核电站照明灯具的电磁辐射骚扰特性研究

目前岭澳一期核电站主控室采用的电感灯将逐步被LED灯替代，但LED灯配置的开关电源产生的辐射骚扰可能影响其他核电设备的正常工作，并带来电磁兼容性问题。首先根据文献调研情况提出了主控室内设备设施的辐射抗扰度水平，然后从试验和现场实测两个角度对三星、湖南麓山和Spark三种品牌的LED灯和电感灯的电磁辐射骚扰特性进行分析。结果表明：从辐射骚扰水平大小来看，考虑最严重条件下，主控室分别更换为三种LED灯后，产生的电场辐射骚扰水平和低频磁场辐射骚扰水平均远小于前述提出的核电设备辐射抗扰度水平，因此三种LED灯具均可替换目前主控室照明的电感灯。

谢辉春　闵　绚/中国电力科学研究院

谢辉春/高级工程师

关键词/Keywords
核电站·
电感灯·
LED灯·
辐射抗扰度·
辐射骚扰·

0　引言

核电站主控室布置有大量的仪表和二次控制设备，是核电站运行的关键场所，因此需要对其电磁环境进行严格控制，以满足设备电磁兼容性要求，保证正常运行。目前岭澳一期核电站主控室采用电感式镇流器荧光灯（简称“电感灯”）作为室内照明，根据计划将逐步淘汰目前的电感灯，采用LED日光灯。但是，LED灯配置的驱动电源装置的主流模式为：前级采用普通脉冲宽度调制的开关电源作为低压直流电源，开关频率通常为几十千赫兹；后级再以斩波方式进行低频脉冲宽度调制，用调节占空比的方式来调节灯具的亮度，开关频率通常为数百赫兹到几十千赫兹。在脉冲宽度调制的工作方式中，电源装置对电流的斩波会产生高次谐波，其产生的电磁辐射骚扰可能影响其他设备的正常工作，因此有必要对LED灯产生的辐射骚扰进行评估。目前，有关照明类产品所产生的电磁辐射骚扰研究主要集中在家用照明、普通工业照明等，有关LED灯具给核电设备带来的辐射骚扰问题的研究还较少[1-5]。

本文从试验和实测两个角度对三星、湖南麓山和Spark三种品牌的LED灯及核电站正在使用的电感灯的电磁辐射骚扰特性进行了分析，给出了这两类灯具所产生的空间电磁辐射骚扰的对比情况。

1　限值要求

根据我国标准GB 17743—2007《电气照明和类似设备的无线电骚扰特性的限值和测量方法》，电磁辐射骚扰分为9 kHz～30 MHz和30～300 MHz两个频段进行，且对不同频段的辐射骚扰限值均进行了明确规定[6]。但是由于核电设备的重要性，使得其不能直接引用普通电气设备的照明标准，所以调研了国内外的相关资料。目前，在核电厂电气设备/系统的电磁兼容问题研究中，美国走在了世界的前列。经过对典型核电厂在各种工况下的现场测量，美国制定了自己的电磁兼容标准。根据标准IEC 61000－4－9、IEC 61000－4－10和IEC 61000－4－3中的规定，在辐射抗扰度限值方面，磁场辐射抗扰度水平在9～50 kHz为300 A/m，100 kHz～1 MHz为30 A/m；电场辐射抗扰度水平在26 MHz～1 GHz为10 V/m[7-13]。法国核岛电气设备设计和建造规则（RCCE）和德国KTA 3503 5.4“电磁兼容（EMC）试验”标准中，由于未给出详细的试验方法和验收准则，使得

