

# 微机控制变压器涌流抑制技术在石化企业中的应用

变压器励磁涌流不仅导致继电保护误动，由其衍生的电网电压骤降、电能质量降低、谐波污染、和应涌流、铁磁谐振和过电压等都给石化企业电力系统运行带来不可低估的负面影响。分析原因通常认为励磁涌流的出现是变压器所固有的，只能通过“识别”措施，即“躲”的对策。微机控制变压器涌流抑制措施为保证石化电力系统安全运行提供了有益的方向。

王树国/中国石化工程建设有限公司

王文良/中国石化石家庄炼化分公司

## 0 引言

变压器励磁涌流与电容器的充电涌流抑制原理基本相似，前者不容许电流突变，后者不容许电压突变，空投电源时都将诱发一个暂态过程。由于变压器铁心磁通的饱和及铁心材料的非线性特性，变压器空载合闸时会产生变压器额定电流6~8倍大幅值的励磁涌流，且含有极多的谐波及直流分量。由此对电网及电器设备造成多种不利的影响。其对石化电力安全造成的危害有：电能质量降低、放大谐波甚至谐振、电网电压骤降、继电保护装置误动、敏感电力电子器件损坏及变压器绕组应力增大等，故有必要对涌流进行抑制以保证石化电力系统安全运行。

## 1 变压器励磁涌流产生的原因及危害

变压器励磁涌流产生的原因是因为变压器磁元件，磁通不能突变，当空载合闸在电源电压过零一瞬间，一次电流全部成为暂态电流，使变压器铁心高度

饱和，励磁电流剧烈增加，从而形成励磁涌流。式(1)表达了在一次电压 $U_1$ 的相位角为 $\alpha$ 时给变压器加上电压 $U_1$ 的瞬间变压器磁路中的磁通组成，即

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t + \alpha) + (\pm \Phi_r - \Phi_m \sin \alpha) e^{-\frac{R_1}{L_1} t} \quad (1)$$

式中， $\Phi_m \sin(\omega t + \alpha)$ 为与电压 $U_1$ 对应的稳态磁通分量 $\Phi_s$ ； $\pm \Phi_r$ 为变压器在前次断电时留下的剩磁，其极性和数值由断电瞬间磁路所处磁滞回线工作点的位置决定； $-\Phi_m \sin \alpha e^{-(R_1/L_1)t}$ 为基于磁链守恒定理，在上电瞬间抵制磁通突变而产生的暂态感应磁通 $\Phi_t$ ， $\Phi_t$ 的初始值与 $t=0$ 时 $\Phi_s$ 的瞬时值相等，但极性相反， $\Phi_t$ 将按时间常数 $\tau = R_1/L_1$ 衰减。

由于变压器铁磁材料存在固有的磁滞特性，变压器在外部磁场消失后仍有少量磁通保留在绕组中形成剩磁。在变压器上电瞬间，根据磁链守恒定律，总磁通必须从剩磁点开始建立，如图1所示。在 $t=0$ 时选择电压角度为 $0^\circ$ 时上电，由于绕组中励磁电压超前稳态磁通 $90^\circ$ ，故稳态磁通 $\Phi_s$ 处于 $270^\circ$ 的谷值点，其峰值为 $\Phi_m$ ，此时回路将产生抵制磁通突变的暂态感应磁通 $\Phi_t$ ，其极性与稳态磁通 $\Phi_s$ 相反，峰值等于 $\Phi_m$ 。暂态感应磁通 $\Phi_t$ 与剩磁 $\Phi_r$ 合成偏磁 $\Phi_p$ ，图1中变压器剩磁极性为正，暂态感应磁通极性也为正，故偏磁 $\Phi_p$ 极性也为正，且数值被增大。如图1所示，变压器在上电后建立稳态磁通的过程中，稳态磁通的曲线将会从剩磁点开始整体向偏磁极性方向偏移，偏移大小等于该时刻对应的偏磁幅值。



王树国/教授级高工

### 关键词/Keywords

励磁涌流 ·  
磁通互克 ·  
微机控制 ·  
涌流抑制器 ·

根据式(1)及前文描述可知偏磁在合成后的极性是固定的,其幅值则按时间常数 $\tau=R_1/l_1$ 衰减。故图1中由于偏磁极性为正,在稳态磁通同为正极性的部分,由于两者的合成总磁通 $\Phi$ 超过饱和磁通 $\Phi_{sat}$ ,此时绕组电抗陡降,产生励磁涌流。随着偏磁 $\Phi_p$ 的衰减,总磁通 $\Phi$ 将逐步与稳态磁通 $\Phi_s$ 重合,变压器进入稳态运行。

