一种抑制切除空载电炉变压器过电压方法的研究

在电力系统运行过程中，切除空载变压器、电抗器及空载电动机等都是常规的正常操作。在这些投切感性负载的操作过程中，可能会产生幅值较高的过电压。以某钢厂精炼炉变压器为例，阐述了切除空载变压器过电压产生的机理，分析了*RC*阻容吸收装置和整流桥装置各自在抑制切除空载变压器过电压的优缺点，提出一种基于*RC*阻容吸收回路和整流桥吸收回路的混合抑制切除空载变压器过电压装置。利用ATP－EMTP进行仿真，仿真结果表明该装置大幅度降低了过电压，且大大提高了系统应对过电压冲击的可靠性。最后通过实验证明了该方法的有效性和可行性。

苏小芳／湖北第二师范学院　熊信恒　袁明阳／武汉大学电气工程学院

苏小芳／讲师

关键词／Keywords

过电压·
变压器·
抑制措施·
可靠性·

近年来，国家加大了对基础建设项目的投资，刺激了钢铁企业的发展，国内相继建成了数量较多的矿热炉，这些高耗能企业多采用电弧炉，投入运行后给电网安全带来了隐患，引起了线路跳闸、设备损坏等事故。事后故障分析显示，这类事故的主要原因是由真空断路器切除空载电炉变压器产生过电压引起的。

国内外对切除空载变压器的过电压进行了大量深入的研究，提出了很多不同的方法来抑制该过电压。文献[1]提出了一种基于提高变压器绕组绝缘水平的方法，并给出了35 kV变压器绕组绝缘水平的调整范围；文献[2-3]提出了一种基于避雷器和*RC*阻容吸收装置来限制变压器操作过电压的方法，并介绍了避雷器的型号选取原则，解决了*RC*阻容参数的配合问题；文献[4]提出了一种在变压器二次侧并联基于整流桥的*RC*阻容吸收装置的方法，仿真结果表明该装置能有效降低变压器的切除空载变压器过电压。

文献[1]提出的方法不能从根本上降低切除空载变压器的过电压，尤其对于高电压等级的变压器，增加变压器的绝缘水平将会大大提高制造成本，且会有一定的技术难度；文献[2-3]提出的两种方法目前使用最为广泛，该方法的不足之处是对于某些特殊变压器，该装置的限压效果有限，且如果避雷器或者*RC*阻容吸收回路出现故障后，变压器将会由于失去保护而极易造成损坏，即系统的可靠性不高；文献[4]虽然提出了一种新的方法，但是未明确给出参数的配置，也未进行相关实验。

本文以某钢厂CSP分厂1台精炼炉变压器为例，分析了不同装置抑制切除空载变压器过电压的效果，并提出了一种*RC*＋整流桥装置的混合切除空载变压器抑制装置，给出了参数的相关配置，并进行了仿真和相关实验。仿真和模拟实验结果证明该方法能大幅降低切除空载变压器的过电压，并能提高系统的可靠性。

切除空载变压器过电压的机理

某钢厂CSP分厂现有2台精炼加热炉，各由1台功率为28 MW的变压器将其与35 kV母线相连，并通过真空断路器控制LF炉的投切。变压器低压侧的3根电极插入加热炉中，通过3根电极放电加热钢水。为抑制切除空载变压器过电压，初始设计阶段就在变压器的高压侧并联阻容吸收回路，并加装避雷器。但是事故还是偶有发生，2010年10月LF变压器发生故障，紧急停机导致1#铸机滞坯，

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

抢修过程中发现LF变压器高压线圈烧坏，精炼炉高压柜中PT柜的避雷器损坏失效，变压器线圈烧坏，如图1所示。

图1　变压器线圈烧坏侧面

1. 线路和变压器参数

精炼炉进线采用三相三线制，线电压有效值为35 kV，变压器型号为HJSSPZ－28000/35，额定容量为28 MW，额定电压为35 kV，空载电流为0.48%，空载损耗为25.4 kW，负载损耗为241 kW，短路阻抗为9.31%。电炉系统的电路如图2所示。

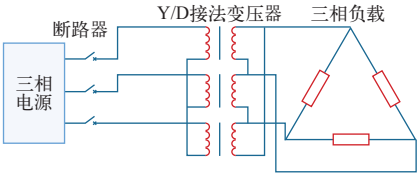


图2　电炉系统电路

2. 过电压产生的机理分析

断路器通常能切断变压器的短路电流，而励磁电流i_L仅为短路电流的几百分之一到几万分之一，由于断路器灭弧能力太强，使得在切断励磁电流时，$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t\rightarrow(-\infty)$，于是变压器的励磁电感$L_B$上感应过电压就可能达到很大数值，在实际电路中，变压器绕组除励磁电感L_B外，还有电容C_B。