其可操作性不强[14]。

国标GB/T 11684—2003《核仪器电磁环境条件与试验方法》是根据国际电工委员会（IEC）后来未通过表决的标准版本45A/429/CDV《IEC 61503 Ed.11》制定的[15]。该标准规定了核电仪器抗电磁干扰的电磁环境条件分类、要求和试验方法，并在该标准的附录C（规范性附录）给出了核反应堆仪器抗扰度试验项目及其要求与试验方法，较法国、德国的标准详细。“辐射型抗扰度试验”方法采用了国标GB/T 17626.3—1998（等同IEC 61000－4－3：1995），频率扩展至20 MHz，即试验水平在20 MHz～1 GHz为10 V/m；“电缆充电脉冲抗扰度试验”与“传导型抗扰度试验”采用该标准独有的试验方法，无相关的工业基础标准支持，也就找不到相应的标准试验设备，这导致试验无法操作。

综上所述，核电站照明设备辐射电磁骚扰限值可考虑9 kHz～300 MHz频段范围，推荐在20～300 MHz频段内，核电设备电场辐射抗扰度水平为10 V/m；磁场辐射抗扰度水平在9～50 kHz频段为300 A/m，100 kHz～1 MHz频段为30 A/m。

2 电磁辐射骚扰试验

2.1 电场辐射骚扰试验

本试验在3 m法半电波暗室进行，委托方提供了拟更换的三种不同品牌的LED灯，数量均为3支，分别为三星LED灯、湖南麓山LED灯和Spark LED灯；计划淘汰的电感灯1支。

测量设备主要为电磁干扰接收机和接收天线。电磁干扰接收机型号为ESCI，适用于9 kHz～3 GHz的所有民用标准的认证测试；环形天线型号为6502，频率范围为9 kHz～30 MHz；双锥天线型号为3104C，频率范围为20～200 MHz。

按照CISPR要求，不同试验频段接收机测量带宽及测量天线不同，因此试验分为9～150 kHz、150 kHz～1 MHz、1～30 MHz及30～200 MHz进行。前三个频段使用环形天线6502，30～200 MHz使用双锥天线3104C。

为了模拟实际布置时灯管可能距离主控室设备的最近位置，测量天线置于距离灯管1 m位置。测量照片如图1所示。

(a) 1支灯管

(b) 4支灯管

图1 3 m法半电波暗室试验布置

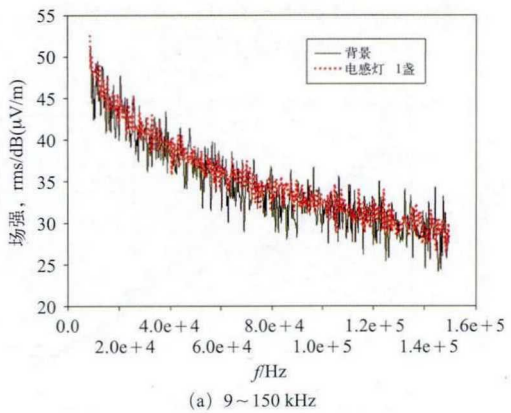
为了比较不同数目灯管对辐射场强的增加效果，这里仅考虑每次试验的最大辐射场强值，而不管最大值出现的频点如何。三种品牌LED灯的最大场强值如表1、表2所示，电感灯的辐射场强方均根值（rms）变化如图2和图3所示。

表1 LED灯在9 kHz～30 MHz频段内最大场强值

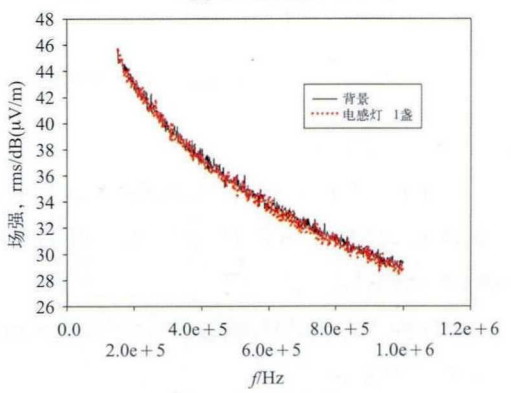
各品牌数量/支 / 场强	三星LED灯			湖南麓山LED灯			Spark LED灯		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
最大场强/dB(μV/m)	62.58	64.75	64.76	52.52	54.04	56.25	54.68	56.85	57.21
最大场强/(μV/m)	1 346.50	1 729.0	1729.4	422.59	503.49	649.25	541.78	695.58	724.92
与1支对比的增量/dB(μV/m)	/	2.17	2.18	/	1.52	3.73	/	2.17	2.53

