基于有限元法的高导磁材料控制变压器损耗分析

控制变压器通常用于机床、机械设备中。现行控制变压器存在能效低、自身损耗大的缺点。从优化材料角度对控制变压器进行节能研究，利用有限元软件对控制变压器的磁场、损耗进行分析。研究表明高导磁材料显著提高控制变压器的导磁能力，有效降低控制变压器的损耗。

李世博　黄荣鑫　郭　建　金秀平／扬州大学水利与能源动力工程学院

李世博／副教授

关键词／Keywords
控制变压器·
高导磁材料·
有限元·
损耗·

0　引言

随着控制变压器广泛的使用以及人们节能意识的增强，控制变压器的节能研究引起了广泛的关注。Ahn Hyun-Mo1等[1]利用有限元分析了控制变压器短路时绕组的电磁力，发现控制变压器短路故障后，其二次侧绕组电磁力大于一侧绕组电磁力。Yazdani-Asrami Mohammad1等人[2]通过有限元分析非正弦电压对控制变压器空载损耗的影响，发现电压畸变会使控制变压器空载损耗增加并使磁通在铁心中分布不均。Zare Mehdi1等人[3]利用有限元软件对壳式变压器和铁心式变压器漏磁场进行了分析，发现铁心式变压器漏磁比壳式变压器少。赵姗姗等[4]借助有限元软件对变压器电磁参数进行计算和分析。张卫纯等人[5]运用有限元软件对电力变压器的电磁场分布及金属结构件的功率损耗进行了分析，提出在线圈端部设置磁屏蔽条降低夹件等金属结构件中的杂散损耗的方法。姚志、祁颖矢等人[6]利用有限元软件对变压器结构件损耗及局部过热仿真研究，提出采用分层计算方法可精确计算变压器油箱的损耗，并且可以采用贴铜屏蔽的方式降低低压升高座的温升。本文在分析控制变压器损耗因素的基础上，提出采用高导磁材料制造控制变压器，以期降低控制变压器的损耗。

江苏省科技计划项目（BY2015061-15）。

1　控制变压器的损耗

1.1　空载损耗

控制变压器的空载损耗由磁滞损耗、涡流损耗和附加损耗组成[7]。因控制变压器的容量小、结构简单，故本文不考虑控制变压器附加损耗的影响。空载损耗计算公式[8]为

$$P_0 = P_h + P_e = 0.1\alpha f B_m^2 m + 4\times10^{-5}(dK_f B_m)^2 m/(3\rho r) \quad (1)$$

式中，P_h为控制变压器磁滞损耗，W；P_e为控制变压器涡流损耗，W；α为与材料有关的损耗系数；f为交变磁场的频率，Hz；B_m为磁通密度的峰值，T；m为铁心的质量，kg；K_f为励磁电流波形系数；d为硅钢片厚度，mm；ρ为硅钢片电阻率，μΩ·m；r为硅钢片的密度，kg/m^3。

通过对式（1）的观察发现，控制变压器的空载损耗与铁心质量成正比，与最大磁通密度的二次方成正比，同时与材料特性密切相关。

1.2　负载损耗

控制变压器负载损耗包括绕组电阻损耗、绕组涡流损耗、引线损耗以及杂散损耗等[9]。通常将其绕组电阻损耗称为

基本损耗，其余统称为附加损耗。因基本损耗占负载损耗的绝大部分，故仅考虑绕组电阻损耗，负载损耗计算公式[10]为

$$P_k = \sum_{j=1}^{n} I_j^2 R_j \qquad (2)$$

式中，j为控制变压器端口编号；I_j为各端口绕组的额定电流，A；R_j为各端口绕组的电阻值，Ω。

通过对式（2）的观察发现，控制变压器的负载损耗与各绕组的电阻成正比，而绕组的电阻与绕组的材料、长度以及截面积等密切相关。

通过上述对控制变压器损耗因素的分析可知，控制变压器的空载损耗与硅钢片的材质、厚度以及磁通密度等密切相关，同时其负载损耗与绕组的材料、长度以及截面积等密切相关[11]。故本文提出在保证控制变压器容量不变的基础上，对控制变压器的铁心材料进行优化。

2 控制变压器的有限元分析

2.1 三维瞬态场模型

本文以BM11型控制变压器为例建立三维瞬态场模型，其硅钢片型号为EI－192，分别以普通硅钢片35DW290与高导磁硅钢片35BR80为材料进行比较分析。相应的控制变压器模型如图1和图2所示。