根据文献[5]的分析，当截留发生在励磁电流的峰值时，电容器上的电压最大值U_{Bm}有

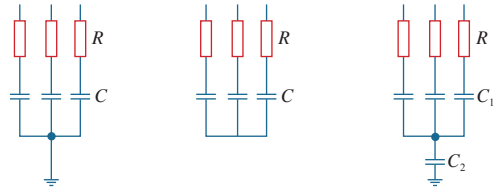
$$U_{Bm}=I_m\sqrt{\frac{L_B}{C_B}} \tag{1}$$

如果变压器没有任何限制过电压的装置时，由于变压器一次侧对地电容为13.3 nF，由式（1）可知，变压器的一次侧对地将会产生幅值很高的过电压。

*RC*阻容吸收装置抑制切除空载变压器过电压

1. *RC*阻容吸收装置的类型

*RC*阻容吸收回路按照结构不同可以分为普通型、中性点不接地型及双路*RC*过电压型三种[6]，其结构如图3所示。



（a）普通型　（b）中性点不接地型　（c）双路*RC*过电压型

图3　三种类型的*RC*保护器

普通型*RC*保护器使用最为广泛，其结构简单，能够有效抑制变压器的操作过电压；中性点不接地型*RC*保护器改善了普通型*RC*保护器在单相接地时的保护缺陷，能够继续运行；双路*RC*过电压型保护器既能保护相间过电压，也能保护对地过电压，性能最好，现已逐步替代前两种*RC*保护器。

2. 精炼炉变压器配置的*RC*阻容吸收回路

某钢厂CSP分厂实际配置的是普通型*RC*保护器，其中，$R=100\ \Omega$，$C=0.1\ \mu\mathrm{F}$。假设真空断路器在空载电流的峰值时将电流强制降为0，通过ATP仿真，得到最大过电压倍数为2.0。其中，图4为基于ATP的单相等效仿真模型；图5为没有*RC*阻容吸收回路时变压器一次侧对地的过电压波形；图6为加装*RC*阻容吸收回路时变压器一次侧对地的过电压波形。

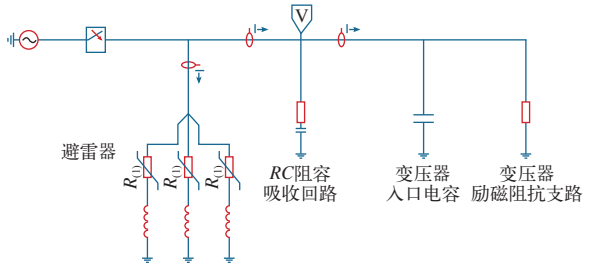


图4　基于ATP的仿真模型

由图5和图6可知，*RC*阻容吸收装置能够大幅

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

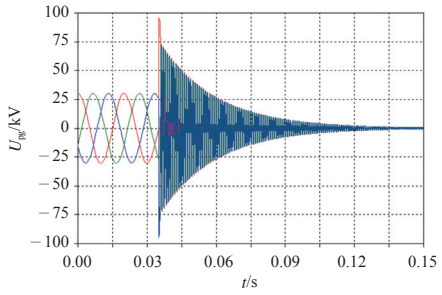


图5　无*RC*阻容回路时变压器一次侧三相对地的过电压波形

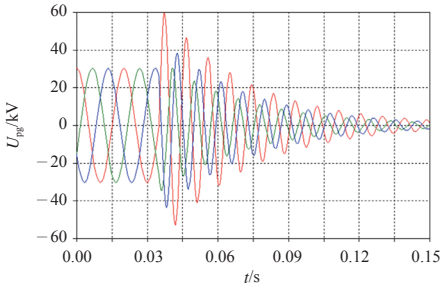


图6　有*RC*阻容回路时变压器一次侧三相对地的过电压波形

降低变压器的切除空载变压器过电压，同时能够将过电压水平限制到2倍左右。但是阻容吸收回路在电弧炉的频繁操作过程中会产生很大热量，容易加速电阻的老化。一旦阻容吸收回路失效，极易造成变压器损坏。对于这样单一的*RC*阻容保护回路，提出一种便利有效的补充保护方式意义重大。