表2　LED灯在30～200 MHz频段内最大场强值

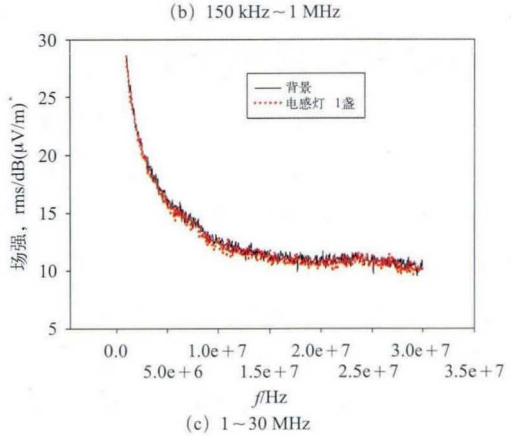
场强	各品牌数量/支	三星LED灯			湖南麓山LED灯			Spark LED灯		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
垂直极化	最大场强/dB(μV/m)	39.63	37.99	43.62	32.66	32.56	32.87	31.41	31.26	31.46
	最大场强/(μV/m)	95.88	79.30	151.70	42.96	42.48	44.03	37.17	36.54	37.41
	与1支对比的增量/dB(μV/m)	/	−1.65	3.98	/	−0.10	0.21	/	−0.15	0.06
水平极化	最大场强/dB(μV/m)	31.57	31.59	31.96	36.80	38.25	35.88	31.66	30.94	31.16
	最大场强/(μV/m)	37.87	37.99	39.64	69.18	81.71	62.24	38.27	35.25	36.12
	与1支对比的增量/dB(μV/m)	/	0.03	0.40	/	1.45	−0.92	/	−0.71	−0.50



(a) 9～150 kHz



(b) 150 kHz～1 MHz



(c) 1～30 MHz

图2　电感灯在9 kHz～30 MHz频段内辐射场强方均根值

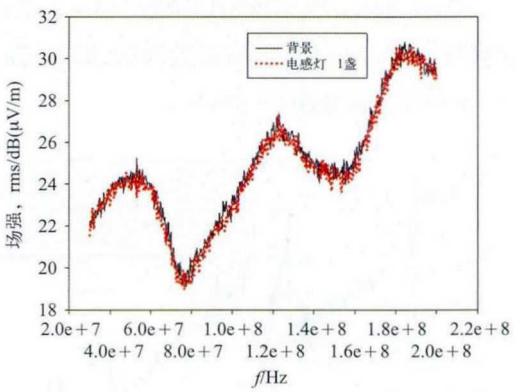


图3　电感灯在30 kHz～200 MHz频段内（水平极化）辐射场强方均根值

分析表1、表2及图2、图3可知：

1）三星LED灯3支最大场强值64.76 dB(μV/m)，3支与1支相比，在9 kHz～30 MHz频段内最大场强值增加2.18 dB(μV/m)；在30～200 MHz频段内最大场强值增加3.98 dB(μV/m)。

2）湖南麓山LED灯3支最大场强值为56.25 dB(μV/m)；3支与1支相比，在9 kHz～30 MHz频段内最大场强值增加3.73 dB(μV/m)；在30～200 MHz频段内最大场强值增加−0.92 dB(μV/m)。需要说明的是，3支比1支辐射场强反而小了，原因在于开关电路的辐射与电路中的电流相位及电路参数特性有关，因此3支与1支的辐射场强最大值不在同一频点，但是由于其电路特性和电流幅值是固定的，因此其最大值基本上是稳定的。

3）Spark LED灯3支最大场强值57.21 dB(μV/m)；3支与1支相比，在9 kHz～30 MHz频段内最大场强值增加2.53 dB(μV/m)。在30～200 MHz频段内最大场强值增加−0.5 dB(μV/m)。

