

大型电机磁极线圈匝间绝缘中 频试验技术研究

魏新劳, 薛庆会, 王永红, 陈庆国

(哈尔滨理工大学 电气与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要:从分析现有磁极线圈匝间绝缘试验技术的不足出发,通过分布参数等效电路研究了磁极线圈匝间电压的频率分布,再通过对典型磁极线圈的具体仿真分析确定了合适的试验电源上限频率.提出了利用高压大功率电力电子开关技术和并联谐振电路技术开发大型电机磁极线圈匝间绝缘试验,采用中频高压电源的技术方案,并结合典型的磁极线圈具体参数对技术方案中的关键技术环节进行了仿真分析.结果表明,技术方案是可行的.利用这种电源进行磁极线圈匝间绝缘试验可以克服现有磁极线圈匝间绝缘试验技术存在的不足.

关键词:匝间绝缘试验;中频高压电源;磁极线圈;大型电机

中图分类号: TM832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2683(2009)02-0050-05

Research on Middle Frequency Voltage Test Technique Used in Turn-to-turn Insulation Test for Pole Coils of Large Electrical Machines

WEI Xin-lao, XUE Qing-hui, WANG Yong-hong, CHEN Qing-guo

(School of Electric and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China)

Abstract: Beginning an analysis of the shortcomings of present methods used to test turn-to-turn insulation of pole coil of large electrical machines, the frequency distribution of the turn-to-turn voltage in pole coil is researched at the first by a distribution circuit model of the pole coil. Appropriate high limit of frequency of the testing voltage source is determined by a circuit simulation analysis made for a typical pole coil. Combining of high power electronic switching technique and parallel resonance skill of the test circuit, the paper presents a technique scheme of middle frequency high-voltage source used for large electrical machine's pole coil turn-to-turn insulation test. The key segment of this scheme is simulated by means of a typical pole coil. The simulation results show that the technique scheme of pole coil's turn-to-turn insulation test voltage source is feasible. It is possible to overcome the shortcomings of the present pole coil's turn-to-turn insulation test methods if the new technique scheme of pole coil's turn-to-turn insulation test voltage source is adopted in the future.

Key words: turn-to-turn Insulation test; middle frequency high voltage source; pole coils; large electrical machines

收稿日期: 2009-02-06

基金项目: 国家自然科学基金 (50677012)

作者简介: 魏新劳 (1960—), 男, 教授, 博士生导师.

1 引言

大型发电机的磁极线圈匝间绝缘是发电机绝缘的重要组成部分,其绝缘质量对发电机的安全运行有着重大的影响^[1]。然而,一般说来磁极线圈的匝间绝缘强度又相对较弱,因此在电机绝缘故障中,磁极线圈匝间绝缘故障所占比重较大,严重威胁电机的安全运行。为了在生产过程中及时发现磁极线圈匝间绝缘的缺陷,一般要在垫匝间绝缘之后及热压成型之前各施加电压一次进行匝间绝缘试验,固化成型后再进行一次试验,以保证产品的质量^[2]。在磁极线圈套装在磁极上以后,为了检验套装过程是否对磁极线圈的匝间绝缘造成损伤,也需要进行相应的试验。

由于磁极线圈的匝数很少,这使得磁极线圈的电感量很小(一般在 $0.4\sim 20\text{ mH}$ 之间),同时,为了减少磁极线圈工作时的损耗,线圈的导线截面积相对较大,线圈的直流电阻也很小。因此,采用普通的直流或工频电压对磁极线圈的匝间绝缘进行试验,为了在匝间绝缘上获得足够高的电压,势必需要电源提供很大的电流,这将大大增加对试验电源容量的要求。