整流桥式装置抑制切除空载变压器过电压

1. 整流桥装置原理

在额定电压6～35 kV、低压侧150～350 V的电炉变压器保护中，除了通常采用的避雷器和阻容装置外，还可以在变压器的低压侧加装整流桥和低价的大容量电解电容器。利用电容器吸收截流时电路中的电磁能量限制变压器高压侧的过电压。

整流桥式过电压抑制装置的电路原理如图7所示。主要部件有安装在变压器低压侧的全波整流桥VD、电解电容器*C*和保护电阻*R*[8]。

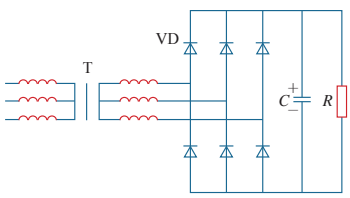


图7　整流桥式过电压抑制装置电路原理

该装置的优点在于能大幅降低切除空载变压器过电压，而且安装于电弧炉变压器的低压侧，低电压直流电解电容器的电容值大、造价低，能大幅提高系统的可靠性。

2. 整流桥*RC*参数的选择

整流桥*RC*参数的设置对该装置的限压效果有很明显的影响。当电容较小时，其所能吸收的能量较小，抑制过电压的效果也就不明显，电阻太大，电流较小，电容在单位时间内所能吸收的能量也会较小。对不同*R*、*C*参数下的限压效果进行仿真，图8为当*R*＝0.5 Ω时，不同的整流桥电容值所对应的变压器一次侧对地最大过电压；图9为当*C*＝0.05 F时，不同的电阻值所对应的变压器一次侧对地最大过电压。

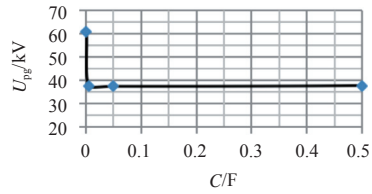


图8　整流桥电阻为0.5 Ω时，变压器一次侧对地最大过电压（一次侧不加*RC*阻容吸收回路）

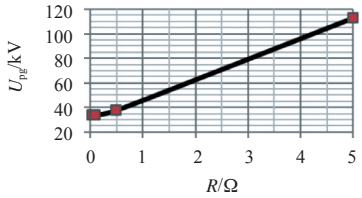


图9　整流桥电容为0.05 F时，变压器一次侧对地最大过电压（一次侧不加*RC*阻容吸收回路）

由图8可知，当整流桥电阻*R*＝0.5 Ω时，随着电容值的增大，变压器一次侧对地最大过电压会随着降低；当电容值达到0.005 F时，随着电容值的增大，其限制过电压的效果变化减小，综合考虑价格及限压效果等方面因素，选取电容*C*为0.05 F。由图9可知，当整流桥电容*C*＝0.05 F时，随着电阻*R*的减小，变压器一次侧对地最大过电压也会随之降低；但当电阻过小时，二极管的瞬时电流将会很大，综合考虑选取电阻*R*为0.5 Ω。

该装置存在的不足在于电力电子器件的寿命和稳定性相对于传统电力电子器件较差，如果仅使用其作为抑制变压器过电压的装置，一旦出现

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

故障，变压器将会因失去保护而极易造成损坏。

RC＋整流桥阻容吸收装置

由于单独使用阻容吸收装置和整流桥吸收装置均存在不足之处，因此提出同时在变压器的一次侧对地并联*RC*阻容吸收装置，在变压器的二次侧并联整流桥装置。这不仅能进一步降低变压器的过电压数值，而且还能够大大提高变压器的安全系数。为了确定合理的*RC*参数配置，对参数变化进行了仿真，图10和图11为两种装置同时使用时（*RC*阻容吸收装置$R=100\ \Omega$，$C=0.1\ \mu F$），整流桥装置参数的变化对抑制变压器过电压的影响。三种装置的优缺点比较如下表所示。

