

南水北调大型水泵主电机噪声研究分析

宋 强¹ 甘 凯² 程全福³

南水北调东线山东干线有限责任公司 山东 济南 250100

摘 要：南水北调台儿庄泵站主泵房内安装有5台2950ZL31-5型立式轴流泵，配以5台额定功率为2400kW的同步电动机。总装机容量为12000kW。自安装并投入运行以来，这些主机组的噪声水平均超过了预期标准。经过现场测量，运行时台儿庄泵站电机层的噪声为90-95dB（A），联轴层的噪声为100-103dB（A）。

本文首先通过测定现场的噪声频谱、电流谐波、以及振动的频谱和振型等手段，确定了噪声超标的主要原因。随后，通过理论分析，深入探讨了噪声超标的根源。为了验证这些理论分析的结果，建立了有限元模型并进行仿真。本文的主要目标是为同类型轴流泵电机的噪声研究和技术分析提供具有指导意义的参考。通过分析和研究，希望能为解决此类问题提供有益的借鉴和参考。

关键词：南水北调；泵站；主电机；电磁噪声；研究分析

引言

根据《泵站设计规范》（GB 50265-2010）6.1.23^[1]规定：主泵房电机层值班地点允许噪声标准不得大于85dB（A），噪声超标影响职工的职业健康，且电磁噪声是判断主机组运行工况是否正常的主要参考依据。电机立式安装，露出地面基准的为上机架，其余均位于基准面之下，电机悬式结构，采用滑动推力轴承及导轴承结构，防护等级为IP23，径向通风结构，通过引风机将热风送至户外。

现场共5台电机，所有机组均存在噪声偏大的情况，

且5台电机特性一致，由于联轴器比较难于拆除，取消空载试验，对4#电机在900kW、1300kW工况进行了电磁及振动测试，查阅了电机随机资料，并根据实际情况综合所有数据，进行了有限元分析计算，明确噪声偏大的原因，并给出了改进方案。

1 噪声频谱测试

根据《旋转电机噪声测定方法及限值》（GB10069.1）^[2]标准对4#进行相关试验。试验过程中泵站的其余4台电机（1#、2#、3#和5#）处于停机状态。

表1 4#电机测点噪音FFT及试验结果数据表

功率P	测点位置		FFT分析结果		噪音计测量结果	
	测点号	方位	声压值Pa	电机顶层合成dB	电机顶层dB	水轮机转轴层dB
900kW	1#	进水侧	0.66841	90.5	86.3	96.6
	3#	出水侧	0.62517	89.9	86.1	88.8
	2#	进水左侧	0.62774	89.9	90.7	92.3
	4#	进水右侧	0.66872	90.5	86.6	97.3
1300kW	1#	进水侧	0.7862	91.9	95.2	93.4
	3#	出水侧	0.30775	83.7	88.5	93.1
	2#	进水左侧	0.78814	91.9	88.5	92.3
	4#	进水右侧	0.45936	87.2	88.2	96.6
背景噪音	1#	进水侧	-	-	46.7	-

2 定子电流测试（FFT）

表2 4#电机各工况定子电流FFT数据结果对比表

相电流	Hz	电流 A		相位	
		900kW	1300kW	900kW	1300kW
Ia	0	0.1	0.1	180	0
	50	77	115.8	90.5	91.4

续表:

相电流	H_z	电流 A		相位	
		900kW	1300kW	900kW	1300kW
Ia	250	2.2	2.1	324.8	-33.8
	350	0.6	0.7	49.7	74.6
	550	0.8	1.3	224.7	-104.4
	650	1.7	0.2	134.9	182.2
Ib	0	0.1	0.3	180	0
	50	75.3	111.6	208.9	-149.1
	250	2.3	2.1	205.1	-512.5
	350	0.6	0.6	171.4	-521.6
	550	0.8	1.5	97.4	-590.4
	650	1.8	0.4	252.5	-748.4
Ic	0	0.1	0.1	0	0
	50	75.1	111.2	-30.1	-29.7
	250	2.2	2	82	84.3
	350	0.6	0.7	291.5	317.5
	550	0.7	1.3	339.3	368.1
	650	1.8	0.3	373.6	99.2