现在普遍采用的方法是冲击电压法^[3,4],基本做法是:在规定的直流电压下给一个脉冲电容器充电,充电过程结束以后,利用高压放电开关让充满电的电容器向被试验的磁极线圈放电,从而在由脉冲电容器、放电开关和被试验磁极线圈所构成的回路中形成衰减振荡的脉冲电流,在被试验磁极线圈上形成衰减振荡脉冲电压,利用这个脉冲电压来检验磁极线圈匝间绝缘的完好与否。该方法的优点是可以在比较容易地在被试线圈的匝间获得足够高的试验电压,缺点是在被试线圈各个匝上试验电压的分布不均匀,特别是当磁极线圈被套装在磁极上以后,由于线圈对地杂散电容比较大,这种情况尤为明显,这将导致无法对被试线圈各个匝间的绝缘进行正确的试验。容易出现以下两种错误:一是由于实验室电压没有真正地施加在存在绝缘缺陷的线匝上,从而导致存在绝缘缺陷的线圈通过了试验;二是由于在试验时在本来不存在绝缘缺陷的线匝上施加了过高的电压而使本来完好的匝间绝缘被击穿,导致本来应该顺利通过试验的线圈成为不合格品。

在一些有条件的制造厂,采用中频发电机组来进行磁极线圈的匝间绝缘试验^[5]。由于中频发电机组的输出电压频率在数 kHz ,因此,磁极线圈的电抗

比工频下的电抗大数十倍,这就大大降低了试验电源的容量,使试验能够比较容易地得以实施。由于中频发电机组存在着造价高、占地面积大的缺点,不是所有的电机制造企业都能拥有这样的设备;同时,因为这种设备不可移动、工作噪音大、输出电压低,有时不能满足试验要求。

综上所述,目前所使用的两种磁极线圈匝间绝缘试验办法,都存在着比较大的弊病。因此,研究新的试验方法和试验设备就显得非常必要。本文就是根据大型电机磁极线圈匝间绝缘试验技术的这种现状,结合电力电子技术等其他技术领域的发展,研究一种新型的大型电机磁极线圈匝间绝缘试验技术和设备,并要求这种试验技术和设备能够有效地克服现有的两种试验技术所存在的缺点。

由于电力电子技术的飞速发展,特别是以 IGBT 为代表的高压大功率开关器件技术的快速发展,使得利用电力电子技术来实现大功率高频高压电源成为可能。因此,本文作者开展了这个方面的研究工作。

2 磁极线圈等效电路及仿真分析

2.1 磁极线圈上获得高电压的方法

对于一个电感线圈来讲,线圈上的电压与流过线圈的电流成正比,与电感线圈的阻抗成正比。所以,要想获得需要的试验电压,就得从两个途径考虑。

1)是通过加大流过电感线圈的电流来获得足够的电压,这样做有两个问题:①要求试验电源有足够的功率,这在有些情况下很难做到;②如果流过线圈的电流太大,会因为发热太严重而损害线圈。所以,一般都不会采取这种途径解决施加电压不足的问题。

2)通过加大电感线圈的阻抗来获得足够的电压。因为电感线圈的阻抗等于线圈的电感量与所施加交流电压的角频率的乘积,而电感线圈的电感量是事先根据使用要求确定的不可能变动的,所以,只有通过提高所施加的试验电压的频率来解决问题。这就是过去使用中频发电机组的原因,也是本文研制基于电力电子技术的高频高压电源,用来对大型发电机磁极线圈匝间绝缘进行试验的基本技术出发点。实际上这也是现在采用冲击电压对磁极线圈进行匝间绝缘试验的原因所在。

假设被试线圈的试验电压为 U_0 ,电感量为 L_0 ,

电源频率为 f_0 , 则试验电源的容量 S_0 必须满足

$$S_0 = \frac{U_0^2}{2\pi f_0 L_0} \tag{1}$$

由此可见, 在试验电压不变的前提下, 试验电源的频率越高, 试验电源的试验容量就越小. 但是, 频率也不是越高越好, 如果频率过高, 会导致磁极线圈匝间电压分布不均匀, 不能准确地检测磁极线圈匝间绝缘. 所以确定一个合适的上限频率 $f_{0\max}$ 是该方法的关键所在.