4）三星LED灯的辐射骚扰场强最大值比湖南麓山LED灯和Spark LED灯要大。

5）电感灯在整个频段内几乎不产生辐射骚

扰场强，与背景无差异，1支灯管时最大场强值为52.51 dB(μV/m)。

2.2 磁场辐射骚扰试验

测量设备采用ESCI电磁干扰接收机和6502环形天线。按照CISPR要求，不同试验频段接收机测量带宽及测量天线不同，因此每支灯管的试验分为9～150 kHz和150 kHz～20 MHz进行。试验样品数量均为1支。

三星LED灯、湖南麓山LED灯、Spark LED灯和电感灯在9 kHz～20 MHz频段内的辐射场强方均根值（rms）分别如图4～图7所示。

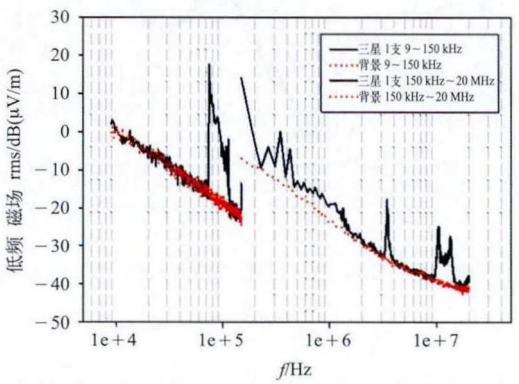


图4 三星LED灯在9 kHz～20 MHz频段内辐射场强方均根值

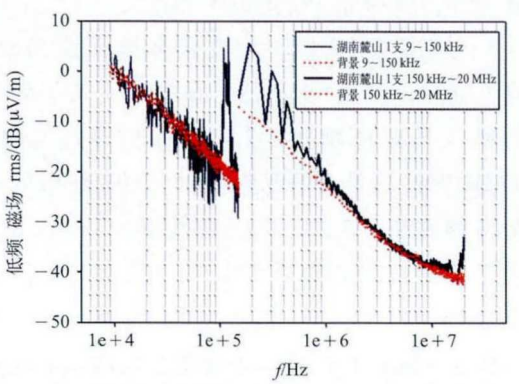


图5 湖南麓山LED灯在9 kHz～20 MHz频段内辐射场强方均根值

由图4～图7分析可知：

1）三星LED灯具的低频磁场辐射场强方均根值的最大值为17.62 dB(μA/m)，比背景增加34 dB(μA/m)左右。

2）湖南麓山LED灯具的低频磁场辐射场强方均根值的最大值为6.78 dB(μA/m)，比背景增加26 dB(μA/m)左右。

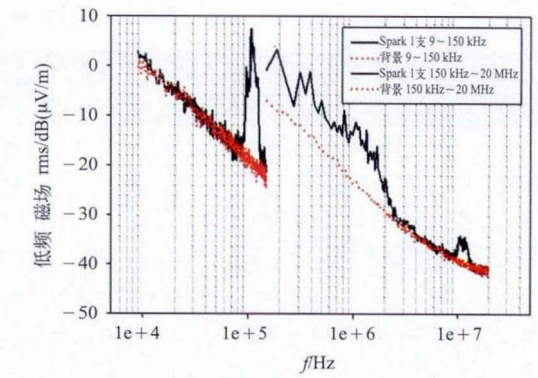


图6 Spark LED灯在9 kHz～20 MHz频段内辐射场强方均根值

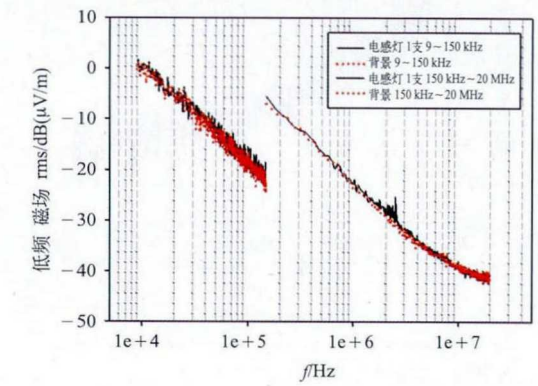


图7 电感灯在9 kHz～20 MHz频段内辐射场强方均根值

3）Spark LED灯具的低频磁场辐射场强方均根值的最大值为7.47 dB(μA/m)，比背景增加27 dB(μA/m)左右。

4）电感灯灯具的低频磁场辐射场强方均根值与背景基本无差异。

3 电场辐射骚扰现场实测

