

文章编号:1001-1609(2004)03-0164-03

300 kV·A/25 000 V/860 V 高温超导变压器漏磁场研究

李晓松, 陈乔夫

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

Study on Magnetic Leakage Field of 300 kV·A/25 000 V/860 V HTS Power Transformer

LI Xiao-song, CHEN Qiao-fu

(College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

摘要: 高温超导变压器的漏磁场严重会影响绕组中的临界电流和交流损耗。由于超导材料磁化的各向异性,减小漏磁场径向分量显得尤其重要。利用 ANSYS 软件计算多种情况下超导变压器的磁场分布,研究了变压器的铁心结构、绕组形式、二次绕组不均匀气隙以及不同的一、二次绕组线圈高度等因素对漏磁场的影响。所得结论可供设计参考。

关键词: 高温超导变压器; 漏磁场; 绕组形式; ANSYS 软件
中图分类号: TM411.1, TM26 **文献标识码:** A

Abstract: The magnetic leakage field in HTS transformer decreases the critical current of winding and increases the AC losses. Because of the anisotropic properties of the HTS, reducing the radial component of the leakage field is particularly important. In this paper the influence of the core structure, the winding configuration and, especially, the unequal gap lengths among the secondary coil pancakes on the stray field is studied by using the software ANSYS. Some suggestions for improving the leakage field distribution are presented to make HTS transformer more efficient.

Key words: HTS transformer; magnetic leakage field; winding feature; software ANSYS

1 引言

与传统变压器相比,高温超导电力变压器具有体积小、重量轻、效率高及无潜在污染和火灾隐患等一系列优点,近年来,众多学者从线圈形式、低温下绝缘材料特性到优化设计和试验方法等许多方面都进行了深入研究^[1-4]。

众所周知,超导变压器中漏磁场减小绕组的临界电流,并增加交流损耗。研究表明,由于超导材料磁化的各向异性,磁场径向分量对临界电流和交流损耗的影响较轴向分量大得多,如用超导线 BiPb2223 绕制成的线圈,在温度为 77 K,每根带材

流过 9.5 A(峰值)电流时,要求漏磁场径向分量不得大于 0.015 T,而允许的轴向分量可达 0.11 T^[5]。又如 1 MV·A 的超导变压器中,当温度为 77 K 时,由磁场轴向分量引起的交流损耗不及径向分量的 1/3^[6]。因此,减小磁场特别是其径向分量对高温超导变压器而言显得尤其重要。为此,文[5]在线圈上、下端部各设置一个由低导磁率铁磁材料做成的分磁环,目的在于改变绕组端部磁力线的路径以减小磁场最大径向分量。显然,这种方法产生的效果是肯定的,但也产生诸如增加铁心高度、甚至增加额外损耗等问题。在进行国家 863 计划项目“机车用 300 kV·A 超导变压器”的电磁设计时,对如何减小漏磁场做了一些探索,如适当选取铁心结构和线圈排列方式及采用不均匀气隙和不等高线圈高度等措施都不失为减小漏磁场径向分量的简单有效方法。

2 变压器结构形式

2.1 变压器主要设计参数

表 1 列出了 300 kV·A 超导变压器的主要设计参数。其中铁心采用低损耗硅钢片,且工作在常温下。

表 1 变压器主要设计参数

容量/(kV·A)	电压/V	电流/A	频率/Hz	相数
314.7	25 000/860	12.6/365.9	50	单相
百分比阻抗/%	超导线材料	超导线线规/(mm×mm)	冷却方式	温度
6~8	BSCCO-2223	4.2×0.2	液氮闭式循环	67 K

2.2 铁心结构及绕组形式

可供单相变压器采用的铁心结构形式有两种,即两柱铁心窗式和单柱铁心壳式。考虑到螺旋式绕组要求导线换位,而超导线较脆,不便于操作,因此绕组选用双饼式线圈结构。该设计中,一次绕组匝数远较二次绕组多,故在一个铁心柱上径向排列两个一次绕组线圈和一个二次绕组线圈。结合两种铁心和线圈的不同排列方式,使得变压器将具有多种可能的结构形式。这里仅考虑以下两种:①两柱铁心

