励磁涌流抑制器在220 kV变压器投运中的应用

简述了励磁涌流在220 kV变压器投用时的危害，简要说明了励磁涌流产生原因以及本站采用的励磁涌流抑制器的基本工作原理，并详细介绍了励磁涌流抑制器在云南石化总变电站220 kV主变压器的工程应用，现场试验结果表明该抑制器可有效抑制变压器空投时的励磁涌流。

杨 垒 张 鹏/中石油云南石化有限公司

杨 垒/工程师

关键词/Keywords
励磁涌流·
剩磁·
偏磁·
磁路饱和·
变压器·

0 引言

电力变压器在空载受电投用时，因铁心磁通饱和及铁心材料非线性特性，会产生较大的励磁涌流。励磁涌流一般会达到变压器额定电流的6～8倍，极易造成继电保护误动作和变压器跳闸，严重情况下会导致线圈变形，同时造成不可挽回的经济损失。

目前，越来越多的供电系统选用励磁涌流抑制器，其基本原理就是通过变压器剩磁与偏磁互相抵消来抑制励磁涌流，是限制励磁涌流的一种新思路。从当前实际应用情况来看，该装置在正常工作状况下基本上能抑制变压器励磁涌流小于额定电流，效果好时甚至能消除励磁涌流。

1 励磁涌流的危害

空投变压器产生的励磁涌流不仅会使变压器投运失败，可能还会造成相关电气设备的损坏，更严重的将会导致供电系统大面积停电事故的发生。其主要存在以下几方面危害：

1）造成变压器继电保护误动作，使变压器受电投用频频跳闸失败。

2）可能会通过电网输电线路诱发邻近运行中的变压器“和涌相应”，从而误跳，造成不必要的影响和损失。

3）励磁涌流过大，可能会破坏变压器和回路中断路器的稳定，从而导致变压器线圈和断路器损坏。

4）引发操作过电压，造成电气设备损坏。

5）伴随着励磁涌流而产生的谐波会对电网造成严重的污染，有可能会引起变频器等对谐波敏感的电气设备误跳闸。

2 励磁涌流产生的原因

励磁涌流是指在储能元件（电感或电容）上突加电压引发暂态过程的物理现象。在变压器受电投用时，磁路中可能会产生的磁通有三种：①剩磁，指变压器停电以后残留在磁路中的磁通，特性为单极性，极性及数值决定于变压器停电瞬间的交变磁通，剩磁一般情况下是不会消失的；②偏磁，指变压器受电投用开关合闸的瞬间而产生的磁通，其特性也是单极性，偏磁的极性与产生新磁通的极性方向相反，大小相等，偏磁会按时间常数逐步衰减至零；③稳态交变磁通，指变压器受电投用开关合闸瞬时、变压器绕组电压升压结束后，在磁路中由外施交流电压所产生的磁通，这时的剩磁和偏磁已经基本上消失了。

变压器的设计中已经确定了磁路饱和时的磁通大小，当磁路中三种磁通之和大于设计的饱和磁通时，磁路将进入饱和状态，这时绕组电抗将迅速下降，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

使励磁电流迅速增加，这就是励磁涌流。

以单相变压器举例，其结构如图1所示，变压器空载状态下的一次绕组电压方程为

$$U_1 = U_m \cos(\omega t + \alpha) = i_1 R_1 + N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

线性微分方程解析为

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t + \alpha) + (\Phi_r - \Phi_m \sin\alpha) e^{-\frac{R_1}{L_1}t} \quad (2)$$

$$\Phi_m = L_1 I_m = \frac{L_1 U_m}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} \quad (3)$$

式中，α为$t=0$时U_1的初相角；N_1、R_1分别为一次绕组的匝数及电阻；Φ为其交链的总磁通；Φ_r为合闸时刻变压器铁心中的剩磁。

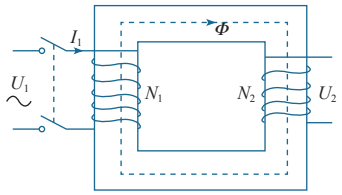

图1　单相变压器结构图

式（2）中，在一次电压为U_1、相角为α时，给变压器加上电压U_1的变压器磁路中的瞬间磁通；$\Phi_m \sin(\omega t+\alpha)$为电压$U_1$相对应的稳态磁通分量；$(\Phi_r - \Phi_m \sin\alpha)e^{-\frac{R_1}{L_1}t}$为变压器受电投入时磁路不变的偏磁；$\Phi_p$初始值与$t=0$时$\Phi_s$的瞬时值相等，极性相反，$\Phi_p$按时间常数衰减，其中时间常数$\tau = R_1/L_1$。由此可以看出，电源电压$U_1$在初相角$\alpha=90°$或$\alpha=270°$合闸时，偏磁为

$$\Phi_p = (\Phi_r - \Phi_m \sin\alpha) e^{-\frac{R_1}{L_1}t} = \Phi_r - \Phi_m \quad (4)$$