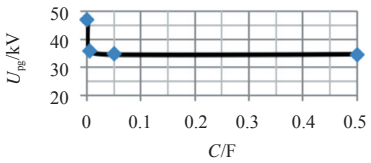


图10　整流桥电阻为0.5 Ω时，变压器一次侧对地最大过电压（一次侧加*RC*阻容吸收回路）

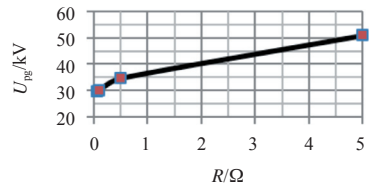


图11　整流桥电容为0.05 F时，变压器一次侧对地最大过电压（一次侧加*RC*阻容吸收回路）

表　三种方案限制过电压的效果

限压措施	最大对地过电压/kV
变压器一次侧*RC*阻容吸收回路（100 Ω，0.1 μF）	61
变压器二次侧加整流桥（0.5 Ω，0.05 F）	37.47
变压器一次侧*RC*阻容吸收回路（100 Ω，0.1 μF）＋变压器二次侧加整流桥（0.5 Ω，0.05 F）	34.69

由图10和图11的分析可确定出变压器二次侧整流桥*RC*的参数为（0.5 Ω，0.05 F）。由上表可知，两种过电压抑制装置共同使用时，其过电压的抑制效果最好。

实验验证

1. 实验元器件简介

实验元器件：三相调压器、3个100 Ω电阻、3个0.1 μF电容、1个968 Ω电阻、1个35 kV/0.22 kV实验变压器、1个三相整流桥、1个0.05 F电解电容、1个0.5 Ω电阻、1个真空断路器、1支电流测量表笔及1台示波器，实验原理如图12所示。

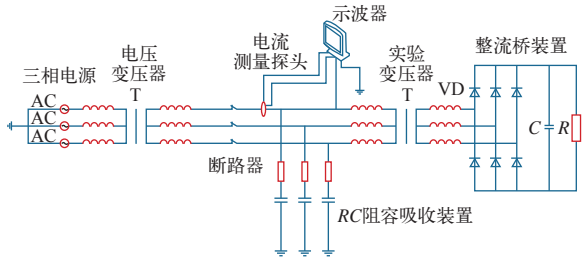


图12　实验原理

2. 实验结果

1）当实验变压器二次侧空载且只有*RC*阻容吸收装置时，一次侧对地过电压实测过电压倍数为1.9倍，接近理论分析的2倍，其实测波形如图13所示。

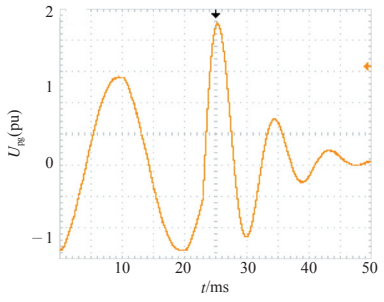


图13　模拟实验测的未加保护装置时变压器一次侧对地过电压波形

2）当实验变压器一次侧装设*RC*阻容吸收装置，二次侧并联经三相整流桥连接的电解电容和电阻（其中$R=0.5\ \Omega$，$C=0.05$ F）时，变压器一次侧对地实测过电压倍数为1.16倍，和理论仿真的1.15倍十分接近，其实测波形如图14所示。

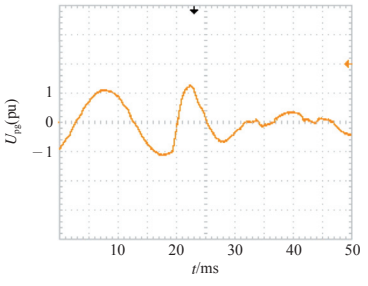


图14　模拟实验测的加保护装置时变压器一次侧对地过电压波形

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

由图13和图14对比可知，加装*RC*＋阻容吸收装置，变压器一次侧对地的过电压得到了有效的抑制，且过电压水平较低。

结束语

本文分析了切除空载变压器产生过电压的机理，对*RC*阻容吸收装置和整流桥装置各自限制切除空载变压器过电压的效果进行了研究，提出了将两种装置配合使用的过电压抑制方案。该方案有利于对电弧炉过电压保护装置进行升级改造，文中详细讨论了加装整流桥装置的参数选取。仿真和实验结果表明，*RC*阻容吸收装置和整流桥装置同时使用，不仅能够进一步降低变压器的对地过电压幅值，还能够大大提供变压器的安全系数和可靠性。

