[电炉变压器]

电炉变压器阻容吸收装置和传递过电压限制装置的参数选择

文/兰柳　李仲华
宝钢工程技术集团有限公司

阐述真空断路器开断电炉变压器产生截流过电压的原因，给出截流过电压的表达式，由此分析阻容吸收装置限制截流过电压的原理。通过数学模型和计算实例重点讲解阻容吸收装置的参数选择，提供无法获得变压器详细参数时截流过电压的估算方法。此外，通过数学模型分析电炉变压器二次侧外加电容对电炉变压器传递过电压的限制作用。

截流过电压的产生

20世纪90年代以前，中压负荷开断设备以少油断路器、常规SF_6断路器为主，它以绝缘油或惰性气体作为开闭时的电弧熄灭介质。该类断路器最大特点是熄弧速度慢，截流能力弱，存在电弧多次重燃现象。介质恢复慢的断路器，在切除感性负载时，会产生较低的操作过电压；在切除容性负载时恰恰相反，会产生较高的操作过电压。电弧炉应用环境中，电炉变压器的投切基本都在空载状态，属感性负载，从限制操作过电压角度考虑，选用少油断路器、常规SF_6断路器是最合适的。但凡事都具有两面性，截流慢、续弧反复的断路器，动静触头材料和灭弧介质都被消耗得很快，不适用于投切极为频繁的电弧炉工况。

最近四十年来，真空断路器在世界范围内得到广泛应用，它具有灭弧能力强、可频繁操作和维护简单等特点，是开闭电炉变压器回路极为理想的断路器。目前，所有的电炉变压器回路均使用真空断路器。

真空断路器，特别是快速型真空断路器，也有其致命缺陷：切断感性负载时，如空载电炉变压器，容易产生3.5（pu）以上的操作过电压，严重危害电气设备绝缘。

真空断路器操作过电压具有随机统计性，与分闸相位有关。当分闸在回路电流过零点时，操作过电压最低；当分闸在回路电流峰值时，操作过电压最高。

常规配电回路中，真空断路器的分合闸次数少，分闸在回路电流峰值时的概率也非常低，很少出现断路器操作过电压损坏电气设备绝缘的现象。一般情况下，在断路器出线侧配置氧化锌避雷器来限制截流过电压就能满足使用要求。

断路器的熄弧特性是按照切断大电流（如正常负载电流或短路电流）设计的，只有在回路电流过零时电弧才能熄灭，这种工况反而不产生操作过电压。电弧炉冶炼电气回路中，真空断路器属于频繁投切的负荷开关设备，且一般在电炉变压器空载状态下投切，此时回路电流仅仅是电炉变压器的励磁电流，大容量变压器励磁电流占其额定电流的0.5%左右。真空断路器的灭弧能力相对于这种电流就显得很强大，从而使空载电流未过零之前就因强制熄弧而切断，即所谓的截流现象[1]。由于存储在电炉变压器上的电磁能量无法突变，在电炉短网回路中电容的共同作用下，形成高频振荡，产生截流过电压。

生产一炉钢水断路器至少要开断一次，操作频

繁，加之电炉变压器本身空载电感非常大，出现截流过电压的概率和截流过电压的幅值均比普通配电回路中大很多。像常规配电回路那样仅在真空断路器出线侧配置氧化锌避雷器，无法满足电炉变压器操作过电压保护要求。为此，需要设置阻容吸收装置来限制截流过电压，以某钢厂100 MV·A电炉变压器为例，其供电系统单线图如图1所示。

