

[变压器]

新型Scott平衡牵引变压器三维漏磁场研究

文/保定天威保变电气股份有限公司 肖军科 赵丽杰

针对Scott牵引变变压器的结构特点，建立工程应用的三维ProE模型，并利用三维电磁仿真软件对漏磁场进行仿真分析，进一步优化产品结构和屏蔽方案。

随着我国电气化铁路和高速铁路的快速发展，对铁路牵引变压器的要求也越来越高，Scott平衡牵引变压器做为一种特殊的三相铁路牵引变压器，其应用也越来越广泛。

本新型Scott平衡牵引变压器结构特殊：高压A相采用双绕组，高压B、C相采用单绕组，并配置平衡绕组，采用双铁心结构，A相和BC相分别布置在两个铁心主体。其特殊结构导致BC相位置漏磁场偏高，如果此处的产品结构和屏蔽方案不合理，导致局部漏磁场高，从而引发局部过热，威胁变压器安全运行。因此，对本产品的漏磁场进行准确的分析十分必要。

根据新型Scott平衡牵引变压器结构和磁场特性，利用Pro/E软件建立了变压器铁心、绕组、油箱和屏蔽的三维模型，对漏磁场进行仿真分析，优化电屏蔽和磁屏蔽的组合结构，为新型Scott平衡牵引变压器的开发设计提供技术保证。

新型Scott平衡牵引变压器简介

本新型Scott平衡牵引变压器基于三相Scott牵引变压器和单相牵引变压器接线，低压侧中部引出Scott接线，高压侧接成星形连接，低压侧侧接成“+”形，通过本变压器，高压三相220 kV电压转换为低压两相2*27.5 kV电压，低压两相M、m与T、t在电压相位上相差90°。接线原理如

图1所示。

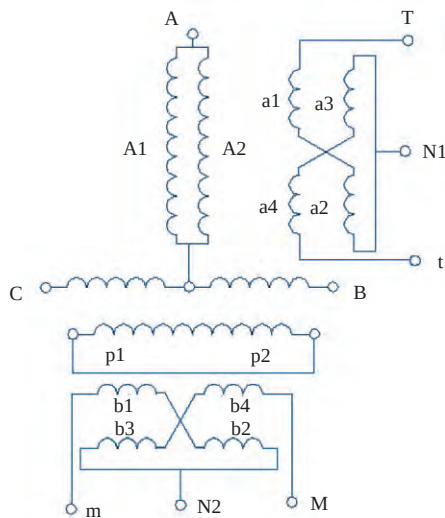


图1 接线原理图

本新型Scott平衡牵引变压器中，水平放置为主变（简称M变），垂直放置为梯变（简称T变），其中MN₂、TN₁为27.5 kV低压供电侧（简称T侧）；mN₂、tN₁为27.5 kV低压馈电侧（简称F侧）。

其三相绕组布置如图2所示，其中，A1、A2为高压A相绕组，a1、a2、a3、a4、b1、b2、b3、b4为低压绕组，p1、p2为平衡绕组。各绕组接线原理图如图2所示。

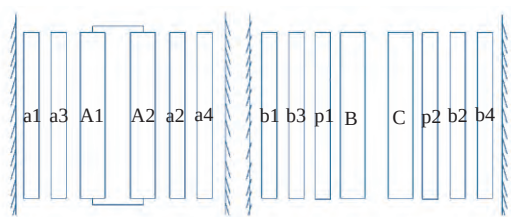


图2 三相绕组布置图

涡流损耗的计算分析

1. 解析法

对于常规产品的涡流损耗，通常采用解析法公式进行计算。此类型变压器屏蔽结构单一，且一般为对称布置，方便计算和设计。但是，本新型Scott平衡牵引变压器涡流损耗的计算复杂，为电磁组合屏蔽，且屏蔽布置不对称，需进行详细的涡流损耗计算，以便对组合屏蔽方案优化设计，常规解析法不能满足计算要求。