实际安装在室内的灯具存在复杂布线，各种导线纵横交错，形成了密集的无意识辐射天线，如此错综复杂布线条件下的大量灯具的辐射场强从实验预测是无法实现的。因此为了进一步对比LED灯与电感灯的实际辐射骚扰情况，需要进行现场试测。测量电磁干扰接收机型号FSH4，适用于9 kHz～3 GHz的所有民用标准的认证测试。

3.1 岭澳一期核电站会议室现场实测

在岭澳一期核电站电气处会议室进行了现场实测。会议室主要有两间：一间为全电感灯；另

一间为全三星LED灯。两间会议布置的灯数量相同，但所处的电磁环境背景不尽相同，因此，无法横向对比LED灯与电感式灯的实际辐射绝对差异，仅能对比在不同数量的情况下，LED灯与电感灯对各自房间空间电磁场的增加情况。

电感灯会议室约为12 m×8 m，房间采用8盏电感灯照明，每盏2支灯管。经测量，房间内不同点位辐射场强区别不大，因此以房间正中为测点，天线布置在该点，如图8所示。

图8 电感灯会议室测量场景

在电感灯会议室测量了8盏灯的情况。测量未开灯的背景场强和开启8盏电感灯照明后的场强对比情况，如图9、图10所示。

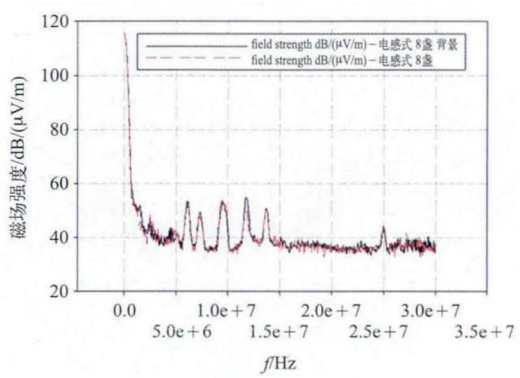


图9 9 kHz～30 MHz场强

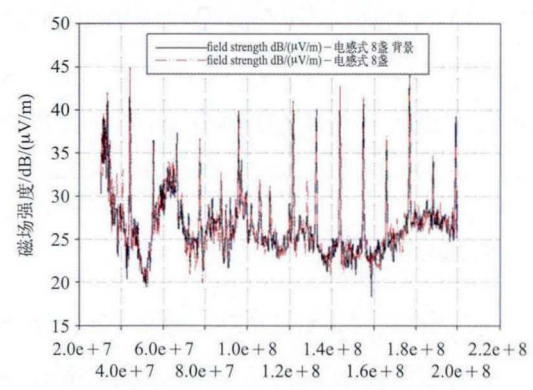


图10 30～200 MHz场强

从图9、图10可知：在9 kHz～30 MHz及30～200 MHz频段内，开启8盏电感灯前后空间电磁场无显著变化。

三星LED灯会议室约为12 m×8 m，与电感灯会议室布局一样，采用8盏三星LED照明，每盏2支灯管。经测量，房间内不同点位辐射场强区别不大，因此以房间正中为测点，天线布置在该点。

在三星LED灯会议室测量了8盏灯的情况。不同频段内，测量未开灯的背景场强和开启8盏LED灯照明后的场强对比情况，如图11、图12所示；开启8盏LED灯的场强与背景场强的差值绘制在正态概率图样中，如图13、图14所示。