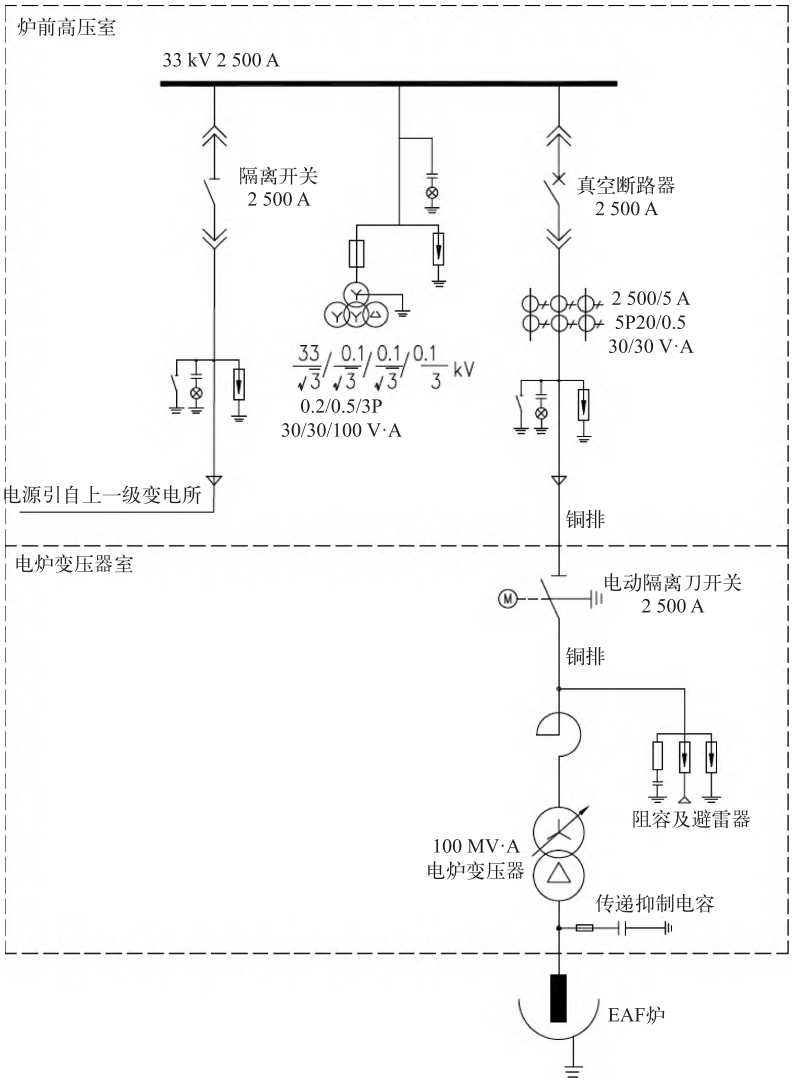

图1　某钢厂电炉供电系统单线图

为进行简化分析，将切空载电炉变压器电路图做以下等效简化，如图2所示。图2中L_T为串联电抗器电感及电炉变压器励磁电感，C_T为电炉变压器及电炉冶炼短网等效电容，L_S为电力系统电感。

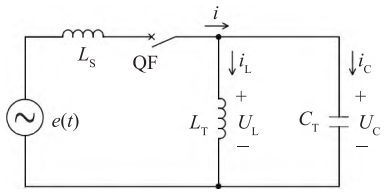

图2　切除空载电炉变压器等效电路

行业内均按照以下数学模型进行真空断路器切空载电炉变压器时操作过电压的计算。

电炉变压器空切时绕组中存储的磁场能量计算式为

$$W_L=\int_0^t u_L i_L dt=\int_0^t L_T i_L \frac{di_L}{dt}dt=\int_0^i L_T i_L di=\frac{1}{2}L_T i_L^2 \quad (1)$$

电炉变压器空切时电炉变压器及冶炼短网等效电容吸收的电场能量计算式为

$$W_C=\int_0^t u_c i_c dt=\int_0^t C_T u_c \frac{du_c}{dt}dt=\int_0^u C_T u_c du=\frac{1}{2}C_T u_c^2 \quad (2)$$

假设真空断路器切断空载电炉变压器时，截流

过电压为U_g，电炉变压器内部发生电磁振荡的能量转换表达式为

$$\frac{1}{2}L_T i_L 2+\frac{1}{2}C_T u_c^{\ 2}=\frac{1}{2}C_T U_g^{\ 2} \tag{3}$$

解得：

$$U_g=\sqrt{\frac{L_T}{C_T}\cdot i_L^{\ 2}+u_c^{\ 2}} \tag{4}$$

电源断开前，电炉变压器二次侧等效电容的两端电压u_c可忽略不计，$U_g=i_L\sqrt{\frac{L_T}{C_T}}$[1]。截流过电压与等效电容$C_T$的二次方根值成反比，考虑到电炉变压器及冶炼短网中等效电感和等效电容的损耗，截流过电压会在振荡过程中逐渐衰减。