2.2 磁极线圈等效电路及电路参数估算

由于大型电机磁极线圈的尺寸都很大 (具体的实物测试结果可以参见表 1), 与一般电路中的电感线圈不同, 在对其进行分析时必须考虑到尺寸的影响^[6]. 当然, 在进行电路分析时用什么电路元件来表示磁极线圈与电路分析的类型有密切关系. 如果进行直流稳态分析, 则可以将磁极线圈看成是一个集中电阻; 如果是进行频率不高 (例如工频) 的交流稳态分析, 则可以把磁极线圈看成是一个集中电感或者集中电感与集中电阻的串联; 但是, 如果要进行暂态分析, 或者要进行比较高频率的交流稳态分析, 则不能把磁极线圈按照集中参数来对待, 原因是此时线圈的杂散电容的作用不能被忽略不计.

表 1 大型电机典型磁极线圈参数测试结果

序号	外形尺寸 /mm			匝数	电感 /mH
	长	宽	高		
1	2 312	587	220	21	0.5
2	2 312	587	220	63	4.5

原则上讲, 在进行暂态分析或高频交流分析时, 除了要考虑磁极线圈对地分布电容、匝间分布电容外, 还应该考虑匝间的互感. 但是考虑到匝间互感相对于各匝的自感而言是很小的, 而且其对线圈匝间电压分布的均匀性影响并不大, 因此, 为了简化电路分析, 同时又不会对分析结果产生较大影响, 在分析时可以不考虑匝间互感的作用.

在高频情况下, 不考虑磁极线圈各部分之间的互感, 如果把磁极线圈首末端之间等分成 n 段, 则可以得到磁极线圈的等效电路, 如图 1 所示^[6]. 图 1 中: L_{si} 代表的是第 i 段的电感; C_{si} 代表的是第 i 段线圈匝之间的纵向分布电容; R_{si} 代表的是第 i 段的电阻; C_{pi} 代表的是第 i 段的对地分布电容. 在进行分析时, 可以假定线圈的电阻、电感、纵向电容和对地电容都是均匀分布的.

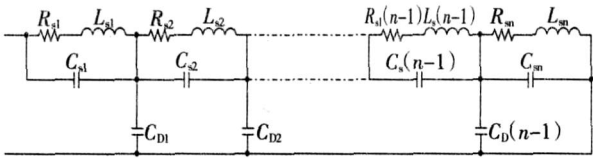


图 1 磁极线圈等效电路

要想确定最高频率 $f_{0\max}$, 必须首先根据实验测得的数据估算出图 1 所示的等效电路磁极线圈的电阻、电感、纵向电容、对地电容等参数, 然后用 Pspice 软件进行仿真分析. 表 2 给出了典型磁极线圈绝缘尺寸及材料, 这些数据与电路参数的估算密切相关.

表 2 典型磁极线圈绝缘尺寸及材料

序号	铜排尺寸 /mm		匝间绝缘厚度 /mm	主绝缘厚度 /mm	绝缘材料
	宽	厚			
1	100	9.5	0.5	1	Nomex 纸
2	100	3.0	0.5	1	Nomex 纸

磁极线圈电阻的计算. 磁极线圈的总电阻 R 可根据式 (2) 估算:

$$R = \frac{2N\rho_0(A+B)}{CD} \tag{2}$$

其中: ρ_0 为铜的电阻率, 20℃ 时为 $1.7376 \times 10^{-8} \Omega/\text{m}$; A 为线圈成型后的平均宽度 (m); B 为线圈成型后的平均长度 (m); N 为线圈的总匝数; C 为线圈导线 (铜排) 的宽度 (m); D 为线圈导线 (铜排) 的厚度 (m).

经计算可得: 1# 线圈的电阻 R_1 为 $2.227 \text{ m}\Omega$, 2# 线圈的电阻 R_2 为 $21.157 \text{ m}\Omega$.

分布电容的计算. 分布电容的计算包括两部分: 一是线圈匝间电容的计算; 二是线圈对地的电容计算. 电容的计算可根据平板电容器公式进行.