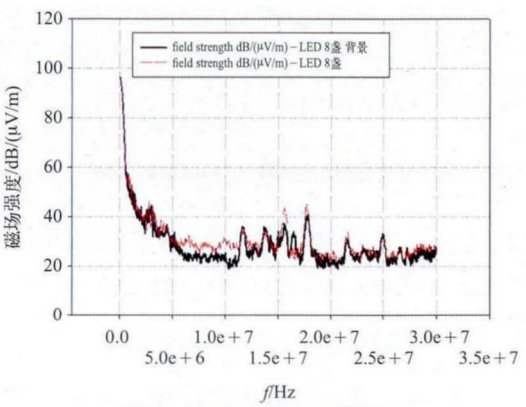


图11 9 kHz～30 MHz场强

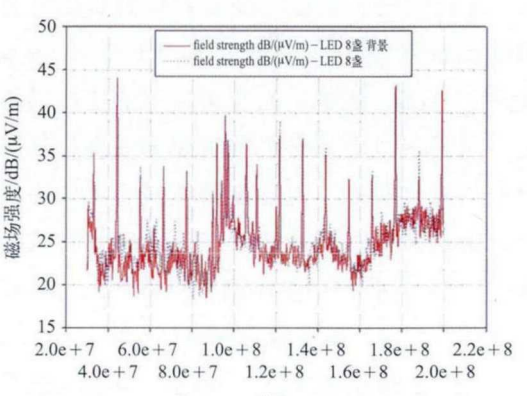


图12 30～200 MHz场强

从图11～图14可知：

1）在9 kHz～30 MHz频段内，开启8盏LED灯与背景场强相差不大。绝大部分频点（1%～99%的频点）开启8盏LED灯比背景场强增加－5～9 dB(μV/m)，最大增加12 dB(μV/m)左右。

2）在30～200 MHz频段内，开启8盏LED灯与背景场强相差不大。绝大部分频点（1%～99%

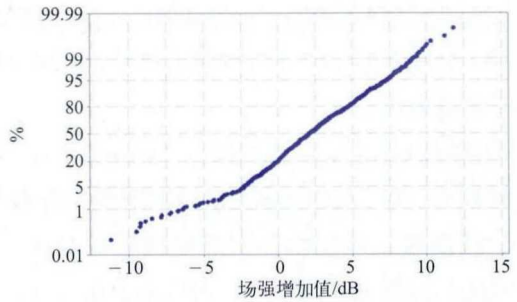


图13 8盏灯比背景场强增加值的概率图（9 kHz～30 MHz）

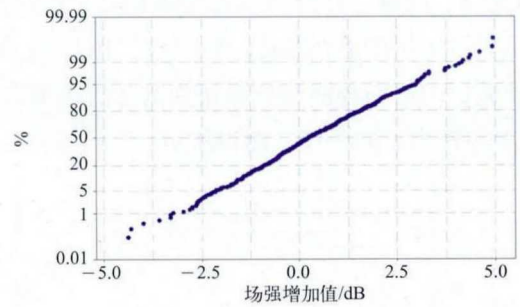


图14 8盏灯比背景场强增加值的概率图（30～200 MHz）

的频点），开启8盏LED灯比背景场强增加－3～3.75 dB(μV/m)，最大增加5 dB(μV/m)左右。

3.2 岭澳一期核电站主控室现场实测

主控室采用63盏电感灯照明，每盏3支灯管。由于运行需要，无法将所有照明灯具同时关闭，因此此次试验分为全部灯具开启和关闭一半灯具两个步骤，测量这两个条件下的空间电磁场情况。由于主控室属于极其重要的安全控制区域，可选的测点有限，无法测量主控室不同点位的空间电磁场情况，因此选取了两个代表性的测点。测点1位于主控室中央距离主控屏2 m，测点2位于主控室的角落。测量结果如图15～图17所示。