公式$i_L\sqrt{\frac{L_T}{C_T}}$即定量确定了真空断路器切断空载电炉变压器的操作过电压，又可引申为操作过电压与回路中LC振荡临界频率之间的关系。快速真空断路器切空载电炉变压器时，熄弧时间持续十几毫秒。在这个过程中，LC回路存在反复振荡，从而产生一个反复交变的操作过电压。截流过电压幅值及交变频率与LC临界振荡频率有关，LC临界振荡频率$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_T C_T}}$[1]，临界振荡频率越高，截流过电压及其交变频率就越高。

目前，通用做法是在电炉变压器一次侧并联阻容吸收装置（简称RC装置），人为增大电炉变压器一次侧电容，降低真空断路器切空载电炉变压器时的LC振荡频率，使高频振荡迅速衰减，有效限制截流过电压幅值及交变频率。

阻容吸收装置参数计算

以往的文献对截流过电压的产生和阻容吸收装置限制截流过电压的原理都有较为详细的描述，但未通过数学模型来阐述阻容吸收装置的参数如何选择与配置。

统计发现，同样的电炉变压器及电炉短网，阻容吸收装置电阻参数选择、电容参数选择不尽一致，甚至差别较大。阻容吸收装置电阻、电容的量化，成为困扰业界的突出问题。

下面以图1某钢厂100 MV·A电炉变压器为例，计算不同阻容吸收装置参数下的截流过电压，其等效电路如图3所示。电炉变压器一次侧额定电压为33 kV，励磁电流百分比为0.4%，励磁电流I_T=0.4%×100 000/33/1.732 A=7 A。

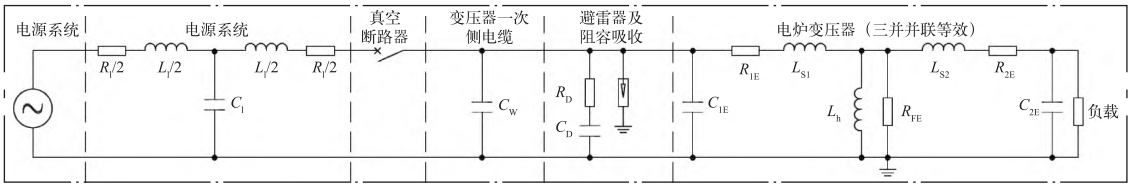

图3　电炉供电系统等效电路图

图3中：电源电缆对地电容C_l=783 nF；电源电缆电阻$R_l/2$=5.5 mΩ；电源电缆电感$L_l/2$=46 μH；变压器一次侧电缆对地电容C_W=19.5 nF；变压器一次侧对地电容C_{1E}=2.2 nF；变压器一次侧电阻R_{1E}=0.14 Ω；变压器一次侧电感L_{S1}=5.2 mH；变压器励磁电阻R_{Fe}=43.5 kΩ；变压器励磁电感L_h=17.5 H；变压器二次侧对地电容C_{2E}=0.5 nF；变压器二次侧电阻R_{2E}=0.14 Ω；变压器二次侧电感L_{S2}=5.2 mH；变压器空载电流i_{Lh}=7 A。

当真空断路器在电炉变压器空载状态断开时，电炉变压器二次绕组及电弧炉短网开路，忽略电网系统阻抗及电炉变压器一次绕组阻抗，等效电路图可简化为如图4所示。C_T为变压器一、二次回路对地电容，$C_T=C_W+C_{1E}+C_{2E}$=22.2 nF，L_T为变压器电感，$L_T\approx L_h$=17.5 H。

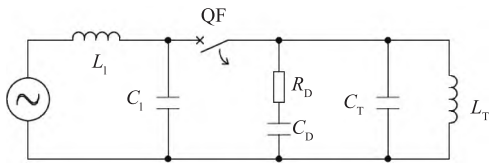

图4　电炉供电系统简化等效电路图

未配置阻容吸收装置C_D=0时，截流过电压临界振荡频率和大小分别为：$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_T C_T}}=\frac{1}{2\pi\sqrt{17.5\times22.2\times10^{-9}}}=255$ Hz；$U_g=i_T\sqrt{\frac{L_T}{C_T}}=7\times\sqrt{2}\times\sqrt{\frac{17.5}{22.2\times10^{-9}}}=278$ kV。