线圈匝间电容可以用式 (3) 估算, 即

$$C_{s0} = \frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0(A+B)C}{D_1} \tag{3}$$

线圈总的对地电容可以用式 (4) 估算, 即

$$C_p = \frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0(A+B)H}{D_2} \tag{4}$$

其中: ε_0 为真空介电常数, 值为 $8.85418782 \times 10^{-12} \text{ F/m}$; ε_r 为 Nomax 纸的相对介电常数, 大小为 $1.5 \sim 2.5$, 本文取平均值 2; H 为线圈成型后的高度 (m); D_1 为线圈的匝间绝缘厚度 (m); D_2 为线圈的对地绝缘厚度 (m).

经计算得: 1# 线圈的匝间电容为 $41\,068.4 \text{ pF}$, 总对地电容为 $22\,567.1 \text{ pF}$; 2# 线圈的匝间电容为

41 068.4 pF,总对地电容为 22 567.1 pF.

2.3 磁极线圈的仿真分析与 $f_{0\max}$ 的选取

为了选取合理的最高频率,需要对磁极线圈等效电路进行频率响应分析^[7].

把整个线圈等分成 7 等份,根据上面计算所得到的磁极线圈的电路参数,得到对线圈 1 进行频率响应特性分析的等效电路,如图 2 所示.

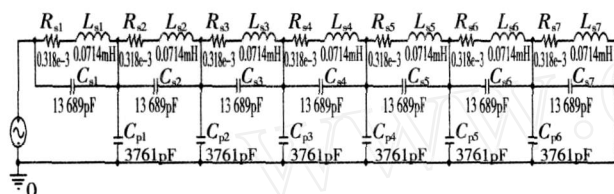


图 2 磁极线圈的 Pspice 仿真电路图

假定线圈的电阻、电感均匀分布,则每段电阻为 $2.227/7 = 0.318 \text{ m}\Omega$ 、电感数值为 $0.5/7 = 0.0714 \text{ mH}$;假定线圈的匝间电容、对地电容也均匀分布,则每段的纵向电容为 $41\ 068.4/3 = 13\ 689 \text{ pF}$,对地电容为 $22\ 567.1/6 = 3\ 761 \text{ pF}$.

仿真结果如图 3 所示,图中的 $U_i(f)$ 是从磁极线圈首端算起的第 i 个分段上的电压.

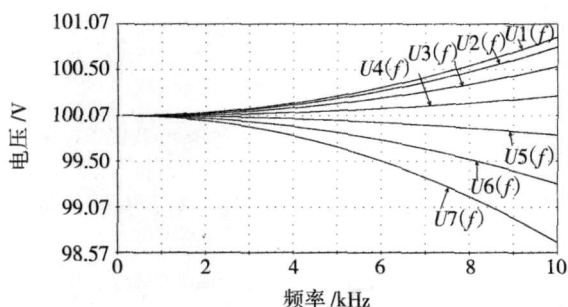


图 3 1# 线圈的幅频特性曲线

理想情况下,各段上的电压都应该是 100 V,由仿真结果可见,因为分布电容的存在,各段上的电压均偏离了其理想值.随着频率的增高,首端几段上的电压在逐步增加,而末端几段上的电压则是逐步减少.这与理论分析结果是完全一致的.

对于最高频率 $f_{0\max}$,就需要对允许的电压分布不均匀性给出限制.如果要求电压分布不均匀性小于 $\pm 1\%$ 的话,由仿真结果可见,最高频率 $f_{0\max}$ 不能超过 8.5 kHz.

对 2# 线圈仿真的电路与 1# 线圈相同,不同的是每段的参数值不同而已.假定线圈的电阻、电感均匀分布,则每段电阻为 $21.157/7 = 3.022 \text{ m}\Omega$;电感数值为 $4.5/7 = 0.623 \text{ mH}$;假定线圈的匝间电容、对地

电容也均匀分布,则每段的纵向电容为 $41\ 068.4/9 = 4\ 563.16 \text{ pF}$,对地电容为 $22\ 567.1/6 = 3\ 761 \text{ pF}$.

