[变压器]

一起干式整流变压器温升试验异常的原因分析

文/通用电气（中国）研究开发中心有限公司　蒋志勇

结合一起干式整流变压器温升试验过程中的异常现象进行相应的仿真分析，讨论了温升异常的原因，结合标准中的试验方法对特殊绕组结构变压器的温升试验提出了改进意见。

干式变压器因其具有阻燃防火、环保高效、耐热等级高、过负载能力强等优点，在一些特殊领域得到了很好的应用。尤其对于安全性和可靠性要求较高的地铁、船舶、机车牵引、无功补偿、高压变频调速等行业，具有特殊性能要求、特殊结构的变压器的应用需求也日益增长。

干式变压器的绕阻温升不仅对产品正常运行具有重要影响，从长期来看，它又直接决定着产品绝缘体系的寿命，可靠的温升设计对产品的运行性能至关重要。另外，从产品的经济效益方面来看，可靠的温升设计也直接决定着产品的成本和价格竞争力。因此，对干式变压器温升的研究具有现实而重要的意义。在一系列的研究方法与思路中，温升试验无疑是验证变压器温升设计的可靠性与合理性的最重要手段。目前，对于变压器的温升试验主要依据国标（或IEC、IEEE）中的试验方法进行。对于具有特殊结构变压器的温升试验，应该在标准方法的指导下依据产品自身特性，制订有针对性的试验方法。

产品介绍及试验现象描述

1．产品介绍

此台产品订货方为国内某大型电力电子设备企业，应用于青岛某机车制造企业的项目。产品主要技术参数如下：

产品型号：ZBDC－6000/27.5,单相双柱，变压器高压额定电压为27.5 kV，低压侧额定电压为0.55 kV。低压绕组由等容量的15组输出单元组成，每个独立单元的额定容量为400 kV·A。高压绕组耐压水平LI200 kV AC85 kV，低压绕组对高压绕组及对地工频耐压要求为3 kV,相邻低压绕组之间工频耐压水平为35 kV，冷却方式为风冷。变压器带一个15 kV·A、输出电压为0.38 kV的辅助绕组。其余要求满足GB 1094.11及相关标准要求。

如图1所示，为便于低压出线，该产品技术方案将高压绕组放在了内部，低压绕组15个独立单元自上而下顺序排列，辅助绕组位于低压绕组下部。高低压绕组均采用双柱串联结构。由于高压绕组额定低压为27.5 kV，同时耐压水平要求较高，因此高压绕组采用环氧树脂浇注工艺。高压线圈结构为分段层式。为便于出线，低压线圈采用饼式结构，每个单元分为等匝的两饼。每柱低压线圈由15个单元、30饼线组成。为避免并绕导线中产生环流，低压每个单元均采用完全换位绕制。低压线圈绝缘系统由H级材料组成。变压器

整体结构如图1所示。

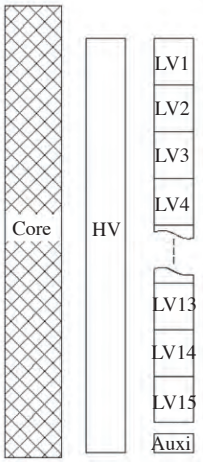

图1　变压器结构示意图

2．温升试验异常现象的描述

产品生产完毕后即进行了相应的例行和型式试验，各项试验结果均符合设计要求。为了进一步验证变压器的温升特性，随后按照GB 1094.11中的“模拟负载法”对产品进行了温升试验。

温升试验过程中的异常现象描述：空载状态下温升试验结束后，即对产品进行短路状态下的温升试验。试验接线为：低压绕组15个单元分别短接，高压绕阻加额定频率的额定电流。试验过程中辅助绕组始终开路。施加电流8 h左右时，采用点温仪对外绕阻即低压绕阻的各点温度进行了测取，测取温度值如下表所示，表中饼序为自上而下排布的线饼序号。

表1　电动机与变压器匹配

饼序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
温度/℃	191	190	159	159	163	163	165	165	173	175	177	177	177	175	166
饼序	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
温度/℃	166	171	171	181	182	169	169	157	157	159	159	157	156	235	235

试验现场的红外测温仪显示：沿铁心柱轴向排布的不同的低压线圈输出单元，其短路温升试验过程中的温度是不同的。尤其，低压绕阻第一个输出单元（低压绕阻最上部的一个单元）和最后一个单元（低压绕阻最下部的一个单元）显示了明显的高于其他单元的温度值。

绕阻温度异常的原因分析

1．初步分析

运行中变压器绕阻局部温度过高基本有以下几个原因：①环流：本案中变压器低压绕组为四根叠绕，但绕制过程中均经过了完全换位，且低压15个输出单元的结构均相同，而只有首末两个单元温度异常，因此基本可以排除涡流的影响。②漏磁产生的涡流：线圈首末端导线因为处在较强的端部漏磁场中，线圈导体在漏磁场的影响下必然产生相较于其他部位导体更加严重的涡流和涡流损耗，因此温度相对也要高。但结合实际的监测数据和以往经验来看，涡流产生的温度升高不至如此。③线圈所处位置的散热状况：本试品中，首末两端应该是线圈散热能力最好的位置，即使首端需要考虑下部线圈的加热效应，因此其温度不应该表现的如此之高。

2．仿真计算

为了进一步分析绕阻局部温度过高的原因，笔者利用有限元分析软件对试品进行了3D建模分析。为了减小运算量，仅建立一半的模型进行计算，三维模型如图2所示。模型建立完成后，依据计算精度要求，对模型进行四面体网格划分。网格划分结果如图