配置阻容吸收装置C_D=0.1 μF时，截流过电压

临界振荡频率和大小分别为：$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_T(C_T+C_D)}}=\frac{1}{2\pi\sqrt{17.5\times(22.2+100)\times10^{-9}}}=109$ Hz；$U_g=i_T\sqrt{\frac{L_T}{(C_T+C_D)}}=7\times\sqrt{2}\times\sqrt{\frac{17.5}{(22.2+100)\times10^{-9}}}=118$ kV。

配置阻容吸收装置C_D=0.2 μF时，截流过电压临界振荡频率和大小分别为：$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_T(C_T+C_D)}}=\frac{1}{2\pi\sqrt{17.5\times(22.2+200)\times10^{-9}}}=81$ Hz；$U_g=i_T\sqrt{\frac{L_T}{(C_T+C_D)}}=7\times\sqrt{2}\times\sqrt{\frac{17.5}{(22.2+200)\times10^{-9}}}=88$ kV。

该计算结果忽略了断路器灭弧室拉弧能量泄放、断路器分闸相位等因素的影响，实际数据低于上述计算值。综合长期运行经验及现场测量数据，当配置0.1 μF阻容吸收装置时，截流过电压可降低至3.0（pu）以下，在允许范围内。

电炉变压器一次侧电缆对地电容在操作过电压分析中不容忽视，具体项目理论计算及分析时，要关注该电缆的长度、规格和拼接根数等相关参数。

RC阻容吸收装置中，电阻R_D起到阻尼作用，通常取100 Ω。在工频状态下，0.1 μF和100 Ω阻容吸收装置的阻抗值为：$Z=R+\frac{1}{j\omega C}=100\ \Omega-j31\ 847\ \Omega$；$|Z|\approx31\ 847\ \Omega$。

流经阻容吸收装置的工频电流$I=U/|Z|=33\ 000/31\ 847$ A≈1.0 A。实际计算时，要充分考虑谐波电流对阻容吸收装置的影响。谐波电流的计算模型非常复杂，一般采用仿真确定。通过对众多电弧炉进行电气仿真发现，大中型电弧炉流入阻容吸收装置的谐波电流一般在1.5～2 A。与工频电流叠加，实际流入阻容吸收装置的电流为3 A左右。

电阻消耗的功率：$P=I^2R=3^2\times100$ W=900 W。

当电阻由100 Ω增加至200 Ω时，阻容吸收装置阻抗值的变化微乎其微，电流不变，电阻发热功率翻倍；当电容由0.1 μF增加至0.2 μF时，阻容吸收装置阻抗值降低一半，电流增加一倍，电阻发热功率为原来的四倍。由此可见，电阻值和电容值都不宜过大。

计算电炉变压器截流过电压时，需要变压器厂家提供详细的电炉变压器参数。当无法取得时，大容量电炉变压器励磁电流通常取0.5%额定电流，励磁电感通常取10～20 H，对地电容通常取几千皮法，由此可进行定量估算。

目前较为普遍的阻容配合为0.1 μF＆50 Ω、0.2 μF＆50 Ω、0.1 μF＆100 Ω、0.2 μF＆100 Ω等，这些常规阻容组合，一方面有利于阻容吸收装置的产品标准化；另一方面在一般电炉变压器回路中，都能达到有效限制截流过电压的目的。专业人员可根据上述分析，根据电炉变压器以及其他短网参数在常规阻容配合中合理选择。

大功率直流电炉，有很多一炉两变或一炉三变的工艺设计，其阻容吸收装置，可参照上述分析进行电阻、电容的量化配置。

电炉变压器二次侧传递过电压的限制

电弧炉正常冶炼时，电炉变压器网侧如果发生不对称接地故障、断路器操作不同期或缺相运行时，会产生较高的零序过电压。网侧零序过电压通过电炉变压器一次、二次绕组之间电容与二次绕组分布电容互相耦合的形式传递给二次侧，容易破坏绝缘脆弱的电炉变压器二次绕组及冶炼短网设备。

解决传递过电压问题的根本措施是避免不对称接地故障，尽量使断路器三相同期合闸，根除产生零序过电压的诱因。对电炉变压器而言，因冶炼工艺需要，前置断路器需频繁操作，有载调压开关需不断变换档位，发生不对称运行的概率非常高，有效抑制电炉变压器二次侧传递过电压是一个十分迫切的问题。