仿真结果如图 4 所示.由图可见,如果要求电压分布不均匀性小于 $\pm 1\%$ 的话,由仿真结果可见,最高频率 $f_{0\max}$ 不能超过 3.0 kHz.

根据以上仿真结果可知,利用提高频率在小电感量磁极线圈上建立高电压的办法,其上限频率大约在数 kHz,如果频率再高,将会使磁极线圈的匝间电压分布不均匀,影响对匝间绝缘的试验结果.

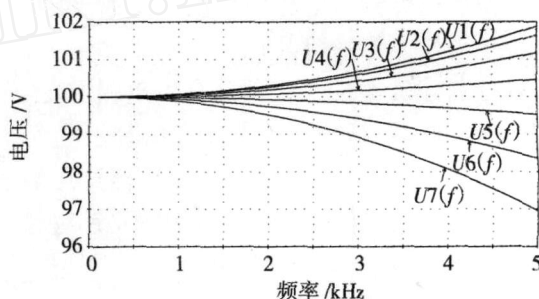


图 4 2# 线圈的幅频特性曲线

3 磁极线圈匝间绝缘试验电源技术方案及仿真

3.1 技术方案

根据以上仿真分析结果,结合大功率开关电力电子的技术进展^[8],本文提出的可以用于大型电机磁极线圈匝间绝缘试验的高压大功率电源的技术方案如图 5 所示.

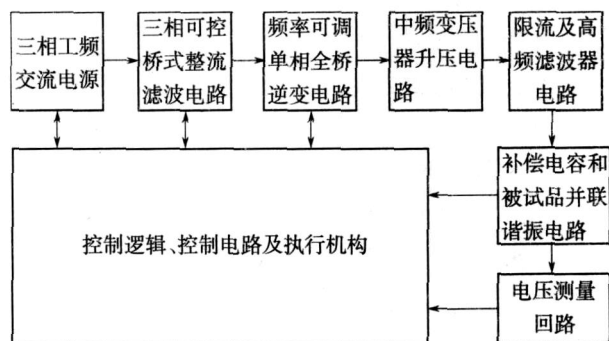


图 5 磁极线圈匝间绝缘试验电源技术方案

在图 5 的技术方案中,中频升压变压器是可以根据磁极线圈试验电压的高低而选配的环节.整个电源的工作原理是:三相工频交流电源电压经三相可控桥式整流电路整流和滤波电路后形成幅值稳定的直流电压,此直流电压经单相全桥逆变电路变换成交流方波电压,此方波交流电压经中频变压器升压后成为高压方波交流电压,在经高频滤波电路和

由补偿电容器与被试验磁极线圈所组成的并联谐振电路的共同作用^[9],最后在被试验磁极线圈和补偿电容器上形成中频交流正弦波电压.在这个技术方案中,要求全桥逆变电路输出的方波电压的频率等于由补偿电容器与被试验磁极线圈所组成的并联谐振电路的谐振频率.这样做的好处有两个:一是能够在被试验磁极线圈上获得波形畸变尽可能小的正弦波电压;二是可以大大减少试验对整个电源的容量要求.采用三相工频电源作为初级电源,一是可以减少整流滤波电路输出电压的纹波电压;二是可以保证初级电源的三相平衡.

这个技术方案的关键部分是由单相逆变电路、中频升压变压器、高频滤波电路和由补偿电容器与被试验磁极线圈所组成的并联谐振电路这几部分所组成部分.因此,以下的仿真分析中主要针对这一部分进行.

3.2 技术方案的仿真分析

为了进一步验证这种技术方案的可行性,利用电路仿真软件对方案进行了仿真分析.仿真分析用电路如图 6 所示.图中的谐振电路参数是针对本文前述的第 2 号磁极线圈而选择的.图 7 是升压过程的仿真结果,可以看出,在电源电压从零点逐渐升高并达到稳定值的过程中,磁极线圈上可以获得几乎是同步变化的试验电压.