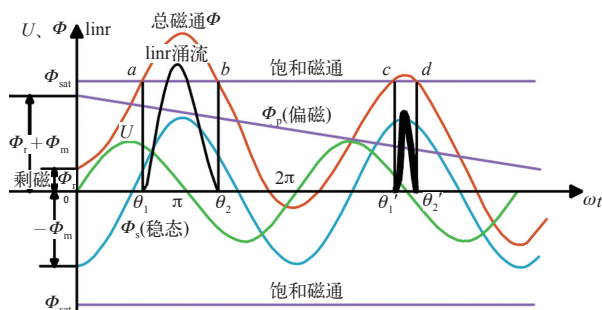


图1 在 $t=0$ 时电压合闸角 $\alpha=0^\circ$ ,  $U$ 、 $\Phi$ 和 $I$ 变化曲线图

如图2所示,曲线①为一次绕组电压 $u$ ;曲线②为滞后电压 $90^\circ$ 的稳态磁通;曲线③则为与稳态曲线同一时刻对应的暂态感应磁通曲线。由图2可知其幅值与稳态磁通相同,而极性相反。分闸1时刻断电时对应的稳态磁通为正,故变压器的剩磁极性为正。在合闸1点上电时,稳态磁通为正,则对应的暂态感应磁通在曲线③上为负,正极性的剩磁和负极性的暂态感应磁通合成的偏磁为 $\Phi_{p1}$ ,即变压器上电时,稳态磁通从剩磁点M开始建立且向偏磁极性方向(下方)偏移,偏移后的曲线

即为稳态磁通与偏磁合成的总磁通 $\Phi_1$ 曲线。磁通建立过程中,总磁通 $\Phi_1$ 没有达到饱和磁通值,故没有涌流产生。同样原理,合闸2对应的N点暂态感应磁通极性与剩磁同向为负,合成偏磁为负向增大 $\Phi_{p2}$ ,磁通建立过程中稳态磁通与偏磁偏移叠加,超过负方向的饱和磁通区间将产生大的励磁涌流。众所周知,空载变压器投入电源时会出现很高的励磁涌流,其幅值可以达到变压器额定电流的6~8倍,特别是现代大容量变压器为提高效率,节约生产成本,设计的工作磁通密度很高,这种情况更为严重,其空载投入时会产生幅值相当大的励磁涌流,其主要危害:①引发变压器的继电保护装置误动,使变压器的投运频频失败;②变压器出线短路故障切除时所产生的电压突增,诱发变压器保护误动,使变压器各侧负荷全部停电;③A变电站一台变压器空载接入电源产生的励磁涌流,诱发邻近其他B变电站、C变电站等正在运行的变压器产生“和应涌流”而误跳闸,造成大面积停电;④数值很大的励磁涌流会导致变压器及断路器因电动力过大受损;⑤诱发操作过电压,损坏电气设备;⑥励磁涌流中的直流分量导致电流互感器磁路被过度磁化而大幅降低测量准确度和继电保护装置的正确动作率;⑦励磁涌流中的大量谐波对电网电能质量造成严重的污染;⑧造成电网电压骤升或骤降,影响其他电气设备正常工作。

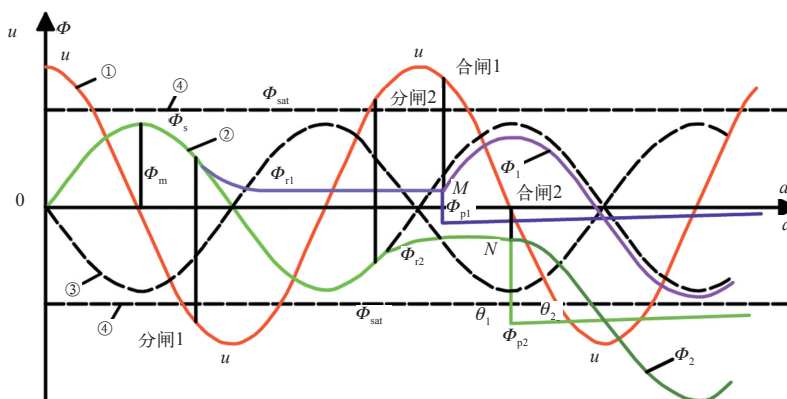


图2 变压器一次电压 $u$ 、稳态磁通 $\Phi_s$ 、剩磁 $\Phi_r$ 、偏磁 $\Phi_p$ 及合成磁通 $\Phi$ 与分闸角和合闸角的关系曲线图