收稿日期:2003-12-18; 修回日期:2004-02-09

基金项目:国家 863 计划项目(2002AA30637)

窗式;两柱铁心上对称地布置“H-L-H”(高压-低压-高压)或“L-H-H”排列的一、二次绕组;②单柱铁心壳式;绕组置于中间铁心柱上,且为“H-L-H”排列。线圈有关参数计算如下:

一次线圈的最大线饼数 m_1 由给定的铁心高度决定,同一铁心柱上两个一次线圈的线饼匝数为 $n_{11}+n_{12}=\frac{w_1 a_1}{2m_1 k}$ 。 n_{11}, n_{12} 取值应尽量接近。二次绕组线

饼数 m_2 须满足 $\frac{m_2}{a_2/2}=\text{整数}$,线饼匝数 $n_2=\frac{w_2 a_2}{2m_2 k}$ 。式中: k 为1或2分别对应单柱铁心壳式或两柱铁心窗式; w_1, w_2 和 a_1, a_2 分别为一、二次绕组的匝数和并联支路数。若给定铁心尺寸,可由 n_2 确定 m_2, n_2 由二次线圈厚度 b_2 给出, b_2 根据给定的铁心宽度减去一次线圈厚度及要求的各部件间的绝缘距离来确定。

2.3 线饼间气隙

根据磁场径向分量自线圈中部到两端逐渐增大的特点,在磁场强处气隙取大值,将气隙沿轴向高度取不均匀分布。对上述所取线圈排列方式,由于磁场最大径向分量和轴向分量均出现在二次绕组上,且径向分量约2倍于一次绕组。因此,这里仅考虑改变二次绕组线圈饼间气隙。从理论上讲,饼间气隙安排可取如下方式:①从线圈中部到两端,线饼气隙以某一固定增量逐渐增大;②将线饼沿轴向分段,段间气隙大于饼间气隙,同一段的饼间气隙均匀,且不同段的饼间气隙相等或不等。

在上述方法安排气隙的基础上,又可以让一、二次线圈等高或不等高,一般取二次线圈(低压)高度略高。

3 磁场计算

考虑到结构上的对称性,磁场计算模型可取1/2或1/4区域,且视为轴对称场。与常规变压器相比,超导变压器的源(取电流)所占区域要小得多,所以,至少应以线饼为单位加载。

3.1 铁心结构的影响

表2列出了铁心结构为两柱窗式和单柱壳式且线圈排列方式均为“H-L-H”的有关参数的计算结果。可见,若两者最大径向磁密值接近(方案1和2),则后者铁心重量较前者大得多(约为1.5倍);若两者铁心重量相近(方案1和3),则前者最大磁密的两个分量(径向分量 B_{rm} ; 轴向分量 B_{zm} , 下同)都要小得多。虽然这一结论对应的数据与所取的线圈饼数有关,但从众多方案的计算结果看,却具有普遍性。另外,单柱壳式的铁心高度也较两柱窗式大得多。

3.2 绕组排列方式的比较

表3列出了铁心结构为两柱窗式,绕组排列方式分别为H-L-H和L-H-H时的有关参数的计算结

表2 不同铁心结构比较

方案	铁心结构形式	线饼数		最大磁密/T		百分比漏抗 X/%	铁心重量/kg	铁心外围尺寸/(mm×mm)
		m_1	m_2	B_{rm}	B_{zm}			
1	单柱壳式	96	96	0.037 3	0.037 2	6.87	531	1 963×907
2	两柱窗式	60	60	0.037 6	0.035 3	6.04	378	1 078×752
3	两柱窗式	60	60	0.030 6	0.027 8	4.22	532	1 668×772

表3 两柱铁心不同绕组排列方式比较

方案	线圈排列方式	最大磁密/T		百分比漏抗 X/%
		B_{rm}	B_{zm}	
1	H-L-H	0.038 2	0.038 0	7.25
	L-H-H	0.039 2	0.074 9	17.64
2	H-L-H	0.033 8	0.057 5	8.49
	L-H-H	0.038 0	0.086 0	18.45
3	H-L-H	0.035 0	0.044 8	7.75
	L-H-H	0.041 8	0.066 8	16.87
4	H-L-H	0.031 6	0.043 8	7.28
	L-H-H	0.035 1	0.073 0	17.03