在初相角$\alpha=0°$或$\alpha=180°$合闸时，偏磁为

$$\Phi_p = \Phi_r \quad (5)$$

由此可见：在变压器合闸前，变压器内的总磁通为剩磁。合闸的一瞬间，变压器绕组的一侧电压突增，根据磁链守恒定律中总磁通不能突变的原则，变压器会产生一个与稳态磁通大小相等、方向相反的暂态感应磁通量，此暂态感应磁通与变压器内部的剩磁将合成为偏磁，偏磁在变压器内随时间缓慢衰减。因为变压器空载受电时电源电压初相角不同，所以产生的偏磁极性和数值均不相同，与剩磁和叠加后可能会使磁路的总磁通大于变压器设计的饱和磁通，从而造成磁路饱和。当偏磁与稳态磁通合成的总磁通超过饱和磁通时，变压器绕组电抗陡降，进而产生很大峰值的励磁涌流，其数值可达正常运行空载电流的数十倍。

图2为电压U投用受电时，合闸角$\alpha=0°$的磁通Φ变化曲线。图中，Φ_s为稳态磁通；Φ为Φ_s和Φ_p合成的总磁通，其中包括剩磁Φ_r；Φ_{sat}为变压器的饱和磁通。当变压器为无损变压器时（$R_1=0$），偏磁Φ_p不会衰减；当变压器为有损变压器时（$R_1>0$），Φ_p会按时间常数$\tau = L_1/R_1$而衰减。由图2可以清楚地看出：当电压相位角在$\theta_1 \sim \theta_2$区间、总磁通大于饱和磁通时，磁路会饱和，从而产生励磁涌流I_{inr}，其特性是间断性的。无损变压器的磁通和励磁涌流是$\theta = \omega t + \alpha = \pi$的偶对称波形；而在励磁涌流为0的间断角区间，$\Phi$是关于$\theta = 2\pi$的偶对称波形。当变压器为有损变压器时，$\Phi$与$I_{inr}$为不对称关系。

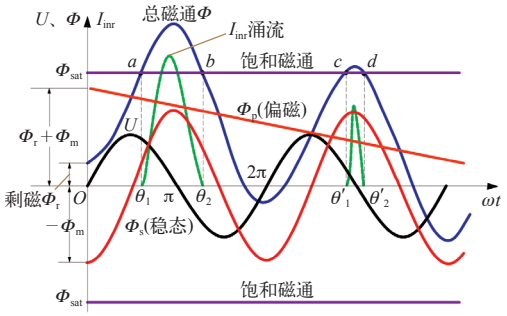

图2　在$t=0$、$\alpha=0$时，U、Φ和I的变化曲线

从图2中出现的偏磁可以看出：当剩磁数值为正时，总磁通曲线向上平移，磁路更容易饱和，励磁涌流增大；当剩磁数值为负时，励磁涌流是被抑制的。伴随着偏磁的衰减，总磁通将逐步和稳态磁通重合，变压器则会进入到稳态运行中。

因此，变压器绕组遵循磁链守恒定律是诱发励磁涌流的主因；变压器绕组抑制电压突增，从而引发磁链突变的反击行为将产生偏磁；偏磁与剩磁、稳态磁通合谋可能导致磁路饱和，从而产生励磁涌流。另外，变压器制造工艺、变压器接线方式、中性点接地方式、电源电压

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

大小和合闸初相角等因素也会影响变压器励磁涌流大小。

3 云南石化总变电站220 kV变压器励磁涌流抑制器的工程应用

为了对涌流进行有效抑制，云南石化总变电站4台220 kV主变压器均安装了深圳国立智能电力科技有限公司的SID－3YL涌流抑制器，以下就其控制原理和现场试验进行介绍和说明。