3 振动模态测试

3.1 测点布置

振动测试在铁心+X和+Y处各布置一个水平加速度传感器。在机架处布置一对水平/垂直加速度传感器,噪声探头安装在出线口上方。铁心固有频率测试试验,沿铁心中部外表面外圈均匀布置32个测点。

3.2 试验结果

对4#机组在分别在900KW和1300KW负载时电动机的振动进行了测试,经现场测试,台儿庄泵站电动机在带载运行时,机架和铁心振动均较小,且主频都在600Hz附近;噪声主频也在600Hz附近。

3.3 结论

1) 从测试数据知,该电机噪声水平超出GB10069中规定的85dB(A)限值要求,且噪声主要分布在600Hz,处于人耳感应比较敏感的频段范围内;

2) 从实测全频段噪声FFT频谱可以得出,噪音频谱中最大的成份为600Hz分量,这是整个泵站厂房里主要噪音源。切断水泵电动机电源后,该噪音立刻消失,就只

作者简介: 宋强(1986—),男,工程师,主要从事水利工程管理、大型泵站日常管理及技术改造等工作。E-mail: 617767585@qq.com。

甘凯(1986—),男,主要从事大型泵站调度运行管理等工作。

程全福(1988—),男,工程师,主要从事大型泵站调度运行值班、维修保养等工作。

有风机的风噪声,表明这是电磁噪声;

3) 定子电流存在11、13次谐波,会出现定子电流频率的倍的电磁噪声,即600Hz电磁噪声,进一步验证了噪声主要是600Hz的原因;

4) 定子铁心振动及上机架振动没有超过GB10068中规定的振速小于2.3mm/s的限值,但主要的振动分量仍为600Hz;

5) 该电动机定子铁心及机架振动满足国家相关标准;该激励与定子铁心模态不同,未形成共振,没有进一步放大电磁噪声。

4 噪声原因分析

4.1 电磁力波阶次理论^[3]分析

根据麦克斯韦方程^[4],在电机气隙中单位面积上的径向电磁力可表示为:

$$p_r = \frac{b^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (N/m^2)$$

式中 $b^2(\theta, t)$,为气隙磁密,是随空间角度和时间变化的二维变量,气隙磁密的分布由磁势和磁导决定。

在同步电机中,存在着定子和转子绕组磁势的基波和高次谐波,同时存在气隙磁导谐波,它们相互作用后,会在气隙产生一系列组合的电磁力波,这些力波有着不同的幅值、转速、转向、节点数。

定转子合成磁场的基波产生节点数为 $2p$ 的力波,频率为两倍电网频率 $2f_N$,振动幅值与气隙磁密的平方成正比,这是电机中最强的电磁力波,但由于节点数较

多,实际上由它引起的振动故障较少。

定子谐波磁场 B_v 和转子谐波磁场 B_μ 相互作用,会产生 $\mu \pm v$ 次的力波,频率为两者频率的和或差,如果 μ 和 v 比较接近,会产生阶次很低的电磁力波,即使对应的电磁力较小,也有可能引起电机的强烈振动,这往往是电机产生电磁振动及噪声问题的主要原因。理论分析结果表明,600Hz电磁力波存在着0节点与6节点分量,这是较易产生电磁振动及噪声的力波分量。其中,6节点分量是定子一阶齿谐波分量与转子高次谐波作用产生,预计其幅值可能较大;0节点分量是定子高次谐波与转子高次谐波作用产生的,预计幅值较小。以上,从理论上分析了可能的原因,接下来通过电磁场有限元的建模仿真,定量地分析引起600Hz电磁力波的表现和根源。

4.2 电磁有限元仿真^[5]