果。从表3可见,H-L-H排列方式下的最大磁密,尤其是其轴向分量较L-H-H排列方式时小。

可见,从减小漏磁场考虑,选取图1所示的变压器结构。

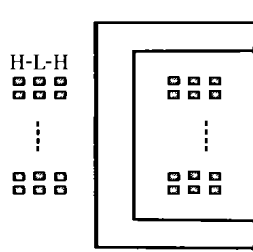


图1 变压器结构

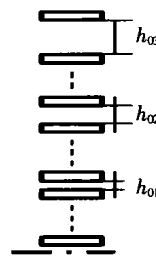


图2 方案6的二次线圈分布

3.3 不均匀气隙的影响

表4为各方案相关信息,表5为一次绕组线饼气隙均匀、二次绕组线饼气隙不同取法时的有关参数的计算结果。

从表5可见:①不论一、二次线圈线饼数是否相等,只要从线圈中部到两端气隙逐渐变大,可减小最

表4 各方案相关信息

方案	相关信息
1~6	一、二次线圈等高。
1,3	二次线圈饼间气隙均匀。
2	二次线圈饼间气隙分布与方案6同。
4	二次线圈饼间气隙以一固定增量自中间向两端逐渐变大。
5	二次线圈分3段,同一段的饼间气隙均匀,不同段的饼间气隙相等,段间气隙大于饼间气隙。
6	二次绕组分5段(3种气隙),同一段的饼间气隙均匀,不同段的饼间气隙不等,见图2。
7	气隙分布与方案6同;二次线圈较一次线圈每端高出25 mm。

表5 不同气隙取法比较

方案	线饼数		最大磁密/T		百分比漏抗 X/%
	m_1	m_2	B_{rm}	B_{zm}	
1	48	48	0.038 2	0.038 0	7.25
2	48	48	0.034 3	0.039 9	7.60
3	48	36	0.039 4	0.041 6	7.14
4	48	36	0.033 8	0.057 5	8.49
5	48	36	0.040 0	0.042 7	7.25
6	48	36	0.034 4	0.045 8	7.75
7	48	36	0.031 6	0.043 8	7.28

大径向磁密；②二次线圈高度大于一次线圈且采用不均匀气隙时，减小最大径向磁密效果最明显；③仅通过减少二次线圈线饼数以增大线饼间气隙（均匀），不仅不能减小最大径向磁密，反而使其增大。④比较方案 2 和 6 发现，尽管后者线饼间气隙较前者为大，但后者的最大径向磁密较大，这说明在气隙分布规律相同的情况下，适当增加二次绕组线饼数，可减弱漏磁场。

图 3 为方案 6 的绕组区域磁场分布。可见磁场最大径向分量和轴向分量均出现在二次绕组上，且最大径向分量位于线圈端部，而最大轴向分量则出

现在线圈中部且位于线圈两侧。图 4 为方案 2 的磁场沿路径的分布，其中：图 4(a)为磁场径向分量和轴向分量沿位于各线圈顶部路径上的分布；图 4(b)为磁场径向分量和轴向分量沿位于二次线圈平均半径处且平行于绕组轴线路径上的分布。图 5 给出了方案 6 的最大磁密随不同线圈高度（或一次线圈饼间气隙）的变化情况。由图 5 知，用增加线圈高度（线饼气隙）来减小磁场的最大径向分量只在一定的线圈高度范围内有效。图 5 中绕组高度为 499.2 mm 的点对应一次绕组线饼气隙为 0 处。