3.1 控制原理

SID－3YL型涌流抑制器适用于三相、分相操作的断路器，其控制原理如图3所示。涌流抑制器对变压器电源侧电压和电流输入进行实时监测，接收上位机和合闸启动信号后计算出合适的合闸角度，然后据此向断路器发出合闸指令。抑制器接收到上位机的分闸指令后，按照设定的分闸角度发出分闸指令，可控制变压器的剩磁在预定极性。抑制器不能控制保护跳闸命令，但通过实时监测变压器电压、电流可得到分闸角度，从而计算出变压器剩磁。在接收到合闸指令时，抑制器按照相应的合闸角控制断路器合闸，有效地抑制变压器的励磁涌流。

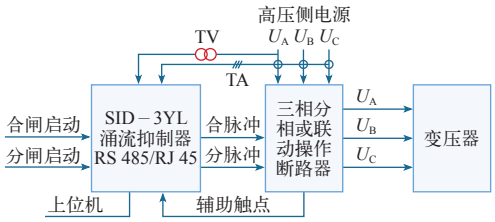

图3 SID－3YL型涌流抑制器控制原理框图

3.2 现场试验

以云南石化总变电所4#主变压器为例，2015年6月组织开展了本台变压器涌流抑制器的试验及投运。4#主变压器的具体技术数据如下表所示。

表 4#主变压器技术参数

型号	SFZ－100000/220GYW	额定容量/MV·A	100/100/30
联接组别	YN，YN0＋d11	阻抗电压(%)	14.88
额定电压/kV	220/37/10.5	额定电流/A	256.6/1 560.4
高压侧TA电流比	1 200/1	冷却方式	DNAN/DNAF（70%/100%）
出厂日期	2014年12月	生产厂家	济南西门子变压器有限公司

云南石化220 kV GIS采用三相联动式断路器，SID－3YL 型涌流抑制器的原理为剩磁与偏磁相互抵消的控制策略，由于变压器分闸决定剩磁的极性和大小，合闸决定偏磁的极性和大小，因此装置不仅要监视变压器电压的分闸角度，还要控制合闸角度。经现场对220 kV断路器进行多次分合闸试验，得到了断路器准确的分闸与合闸时间，通过对SID－3YL涌流抑制器中开关操作类型（如分相操作、联动操作）、断路器分合闸时间和分合闸角度等参数进行设置和调整，最终实现了偏磁与剩磁相互抵消的控制策略，使磁通不饱和，有效地抑制了变压器的励磁涌流。

SID－3YL涌流抑制器未投入时，4#主变压器空投的励磁涌流波形如图4所示，A相涌流最大峰值为412 A，B相涌流最大峰值为1 555.2 A，C相涌流最大峰值为1 296 A。由于本次合闸为随机性合闸，变压器合闸时A相中刚好偏磁与剩磁相互抵消，励磁涌流较小，峰值仅为额定电流的1.63倍；而B相和C相中未遇到偏磁与剩磁相互抵消，则励磁涌流较大，B相励磁涌流峰值为额定电流的6.05倍，C相励磁涌流峰值为额定电流的5.05倍。

SID－3YL涌流抑制器投入后，4#主变压器空投的励磁涌流波形如图5所示，A相涌流最大峰值为189.4 A，B相涌流最大峰值为87.7 A，C相涌流最大峰值为259.2 A。由于涌流抑制器装置对上次分闸角度进行监视，并根据断路器合闸时间准确控制合闸角度，使变压器空投时的三相电流峰值均在额定电流以下，有效抑制了变压器的励磁涌流。