2. 二维分析法

二维分析法适合求解具有对称性或平面性的涡流损耗。但在计算三相变压器金属结构件的涡流损耗时，由于涡流损耗的分布的不对称性，且金属结构件的布置复杂且不具有对称性。同时，对于三相变压器，相间部位的漏磁场受各相电流共同作用。因此，对于三相变压器及特殊结构变压器（包括本新型Scott平衡牵引变压器），采用二维分析金属结构件中涡流损耗是不适当的。

3. 三维分析法

对于铁磁件，涡流损耗一般采用A-V-A法，公式为

$$J = \sigma E = \sigma \left(\frac{\alpha A}{\alpha t} - \nabla V \right)$$

$$P_e = \int_V \frac{|J|^2}{\sigma} dV$$

式中，A为磁矢量位；V为电标量位。

为降低金属构件中在电场中产生的环流损耗，变压器产品在设计过程中，一般对漏磁场集中位置的金属构件环路进行隔断处理，如铁心框间拉带与腹板在一侧断开。

对于金属构件涡流损耗，使用上式涡流场A-V-A方法求解，此部分环流大小可通过金属构件截面上涡流积分求得。

4. 计算分析方法的选择

本新型Scott平衡牵引变压器绕组布置分为T座和M座，非对称布置，T座和M座对应的金属结构件布置及屏蔽结构复杂。为降低制造加工成本，主要金属结构件为低碳钢材料，漏磁场强度

高位置使用低磁钢。考虑本变压器部分位置的漏磁场较为集中，漏磁密偏高，金属结构件表面增加磁屏蔽和电屏蔽，屏蔽的结构复杂，且屏蔽位置和尺寸不规则。常规解析法和二维分析法已对本产品不适用。三维有限元分析可提高产品漏磁场计算的准确度，优选产品结构和屏蔽结构，预防产品局部过热。因此，本产品的漏磁场计算采用三维有限元进行分析计算。

仿真计算分析及结果分析

用MagNet电磁分析软件（Infolytica公司产品）对产品的漏磁场进行了分析，根据新型Scott平衡牵引变压器结构及其屏蔽结构特点，建立了三维模型，为简化计算取三维模型1/2做对称计算，如图3所示。

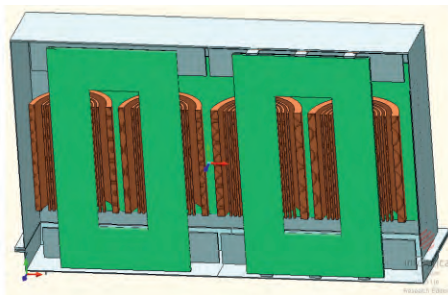


图3 三维计算模型

笔者利用MagNet软件分别对T座和M座单独运行工况的漏磁场进行了分析计算。磁场分布如图4（T座运行）、图5（M座运行）所示。

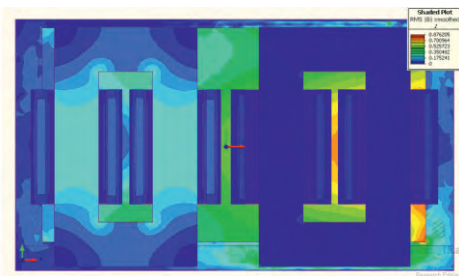


图4 漏磁场分布云图（T座运行）

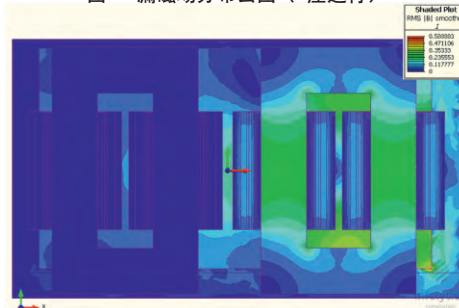


图5 漏磁场分布云图（M座运行）

从图4、图5可以看出漏磁集中在高压B、C侧（右侧），对右侧漏磁场较高位置的屏蔽措施和金属构件材料选用进行优化。具体优化内容如下：在油箱顶部B、C侧外表面铺设一定厚度的电屏蔽（铜板），范围由油箱中心线至右侧端部；在箱壁布置磁屏蔽（硅钢片材料），磁屏蔽由油箱中心线至右侧端部，并在油箱右侧端面布置磁屏蔽；铁心垫脚及油箱中心线右侧箱底和箱沿处采用低磁钢材质。

