制电容的系统接线如图5所示。

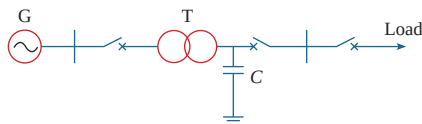


图5 带有涌流抑制电容的系统接线

3.2 电容值的求取

对励磁涌流产生的三相瞬时励磁电感进行计算，并对基频分量进行提取，选择三相等效瞬时励磁电感基频分量的平均值 L_{av} ，并对抑制涌流的电容值进行合理计算，具体如下

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L_{av}} \quad (7)$$

式中， f 为系统额定频率。

4 动模实验分析

该动模实验系统的接线如图6所示。

该实验系统的主要设备及其参数如下：额定容量 $5 \text{ kV}\cdot\text{A}$ ，高压侧与低压侧的额定电压均是 380 V ，

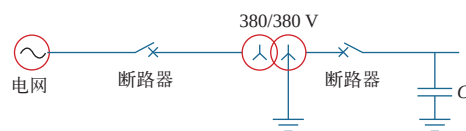


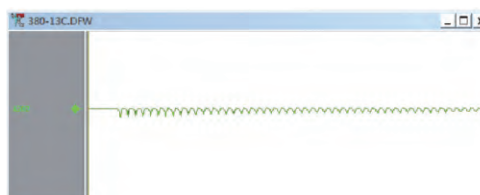
图6 动模试验接线

联接组 $Y/YN-12$ ，空载电流与空载损耗分别是 12% 、 75 W ，阻抗电压 3.5% ，短路损耗 160 W 。采用DF1024 便携式波形记录仪进行测量，采样频率 $50\,000 \text{ Hz}$ 。

计算得到抑制涌流的电容值约为 $13 \mu\text{F}$ ，因此，选择 $13 \mu\text{F}$ 的电容并联至变压器低压侧。对于三相电容器可选择星形接线的方式。电容并联后，可反复试验励磁涌流的变化。一组三相电流波形如图7所示，其中A、B和C三相的电流最大幅值分别为 7.1 A 、 6.6 A 和 10.7 A 。



(a) 高压侧A相电流



(b) 高压侧B相电流



(c) 高压侧C相电流

图7 变压器低压侧带电容器合闸三相励磁涌流

经过不同次数的合闸试验，最大相励磁涌流幅值范围为 $6.6 \sim 47.1 \text{ A}$ 。这表明电容并联至变压器后，涌流幅值降低幅度显著。

5 结束语

文章提出了一种励磁涌流识别方法，其优势在
(下转第28页)

运行状态,减小传递功率波动,降低Scott牵引变压器的装机容量。

5 结束语

本文采用MMC构造新型的RPC,能很好地应用于铁路供电系统的电能质量治理;本文对Scott牵引供电系统的补偿量进行准确提取,同时采用PIR控制器实现了对补偿电流的准确跟踪,在环流抑制后,可以令MMC-RPC达到良好的补偿效果。仿真结果验证了本文所提控制策略的有效性。

参考文献

- [1] 陈柏超,张晨萌,袁傲,等.基于V/V牵引供电系统的混合式电能质量补偿研究[J].电工技术学报,2013,28(12):60-69.
- [2] Lao Kengweng, Wong Manchung, Dai Ningyi, et al. A systematic approach to hybrid railway power conditioner design with harmonic compensation for high-speed railway [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 62 (2) : 930-942.
- [3] 张鑫,江全元.基于V/V接线变压器的铁路功率调

节器容量配置和能量优化补偿策略[J].电力自动化设备,2014,34(1):102-108.

- [4] 武娜,杜欣慧.模块化多电平换流器的三相不平衡控制策略[J].电气应用,2015(12):50-55.
- [5] 段程亨,宋平岗,李云丰,等.基于改进型虚拟磁链的MMC直接功率控制[J].电气应用,2015(4):42-47.
- [6] 宋平岗,林家通,李云丰,等.基于模块化多电平的铁路功率调节器直接功率控制策略[J].电网技术,2015,39(9):2511-2518.
- [7] 荆龙,唐芬,王之赫,等.基于模块化多电平换流器的牵引供电系统电能质量治理方法[J].电力系统自动化,2015,39(11):173-179.
- [8] 王卫安,桂卫华.基于MRPC的电气化铁道谐波治理技术研究[J].机车电传动,2014(2).
- [9] 刘焕,岳伟,张一工,等.基于准比例-谐振控制的MMC-HVDC流抑制策略[J].电力系统自动化,2015,39(12).
- [10] 阎发友,汤广福,贺之渊,等.一种适用于模块化多电平换流器的新型环流控制器[J].电力系统自动化,2014,38(1):104-120.

(收稿日期:2015-09-17) EA

(上接第22页)

于可靠性强,对于深入分析涌流有利。为了更好地抑制变压器励磁涌流,本文提出了一种有效的解决方法,即将电容器并联至变压器的低压侧。该法通过对并联电容的电容值进行计算,提高励磁阻抗,有效抑制励磁涌流。经过实验验证,该方法使涌流幅值降低显著,并且对于当前的涌流识别判据没有不良影响。

参考文献

- [1] 许行,杨旭红,邢月红,等.基于小波变换和概率神经网络的励磁涌流识别[J].电力学报,2012,27(1):71-76.
- [2] 王昕,朱成柱,宋永明,等.模糊理论在识别变

压器励磁涌流中的探讨[J].继电器,2000(8):49-47.

- [3] 袁宇波,陆于平,李澄.三相涌流波形特征分析及差动保护中采用二次谐波相位制动的原理[J].中国电机工程学报,2006,26(19):23-28.
- [4] 李朝顺,苑舜.变压器空载合闸时励磁涌流抑制方法的探讨[J].电网设计,2011,8(4):43-48.
- [5] 何源,李新,罗建.利用磁滞回线辨识变压器励磁电感研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(14):68-72.
- [6] 陈艳,陈小川,高仕斌.几种消减励磁涌流的方法[J].高压电器,2005,41(4):282-285.

(收稿日期:2015-02-10) EA