4 结束语

变压器涌流抑制器运用了剩磁与偏磁相互抵消的原理来抑制变压器的励磁涌流，通过对变压

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

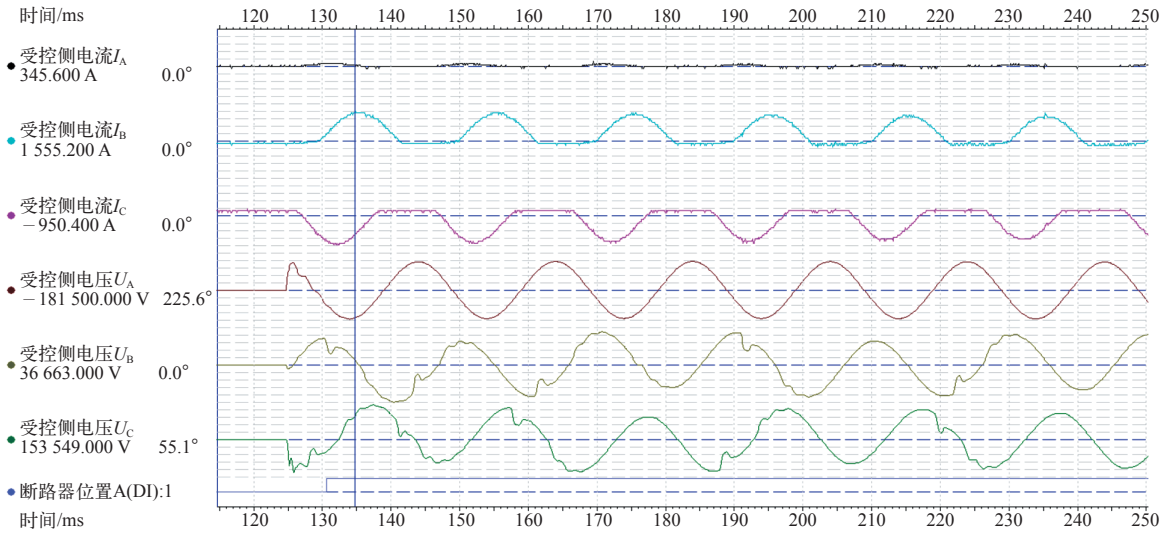

图4　SID－3YL涌流抑制器未投入时变压器空投的励磁涌流波形

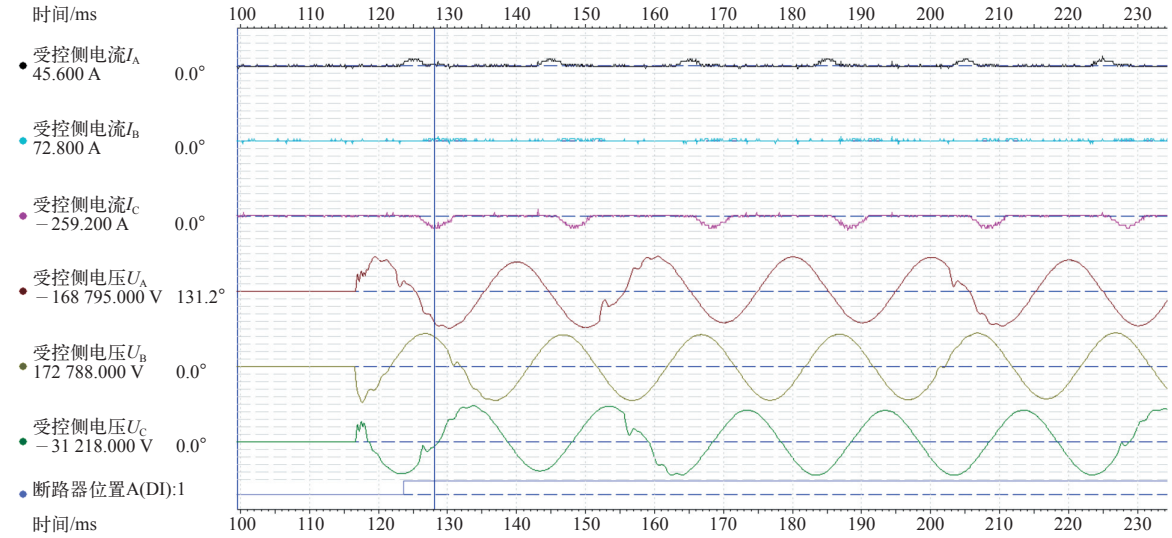

图5　SID－3YL涌流抑制器投入后变压器空投的励磁涌流波形

器空投电压合闸相位角与前次断开电源电压相位角的合理匹配，从实践上证明了使用涌流抑制器能抑制励磁涌流。云南石化总变电所220 kV变压器上应用了涌流抑制器，不仅可以消除变压器投运失败，还会更有利于其他高压电气设备的可靠运行，同时减少供电系统大面积停电事故发生的可能，将更有利于云南石化生产装置的长周期运行。

参考文献

[1] 王维俭．电气主设备继电保护原理与应用 [M]．北京：中国电力出版社，2002．

[2] 毛锦庆．电力系统继电保护实用技术问答 [M]．北京：中国电力出版社，2000．

[3] 郝治国，张保会，褚云龙，等．变压器空载合闸励磁涌流抑制技术研究 [J]．高压电器，2005，41 (2)：81-82．

[4] 兀鹏越，余信，等．变压器励磁涌流抑制器工程应用及探讨 [J]．电力自动化设备，2012，32 (6)：145-149．

[5] 任元会，卞铠生，姚家祎．工业与民用配电设计手册 [M]．北京：中国电力出版社，2005．

（收稿日期：2016－01－18）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net