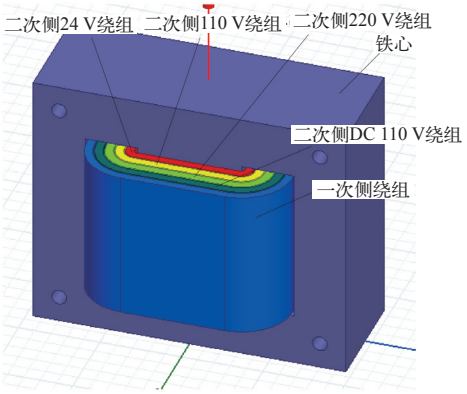

图1 普通硅钢片控制变压器的模型

由图1和图2可知，在使用不同材料时，铁心的叠片厚度发生了改变。其中普通硅钢片控制变压器的铁心叠片厚度为70 mm，而高导磁硅钢片控制变压器的铁心叠片厚度仅为60 mm。因此利用高导磁材料制造控制变压器，可有效减少铁磁材料的用量，同时减小控制变压器铁心的有效截面积。

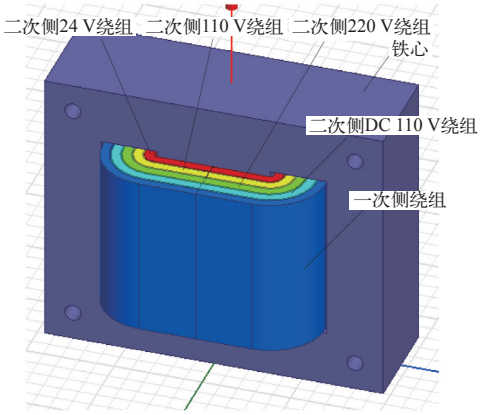

图2 高导磁硅钢片控制变压器的模型

2.2 对比分析

利用Ansoft软件分别对控制变压器的磁场、空载损耗和负载损耗进行对比分析，其磁场分布如图3和图4所示。

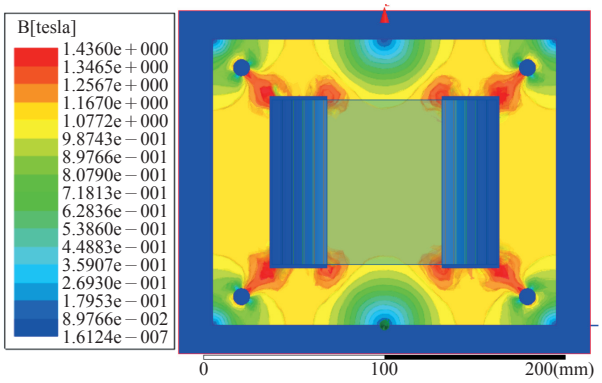

图3 普通硅钢片控制变压器的磁密云

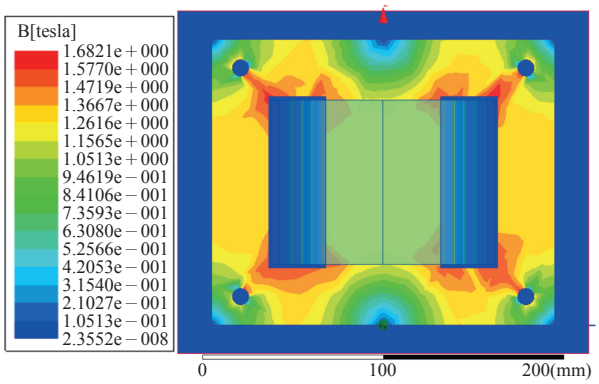

图4 高导磁材料控制变压器的磁密云

由图3和图4可知，普通硅钢片控制变压器的工作磁通密度在1.25 T左右；高导磁材料控制变压器的工作磁通密度在1.41 T左右，而普通硅钢片的

饱和磁通密度为1.58 T，高导磁材料的饱和磁通密度为1.88 T。故高导磁材料控制变压器较普通硅钢片控制变压器的磁通密度冗余量大，从而可以有效避免电压波动对控制变压器工作磁通的影响。普通硅钢片控制变压器的空载损耗如图5所示。高导磁材料控制变压器的空载损耗如图6所示。

由图5和图6可知，普通硅钢片控制变压器的空载损耗为24.346 5 W，高导磁材料控制变压器的空载损耗为11.632 3 W，表明高导磁材料可以显著降低控制变压器的空载损耗。普通硅钢片控制变压器的负载损耗如图7所示。高导磁材料控制变压器的负载损耗如图8所示。