参考文献

[1] 张懋鲁．电炉变压器的操作过电压及其抑制 [J]．变压器，1995 (12)．

[2] 王永强．真空开关操作过电压及其保护的研究 [D]．保定：华北电力大学，2002．

[3] 吴培文，吴成梁．真空断路器的操作过电压对电炉变的危害及其防范措施 [J]．中国科技信息，2009 (1)．

[4] 宋玉秋，刘艳霞，刘文军．真空开关操作过电压吸收装置的研究 [J]．机床与液压，2009 (8)．

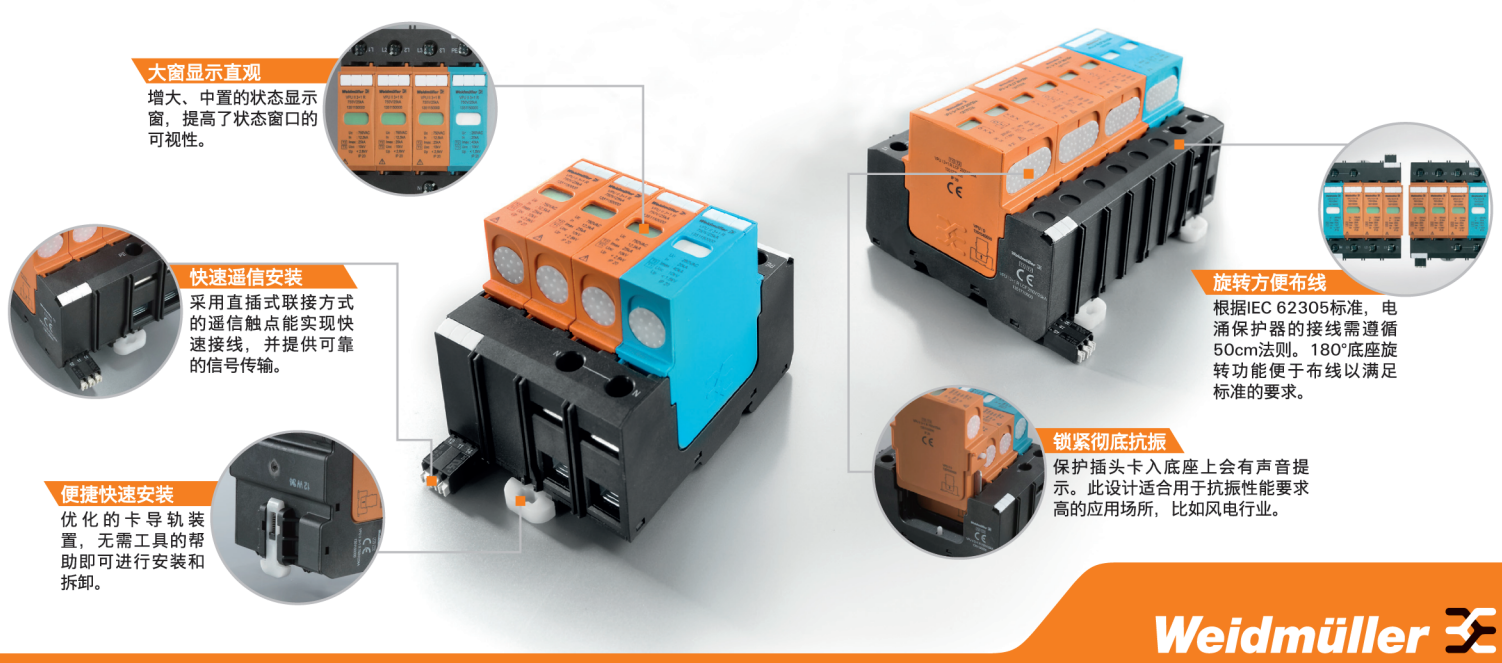
[5] 王智勇，刘振兴，孟桂荣．真空断路器操作过电压保护介绍 [J]．电工电气，2011 (3)．

[6] 张吉平，敬雅娟，敬江彬．真空断路器的操作过电压及保护措施 [J]．中国新技术新产品，2010 (4)．

[7] 谢书勇．真空断路器操作过电压的保护装置——阻容保护器 [J]．高压电器，1997 (6)．

[8] 关永刚，刘卫东，钱家骊，等．整流桥式过电压抑制装置的工作机理及应用分析 [J]．电力系统自动化，2009 (9)．

（收稿日期：2015－03－02）EA



Weidmüller

魏德米勒VPU系列电涌保护器

—低压供电系统的升级版电涌保护卫士

魏德米勒VPU系列电涌保护器用于低压供电系统，符合2012年IEC/EN 61643-11国际标准，为您提供持久、安全、前瞻性的雷电和浪涌保护解决方案，并简化维修。

魏德米勒电联接(上海)有限公司

电话: 86 21 22195008　网址: www.weidmueller.com.cn

(C) 1994-2025 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net