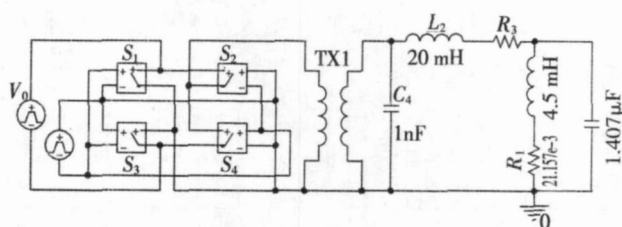


图 6 技术方案关键环节的仿真电路

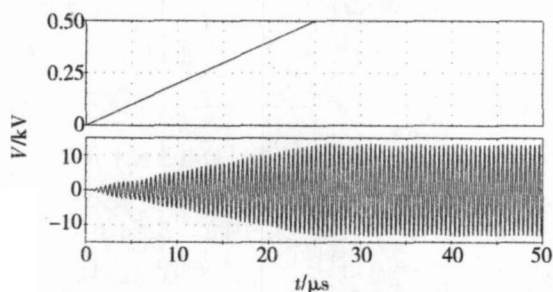


图 7 电源电压升压过程中的磁极线圈电压

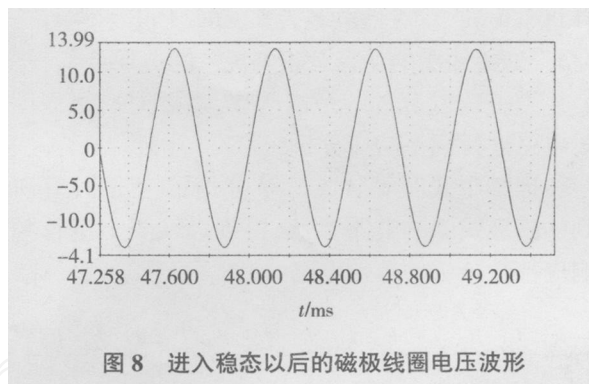


图 8 进入稳态以后的磁极线圈电压波形

4 结 论

可以利用提高电源频率的方法进行大型电机磁极线圈匝间绝缘试验,但是电源的最高频率应该控制在数千赫兹的范围内,否则会引起匝间电压分布不均匀.利用高压大功率电力电子开关技术,结合并联谐振电路技术,开发大型电机磁极线圈匝间绝缘试验用中频交流电源是完全可行的,利用这种电源进行磁极线圈匝间绝缘试验,可以克服现有磁极线圈匝间绝缘试验方法所存在的缺点与不足.

参 考 文 献:

- [1] 巢福坤. 交流高压电机新型匝间绝缘试验器 [J]. 电气应用, 1983 (1): 22 - 25.
- [2] 张 项,李向伟. 水轮发电机磁极线圈匝间绝缘的检测 [J]. 电工技术杂志, 1998 (3): 43 - 45.
- [3] 王永红,陈庆国,陆更伟,等. 电机磁极线圈匝间绝缘试验设备研制 [J]. 防爆电机, 2005 (5): 30 - 33.
- [4] 高修荣,王向荣. 发电机转子磁极线圈匝间短路原因分析及处理 [J]. 云南水力发电, 2006 (5): 95 - 96.
- [5] 赵金海,王云山. 水轮发电机磁极线圈高压匝间试验装置的研制 [J]. 大电机技术, 1990 (4): 20 - 23.
- [6] 张嘉祥. 变压器线圈波过程 [M]. 北京:水利电力出版社, 1982.
- [7] 李永平,董 欣,刘 . PSpice 电路设计与实现 [M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [8] 刘志刚,叶 斌,梁 晖. 电力电子学 [M]. 北京:清华大学出版社,北京交通大学出版社, 2004.
- [9] 邱关源. 电路 [M]. 北京:高等教育出版社, 1999.

(编辑:王 萍)