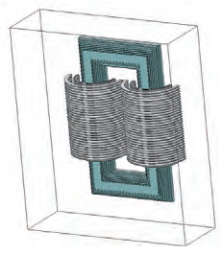

图2　变压器结构示意图

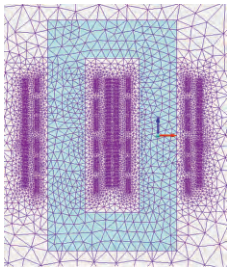

图3　变压器结构示意图

模型网格划分完成后，按照变压器绕阻电气参数（线圈匝数）以及相应材料的属性，对模型进行相应的参数设定。参数设定完成后，利用场-路耦合的方法，利用软件的三维求解器对模型进行求解。场-路耦合过程模拟温升试验中的短路状态接线：低压绕组的15个输出单元分别短接，高压绕组施加额定平率的额定电流。求解结果的电密分布云图如图4所示。

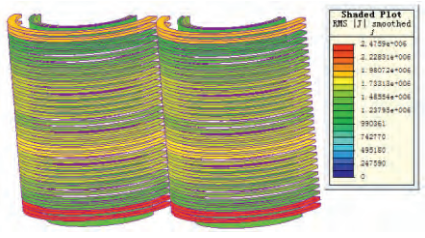

图4　电密分布云图

计算结果显示：低压绕阻的上下两个输出单元电流密度远高于其他单元；各单元的电气参数、外形及导体尺寸都相同，但承载电流并不完全相同。

2．计算结果分析

对于常规的电力变压器，当二次绕组短接、一次绕组施加额定频率的额定电流时，短接的二次绕组内将通过近似于额定电流的一个电流，这便是变压器温升试验中模拟负载法短路试验的依据。

由于本试品的二次绕组由15个独立单元由上而下排布组成，根据基尔霍夫电压定律确立的支路电压、支路电流关系矩阵为：

$$[U] = [Z] \times [I]$$

式中的[Z]矩阵为一个由绕组电阻、自感抗、分裂阻抗和负载决定的3n阶矩阵。进行短路状态下的温升试验时，试验过程中各独立短接单元的电流分布与实际负载运行状况并不相同：实际负载状况下，每个单元承载的电流由实际的负载决定，而在模拟负载法的温升试验中，短路状态下各线圈的电流则由绕组的“复合”阻抗决定。不同位置处的小线圈，其耦合产生的复合阻抗是不相同的，这也就形成了本例中电流分布不均匀的结果。

此外，对于本例中最下部的输出单元，由图1可见，由于辅助绕组的影响，该部分高低压绕阻的安匝是很不平衡的，这也是造成最下一个低压单元的电流远大于其他单元的重要原因。

试验方法的改进

由上述分析可见：模拟负载法温升试验中造成各独立单元电流分布不均主要是由各线圈复合阻抗之间存在差别引起的，对于实际运行中的产品，其电流主要由输出负载决定，因此并不会出现如试验中的这样严重的电流不均衡。

基于上述原因，对于此类有着特殊线圈结构的变压器温升试验，提出两种改进的试验方法。第一，由于该类变压器二次侧分为很多个独立单元，各独立单元的额定容量相对较小，因此，可以在条件允许的情况下，采用“直接负载法”进行温升试验。第二，当采用“模拟负载法”进行温升试验时，可以依据实际需要，在短接的二次小线圈回路中串接入一个合适的阻抗，通过人为干预，使得各小线圈电流分布基本相同，一次避免过大的电流不均衡带来的危险，并尽可能提高温升试验的真实性。

对于第一种改进，主要是结合产品特点选择另一种标准的试验方法，此处不再赘述。对于第二种方法，本文结合前述样机，对仿真模型参数进行相应的改进并重新进行计算。

试验接线改进后的仿真计算

为了均衡各线圈的电流分布，对原场-路耦合计算模型进行相应的更改，在第一个和第十五个单元短路回路中串联进一个8耦合计－6 H的电感参量，并按照之前的求解参数进行重新求解。求解结果如图6所示。

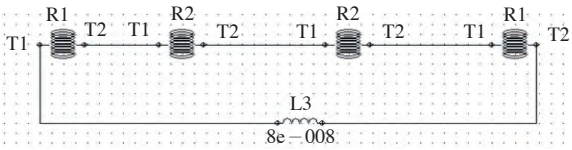

图5　改进后电路接线图

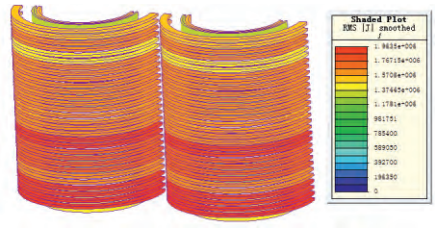

图6　电密分布云图

由改进后的分析结果可见：二次各独立线圈中的电流分布相比于改进前有了很大的改善，各线圈电流分布较为均匀，可以预见：通过合理设置各独立线圈回路串入电感的参数，可以使得各独立线圈的电流达到基本均衡。

结束语

变压器的温升试验是验证其性能和设计可靠性的关键所在。试验方法对试验结果的正确性起到至为关键的影响。在变压器试验过程中，尤其是特种变压器的温升试验方案制订过程中，应对变压器的电气特性进行充分的了解和掌握。

对于具有多个独立输出单元、轴向排布的变压器，通过在各独立短路回路中串入适当的阻抗，可以起到均衡各小线圈见电流均衡的目的。**EA**

（收稿日期：2015.06.01）

（编辑：白文亭）