$\Phi_{sat}$ —饱和磁通  $\Phi_p$ —偏磁  $\Phi_s$ —稳态磁通  $\alpha$ —合闸角  $\Phi_r$ —剩磁  $u$ —一次电压  $\Phi$ —合成磁通  $\alpha'$ —分闸角

2 励磁涌流抑制的方法

目前石化企业变电所内解决变压器励磁涌流

方法及措施有：捕捉特定角度、直流消磁、继电保护识别以及剩磁与偏磁磁通互克。各个方法的优缺点比较如下表所示。

表 变压器励磁涌流抑制方法比较表

| 序号 | 实现方法     | 技术原理                                                                                 | 优点                                                          | 缺点                                                               |
|----|----------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 1  | 捕捉特定角度   | 利用每相交流电压在峰值点（90°和270°）时分别进行合闸，此时偏磁为零，从而使磁路总磁通量低于饱和磁通值                                | 较好地解决励磁涌流问题，抑制效果可达75%~80%成功率                                | 仅支持分相分时操作，而且对断路器动作时间准确度要求高（要求断路器的分散性小于1 ms），且无法满足联动操作的要求，应用有一定局限 |
| 2  | 直流消磁     | 在被消磁的变压器绕组中，正反极性通入直流电流，并逐渐减小，缩小铁心的磁滞回环，达到消除剩磁的目的                                     | 基本可以避免产生过大的励磁涌流产生，抑制效果可达75%~80%成功率                          | 需要在变压器停电或检修时才操作，消磁工作繁琐，消磁后难免残留剩磁，应用受到限制                          |
| 3  | 继电保护识别   | 空投变压器的励磁涌流，采取“躲”的策略，即在励磁涌流已经出现的前提下，用物理和数学方法进行特征识别，以防止励磁涌流导致继电保护装置误动，而励磁涌流引起的其他危害固有存在 | 涌流固有存在，危害仍然存在，而且存在保护误动可能性大，并不能保证完全准确识别                      | 存在误动风险，没有真正解决涌流的问题，应用有风险                                         |
| 4  | 剩磁与偏磁通互克 | 通过控制变压器空投和退电时电源电压的合、分闸相位角，实现让偏磁与剩磁极性相反，从而消除产生励磁涌流的要素—磁路饱和，实现对励磁涌流的抑制                 | 从源头解决励磁涌流的产生，抑制效果很好。同时适用于联动和分相操作断路器，对断路器动作时间准确度要求并不严格，应用性较好 | —                                                                |

通过以上四种技术方法的比较，采用剩磁与偏磁磁通互克技术优势十分明显。

3 磁通互克原理方法及应用

最早提出磁通互克原理的是深圳国立智能电力公司。该原理技术新颖，不但提高了涌流的抑制效果而且对断路器的动作分散性可以允许到2~3 ms，且同时支持联动操作断路器。磁通互克原理是通过控制变压器空投和退电时电源电压的合、分闸相位角，实现让偏磁与剩磁极性相反，从而消除产生励磁涌流的要素——磁路饱和，实现对励磁涌流的抑制。变压器励磁涌流的产生机理是基于电感线圈遵循磁链守恒原理，即与电感线圈交链的磁通不能突变。而磁通在相位上滞后电压90°。因此在变压器内部无剩余磁通时，选择在电压峰值，磁通为0时合闸将有效地避免涌流的产生；而在变压器内部有剩余磁通时，若能得知剩磁的极性和数值，依据电压积分计算出在预期的磁通等于剩磁通的瞬间合闸，也将有效地避免

涌流的产生。因此在必须考虑变压器内部有剩磁的情况下，抑制涌流的最佳策略是无论分相操作或联动操作，同时对分闸合闸进行同步控制；在不能进行分闸控制的场合下，使用分相合闸同步控制，也能取得良好的涌流抑制效果。如图3所示，对于三相联动机构的断路器而言，三相分闸时分闸角度相差120°，三相剩磁极性和大小各异，但合闸时三相的合闸角也相差120°，三相偏磁极性也各不相同，只要分闸相位和合闸相位相同，则对于特定某相磁路来说，其偏磁和剩磁的相位恰好相反，叠加时相互抵消，从而达到抑制励磁涌流的效果，如图3所示。