将新型Scott平衡牵引变压器屏蔽方案优化前后的主要构件磁通密度（简称磁密）、涡流密度及损耗密度与已运行变压器进行对比，结果如表1、表2所示。

表1 优化前后主要构件分析值对比（T座运行）

对比项	优化前	优化后	已运行变压器
油箱磁屏蔽磁密/T	1.51~1.82	1.05~1.35	1.35~1.48
铁心腹板磁密/T	0.22	<0.03	<0.04
油箱磁密/T	1.4	0.9	<1.2
最大涡流密度 /A/mm ²	<15	<3.6	<10
最大总损耗密度 /W/m ²	2.1E06	5.3E05	1.7E06

（上接第69页）

价格为1.04万元，S9-80 kV·A预算价格为1.21万元，则节省设备费1 700元。

表4 节省费用

规格型号	节省电费/元	节省设备费/元	回收年限/年
RS9-30	1 990	2 800	1.77
RS9-50	2 753	1 700	2.52
RS9-63	3 300	2 200	2.16

从表4中可以看出，投入1台RS9系列调容变压器，仅用节省电费及设备费，用2~3年的时间就可以回收设备购置费，以后每年可以节省电费获益2 000~3 300元/台，如果变压器运行寿命按20年计算，可获益4~6.6万元/台，经济效益十分可观。

结束语

综上所述，调容变压器具有以下优势。

1) 变压器的装机容量可减少约一半，节约了变压器的闲置容量，并能很好满足重负荷启动特性的要求，解决了变损和线损的不合理现状，提高了供电质量。

表2 优化前后主要构件分析值对比（M座运行）

对比项	优化前	优化后	已运行变压器
油箱磁屏蔽磁密	1.55~1.85T	1.10~1.38T	1.35~1.48T
铁心腹板磁密	0.21T	<0.03T	<0.04T
油箱磁密	1.4T	0.9T	<1.2T
最大涡流密度	<15A/mm ²	<3.5 A/mm ²	<10 A/mm ²
最大总损耗密度	2.2E06W/m ²	5.4E05W/m ²	1.7E06W/m ²

从表1、表2的横向对比可以得出，新型Scott平衡牵引变压器的屏蔽结构优化及主要构件材料更改后，各项指标均优于已运行变压器产品，结构件局部无过热问题。

结论

笔者依据新型Scott平衡牵引变压器的结构特点，建立了三维ProE模型，并利用三维电磁仿真软件对漏磁场进行仿真分析。根据分析结果，对此台变压器的屏蔽结构和主要构件的材料选取进行优化，提高了产品的安全性能。目前，公司已生产制造新型Scott平衡牵引变压器，试验合格，无局部过热现象，进一步论证了三维计算分析结果的正确性。EA

（收稿日期：2015.05.06）

（编辑：白文亭）

2) 由于变压器的空载损耗、负载损耗平均降低45%~55%，可以节约大量电能和电费，年节约电费2000~3300元/台。

3) 由于调容变压器的价格略高于同容量S9变压器的价格，而低于双倍容量S9变压器的价格，低容量调容变压器可以满足大容量变压器的需求，所以投资一台RS9系列调容变压器，仅用节省的电费及设备费，用2~3年的时间就可以回收设备购置费，从而降低成本。

4) 由于变压器的容量与实际负荷的合理匹配，使变压器的效率大大提高，从而使变压器在高效区运行，满足变压器经济运行的要求，解决了变损和线损的不合理状况，增强了供电系统的能力，降低了网损，提高了供电质量。

通过以上分析，调容变压器可以提高电网运行质量，节约投资，降低成本，节能效果显著，是油田理想的更新换代产品，具有较高的经济效益和社会效益。EA

（收稿日期：2015.03.06）

（编辑：白文亭）