由图7和图8可知，普通硅钢片控制变压器的负载损耗为40.091 6 W，高导磁材料控制变压器的负载损耗为34.301 4 W，表明高导磁材料可以显著降低负载损耗。

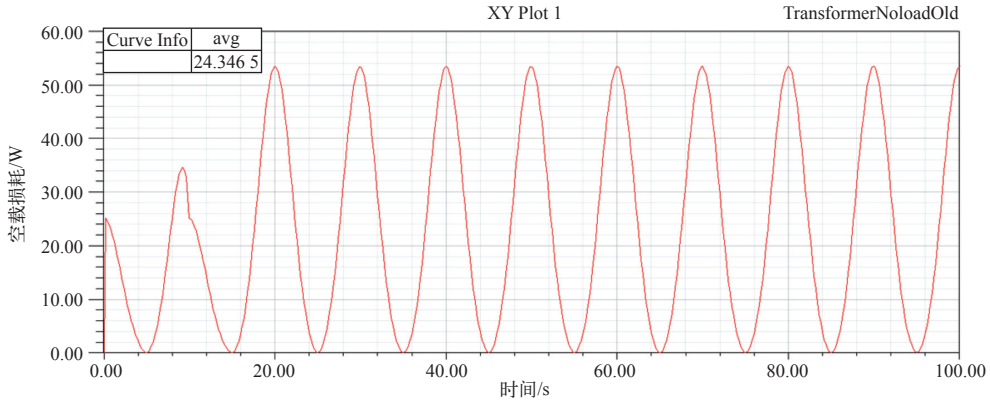

图5 普通硅钢片控制变压器的空载损耗

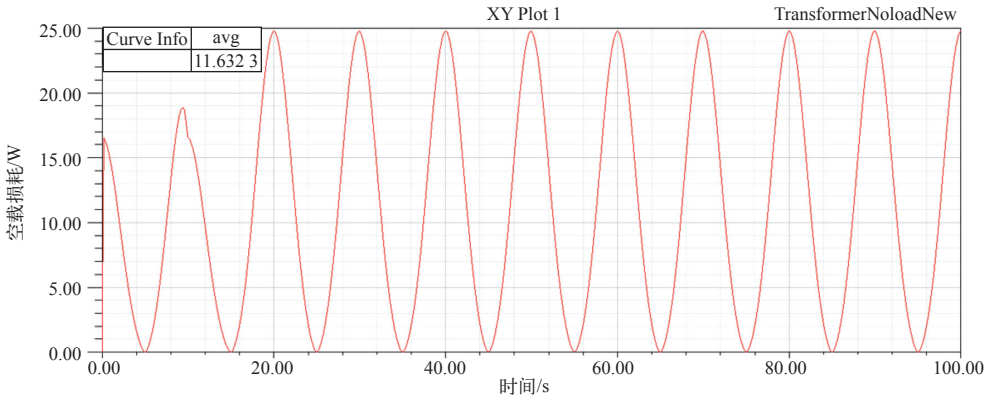

图6 高导磁材料控制变压器的空载损耗

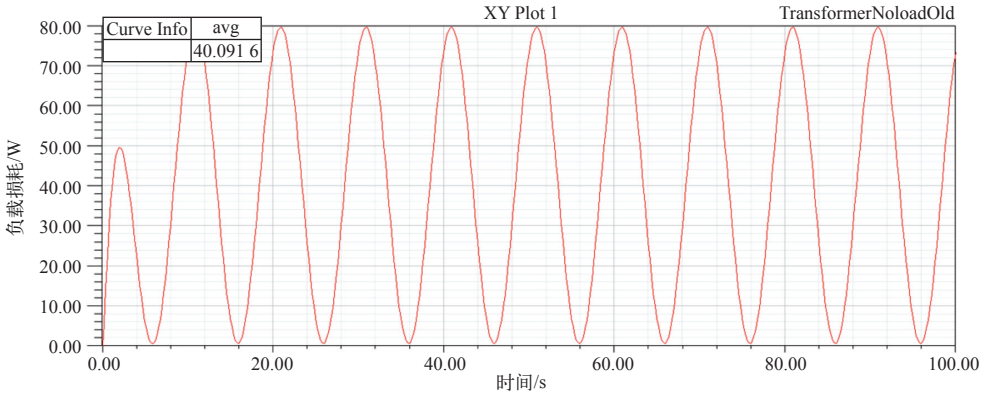

图7 普通硅钢片控制变压器的负载损耗

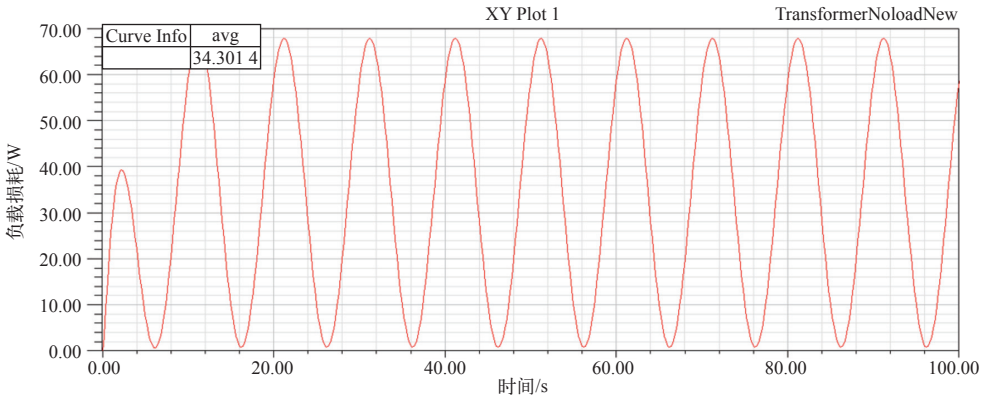

图8　高导磁材料控制变压器的负载损耗

通过上述比较分析，发现高导磁材料控制变压器较普通硅钢片控制变压器的磁感应强度提高了约0.16 T，同时空载损耗降低了约12.7 W，负载损耗降低了约5.7 W。高导磁材料通过提升铁心材料的导磁能力，降低控制变压器铁心的有效截面积，从而降低控制变压器的空载损耗，同时由于控制变压器铁心有效截面积的降低，致使控制变压器绕组材料的使用量降低，进而降低控制变压器的负载损耗。

3　结束语

通过对控制变压器损耗因素的分析，提出使用高导磁材料来提高控制变压器的磁通密度来降低空载损耗与负载损耗。有限元分析仿真结果表明，高导磁材料控制变压器较普通硅钢片控制变压器的空载损耗、负载损耗降低显著，同时可有效降低控制变压器的铁心有效截面积，从而减少铁磁材料的用量，达到节能与节材的目的。

参考文献

[1] Ahn Hyun-Mo1．Finite-element analysis of short-circuit electromagnetic force in power transformer [J]．IEEE Transactions on Industry Applications，2011，47 (3)：1267-1272．