基于麦克斯韦电磁场方程和有限单元法,采用AltairFLUX的场路耦合时步有限元法完成电磁力波仿真。

台儿庄泵用电机为44极,270槽, $q = 2 + 1/22$,根据对称性,可建立含22个磁极的单元电机。设置电机转子旋转运动,转速为136.4rpm,定子静止,重点关注600Hz的电磁力波情况。经多次迭代,计算达到额定工况,电流有效值160A,功率因数0.9。气隙磁场中丰富的谐波,会相互作用产生一系列电磁力波。对气隙中的电磁力波进行时、空二维谐波分析,可得到其频率和节点对数。600Hz电磁力波主要节点对数为6,这正是分数槽设计而引入的电磁力波成份,有限元仿真结果与理论分析结果吻合。

5 噪声处理及改进分析

5.1 改进方案的基本原则

- 1) 只改定子,转子不变;
- 2) 定子冲片的内、外径,铁心长与原电机保持一致,电机安装尺寸不变;
- 3) 主要指标保持一致或优于原电机。

5.2 适用范围和目的

台儿庄泵站电动机在运行中存在以600Hz为主的电磁噪声,产生的主要原因是定子槽数决定的。要解决这个问题,只能通过重新选择槽数,改变电机的电磁力波分布特性。首先对可能的槽数选择进行了理论分析,并针对优选的330槽方案进行了建模仿真分析。

5.3 槽数优选情况

原设计是270槽,另外选择了多个槽数,分别推算了可能出现的一阶齿谐波电磁力波及次谐波振动的最小节点对数,并根据两种激励的情况,进行了危险程度的初步评估。分析结果表明,选用不同的槽数,节点对数各有不同,节点对数最大的是选用330槽,此时一阶齿谐波

所引起的最严重力波节点对数达22,相对于之前的6对节点,有了很大的提高,可以很好地降低电磁噪声。另外,选用330槽时 $q = 2.5$,不存在次谐波振动问题,兼具整数槽与分数槽的优点。

基于麦克斯韦电磁场方程和有限单元法,采用AltairFLUX的场路耦合时步有限元法完成电磁力波仿真。330槽设计方案时, $q = 2.5$,根据对称性,可建立含2个磁极的单元电机。设置电机转子旋转运动,转速为136.4rpm,定子静止。

1) 通过以上初步分析,定子槽数初选330槽,此时 $q = 2.5$,不存在次谐波振动问题,兼具整数槽与分数槽的优点,成熟可靠;

2) 若采用330槽的方案,可以将原来的力波节点对数从6提高到22,降低电磁噪声的幅值;

3) 电磁场仿真表明,若采用330槽的方案,能直接消除掉大量的低阶电磁力波,提升静音表现,能够解决噪声偏大的问题;

4) 优化后的方案在效率、启动电流倍数、最大转矩及牵入转矩方面相比原电机方案更具优势,运行状况更好。

6 结论

1) 台儿庄泵站主电机采用 $q = 2 + 1/22$ 的分数槽设计,能有效地削弱定子绕组的齿谐波电势,在气隙仅为3.5mm的情况下,改善了电压波形,同时使定子电流保持了较好的正弦性;

2) 台儿庄泵用电动机定子槽数为270槽,存在大量低节点对数的电磁力波。其中幅值较大的一阶齿谐波磁场和转子高次谐波磁场相互作用后,会产生600Hz的6对节点的电磁力波,幅值达到约2500N/m²,是造成其电磁噪声的主要原因;

3) 台儿庄泵用电动机电磁方案的槽数选择,产生了低节点的高幅值电磁力波激励,该类低节点对数的电磁力波激励比较容易诱发电磁振动与噪声问题。建议严格控制低节点对数力波的激励源,提高机组静音水平。

参考文献

- [1]《泵站设计规范》(GB 50265-2010) 6.1.23.
- [2]《旋转电机噪声测定方法及限值》(GB10069.1) 第一部分.
- [3]肖阳,宋金元,屈仁浩,等变频谐波对电机振动噪声特性的影响规律[J].电工技术学报.2021,(12).
- [4]孟祥国,张宝锋,崔风华,等.由麦克斯韦方程组推导出毕奥-萨伐尔定律的几种方法[J].聊城大学学报(自然科学版).
- [5]唐任远,宋志环,于慎波,等.变频器供电对永磁电机振动噪声源的影响研究[J].电机与控制学报.2010,(3).