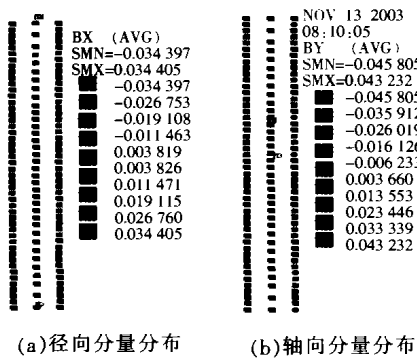
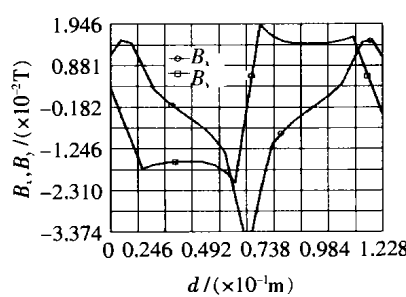
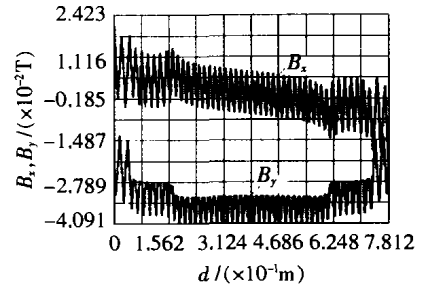


图 3 方案 6 的绕组区域磁场分布
($m_1/m_2=48/36$, 线圈分 5 段, 取 3 种气隙)



(a) 方案 2 沿线圈顶部的磁场分布



(b) 方案 2 沿二次线圈平均半径且平行于绕组轴线处的磁场分布

图 4 方案 2 绕组区域磁场沿路径分布 ($m_1/m_2=48/48$, 线圈分 5 段, 取 3 种气隙)

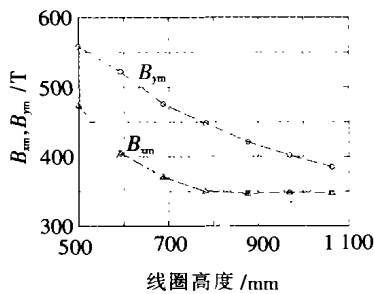


图 5 方案 6 绕组区域最大磁密与线圈高度的关系
($m_1/m_2=48/36$, 线圈分 5 段, 取 3 种气隙)

4 结语

分析了变压器铁心结构、绕组形式、线饼间气隙和线圈高度等对漏磁场的影响。从减小漏磁场径向分量考虑，可得下述结论：①单相超导变压器宜采用两柱窗式铁心且每柱铁心上对称地布置“H-L-H”排列的一、二次线圈的结构形式。②二次绕组的线饼间采用不均匀气隙及（或）一、二次线圈采用不等高度有利于减小漏磁场的径向分量。③在一、二次线圈饼数一定的情况下，增加线圈高度减小磁场径向分量只在一定的线圈高度范围内有效。

还应该指出的是，采用不均匀气隙时，在由线饼构成支路时应予精心安排，以使得并联支路间的环流最小。

参考文献：

- [1] M Polák, P Ušák, J Pitel, et al. Comparison of Solenoidal and Pancake Model Windings for a Superconducting Transformer [J]. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2002, 11(3): 1 478-1 481.
- [2] F Krähenbühl, B Bernstein, M Danikas, et al. Properties of Electrical Insulating Materials at Cryogenic Temperatures: a Literature Review [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1994, 10(4): 10-15.
- [3] E Sissimatos, G Harms, B R Oswald. Optimization of High-temperature Super-conducting Power Transformer [J]. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2001, 11(3): 1574-1577.
- [4] Hee Joon Lee, Gueesoo Cha, Ji-Kwang Lee, et al. Test and Characteristic Analysis of an HTS Power Transformer [J]. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2001, 11(3): 1486-1489.
- [5] Matitham K Al-Mosawi, Carlo Beduz, Yang Yifeng, et al. The Effect of Flux Diverters on AC Losses of a 10 kVA High Temperature Superconducting Demonstrator Transformer [J]. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2001, 11(3): 2800-2803.
- [6] Masataka Iwakuma, Kazuo Funaki, Kazuhiro Kajikawa, et al. AC Loss Properties of 1 MVA Single-phase HTS Power Transformer [J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2001 11(3): 1 482-1 485.

作者简介: 李晓松 (1960-), 男, 在读博士, 副教授, 从事电机绕组、超导变压器研究。