[2] Yazdani-Asrami Mohammad，Mirzaie Mohammad1．No-load loss calculation of distribution transformers supplied by nonsinusoidal voltage using three-dimensional finite element analysis [J]．Energy，2013，50 (1)：205-219．

[3] Zare Mehdi1，Razi Seyyed，Mohammad Pedram．Finite element analysis of leakage inductance of 3-phase shell-type and core type transformers [J]．Research Journal of Applied Sciences，2012，4 (12)：1721-1728．

[4] 赵姗姗，李红江，杨锋．基Ansoft的变压器电磁参数计算与分析 [J]．变压器，2015，52 (10)：14-18．

[5] 张卫纯，潘风明，张新根．基于有限元法的电力变压器金属结构件损耗分析 [J]．高压电器，2013，49 (11)：55-61．

[6] 姚志，祁颖矢，李锦军．大型变压器结构件损耗及局部过热仿真研究 [J]．变压器，2015 (7)：30-33．

[7] 郭建，李世博，黄荣鑫．控制变压器的结构优化与运行方式管理 [J]．扬州大学学报：自然科学版，2016，19 (3)：41-44，53．

[8] 尹克宁．变压器设计原理 [M]．北京：中国电力出版社，2003．

[9] 王平瑞．变压器的损耗及效率的研究 [J]．煤炭技术，2011 (9)：43-45．

[10] 姚志松，姚磊．变压器节能方法与技术改造应用实例 [M]．北京：中国电力出版社，2009：14-120．

[11] 胡细保，郗亮，谭智勇，等．高频高压大功率变压器优化设计方法研究 [J]．电气工程学报，2016，11 (16)：40-47．

（收稿日期：2016－11－21）EA