研究发现，电炉变压器二次侧传递过电压与电炉变压器分布电容大小成反比。在电炉变压器二次侧并联一组附加电容，可以有效抑制传递过电压等效电路图如图5所示。

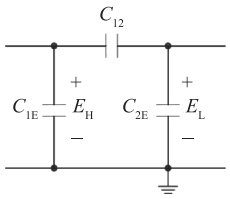

图5　电炉变压器电容传递过电压等效电路图

图5中：E_H为一次侧零序电压；E_L为二次侧传递过电压；C_{12}为一、二次侧之间电容；C_{1E}为一次侧对地电容；C_{2E}为二次侧对地电容。

由图5可知，电炉变压器二次侧传递过电压

$E_L=\frac{C_{12}}{C_{12}+C_{2E}}\times E_H$。由电炉变压器厂家提供的资料可知，$C_{12}$与$C_{2E}$数值极为接近，故$E_L\approx 0.5\ E_H$，这个幅值的电压对电炉变压器二次绕组及冶炼短网设备的绝缘安全是致命的。

在电炉变压器二次侧并联一个附加电容C_A后，等效电路图如图6所示。

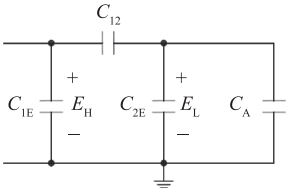

图6　并联附加电容后的电炉变压器电容传递过电压等效电路图

由图6可知，$E_L=\frac{C_{12}}{C_{12}+C_{2E}+C_A}\times E_H$。

大容量电炉变压器，C_{12}、C_{2E}电容值在4 000～6 000 pF之间，当C_A取0.1 μF，电炉变压器二次侧传递电压E_L仅为一次侧零序电压E_H的1/25，处于电炉变压器二次绕组及冶炼短网耐受电压范围内。

普通配电网中，电力变压器一次侧因故障发生不对称运行的概率非常低，一般情况下，无需对电力变压器二次侧传递过电压采取抑制措施。

电炉变压器一次侧二次侧通过电容耦合进行零序电压传递是相互的，二次侧不对称运行产生的零序电压传递至一次侧时，不足以危害一次侧绝缘，故本文不做分析讨论。

结束语

配置阻容吸收装置时，首先，为了降低绕线式电阻电感效应影响阻容吸收装置的响应速度，应选用无感电阻，电阻自感需小于10 μH；其次，在满足限制截流过电压需求的前提下，电阻、电容的选择应充分考虑阻容吸收装置的发热量，3只电阻的总发热量不宜超过3 000 W；再次，阻容吸收装置不宜布置在封闭的柜体内。

电炉变压器一、二次侧之间传递过电压限制，二次侧电容装置取值不宜大于0.1 μF。

（收稿日期：2024-09-03）

参考文献

[1] 吴广宁，张冠军，刘刚．高电压技术[M]．北京：机械工业出版社，2014．

（上接第 64 页）

压和谐波电压超出安全运行范围，确保系统安全稳定运行，不同相关性系数下系统光伏最大接入容量和系统损耗情况见表4。

表4　不同相关性系数下光伏最大接入容量和系统损耗数据

相关性系数	光伏最大接入容量/kW	系统基波损耗/kW	系统谐波损耗/kW
0	7 000	120	6
0.4	6 500	130	7
0.8	6 000	140	8

结束语

通过建立基于电能质量机会约束的配电网分布式光伏接入容量分析模型，深入探讨不同因素对分布式光伏接入容量的影响。通过算例分析、接入容量结果分析、机会约束置信水平的影响分析、分布式光伏相关性的影响分析，验证模型有效性，确保配电网在接入分布式光伏后的稳定性。EA

（收稿日期：2024-12-05）

参考文献

[1] 段明辉，乞胜静，王大成．分布式光伏接入导致配电网电压越限问题的研究[J]．农村电气化，2024(10)：41-46．
[2] 江爱华．分布式光伏入网对配电网的影响和对策[J]．农村电工，2024，32(7)：32．
[3] 周群，陈灿玉，青倚帆，等．考虑光伏波动性的配电网线损率阈值评估[J]．太阳能学报，2024，45(10)：354-362．
[4] 陈勇，沈艳婷，贺永昌．含高比例分布式光伏的低压配电网电压就地控制策略[J]．电气技术与经济，2024(10)：27-31．