4 磁通互克原理实现方法

在变压器断电时记忆电压分闸角，上电时选择与分闸角相近的相位角合闸（用偏磁抵消剩磁）保证措施，能够对变压器进行控分控合操作。特点：①支持三相联动开关；②对断路器合闸时间的稳定性无严格要求，应用较广。微机涌

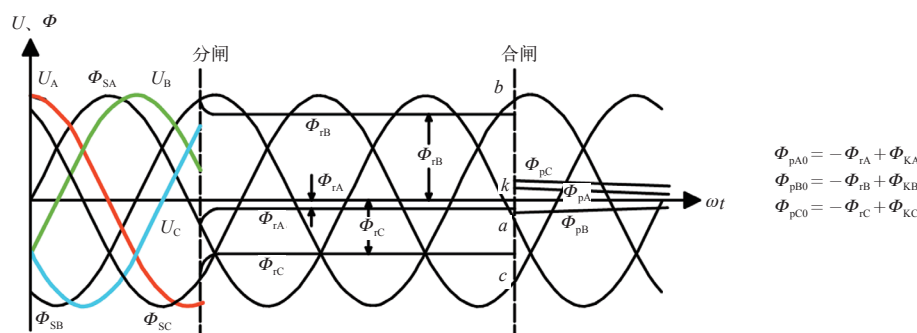


图3 三相电压合闸角等于分闸角时 $\Phi_s$ 、 $\Phi_r$ 及 $\Phi_p$ 时序图

$U_A$ 、 $U_B$ 和 $U_C$ —三相电压  $\Phi_{SA}$ 、 $\Phi_{SB}$ 和 $\Phi_{SC}$ —三相稳态磁通  $\Phi_{rA}$ 、 $\Phi_{rB}$ 和 $\Phi_{rC}$ —三相电源分闸后剩磁  $\Phi_{pA}$ 、 $\Phi_{pB}$ 和 $\Phi_{pC}$ —三相电源合闸后偏磁

流抑制器采用偏磁与剩磁互克原理的具体程序：

①测量和记录变压器退出时的剩磁极性；②合闸时制造一个与剩磁极性相反的偏磁；③剩磁与偏磁抵消一部分，总磁通不越过饱和磁通从而从本质上实现对变压器合闸涌流的抑制。其控制原理框图如图4所示。

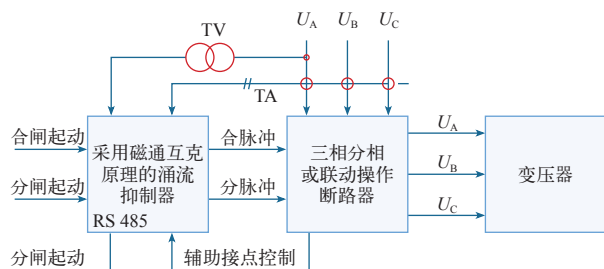


图4 控制原理框图

## 5 应用案例

某大型石化装置的110 kV区域变电所采用了磁通互克原理的微机控制抑制装置，110 kV变电站主变压器为75 MV·A，未采用涌流抑制器前投切时，合闸后相电压从68 kV降到36.5 kV，合闸电流最大升高到2.2 kA，涌流持续时间在150 ms左右。采用微机涌流抑制器合闸后相电压从68 kV降到65.2 kV，合闸电流最大升高到0.49 kA，抑制涌流效果十分明显。

## 6 结束语

随着石化企业大型化后，变压器的容量越来越大，由变压器励磁涌流产生的危害不容忽视。微机涌流抑制技术引入石化行业供配电系统，极大改变了涌流抑制的传统抑制方法，用小巧微机控制装置实现与电压等级无关的涌流抑制，给石化电力系统的安全运行及一次设备投资带来可观的效益，本文的研究方法为石化企业抑制变压器合闸涌流具有十分重要的意义。

### 参考文献

- [1] 刘力强，李楠．电力变压器的励磁涌流[J]．电气制造，2009(6)：44-45.
- [2] 薛林涛，付丰年，吕杰．大型主变压器冲击合闸故障分析及改进措施研究[J]．变压器，2013，50(5)：64-66.
- [3] 周辛南．变压器涌流防范措施研究[C]．宜昌：中国高等学校电力系统及其自动化专业第29届学术年会，2013.
- [4] 陈清勇．变压器空载合闸产生和应涌流的现象与防范措施[J]．水利科技，2010(1)：66-69.

(收稿日期：2017-10-10) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告