由于主控室测点2位于角落，双锥天线尺寸较大，限于场地条件，无法进行30～200 MHz频段测量。

分析图15～图17可知：

1）在9 kHz～30 MHz及30～200 MHz频段内主控室开启全部63盏电感灯，开启与开启一半场强基本无差异。

2）在测点1的位置，9 kHz～3 MHz频段内的最大场强为95.78 dB(μV/m)，30～200 MHz频段内的

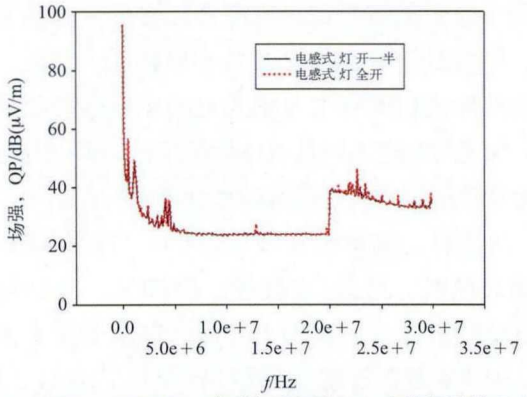
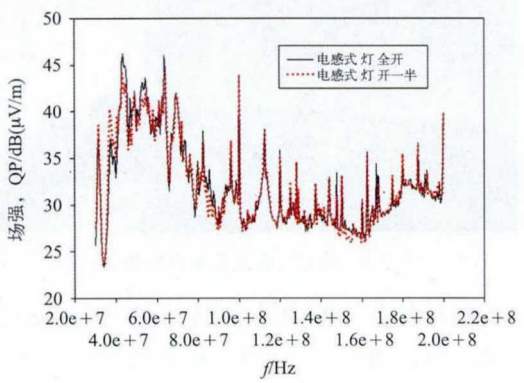
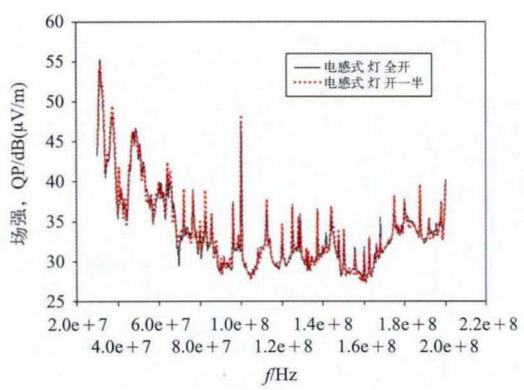


图15 9 kHz～30 MHz，电感灯全开和开一半的场强情况对比（测点1）



（a）水平极化



（b）垂直极化

图16 30～200 MHz，电感灯全开和开一半的场强情况对比（测点1）

最大场强为55.30 dB(μV/m)；在测点2的位置，9 kHz～30 MHz频段内的最大场强为95.74 dB(μV/m)。

4 结果对比分析

主控室现为63盏电感灯，每盏3支，合计189支，要全部替换为LED灯。考虑最严重情况，按照189支线性叠加，可得到三种品牌的LED灯在不同

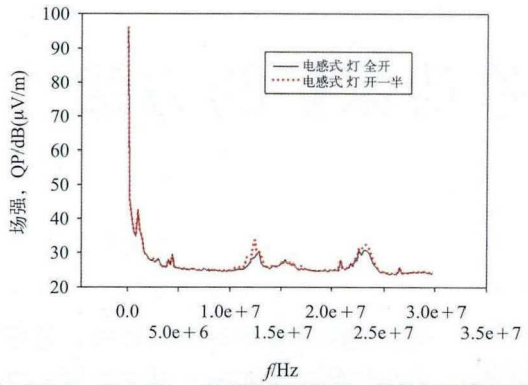


图17 9 kHz～30 MHz，电感灯全开和开一半的场强情况对比（测点2）

频段内合计场强最大值。

根据前述研究表明，电感灯几乎不产生辐射场强，因此将前文测量结果作为目前主控室的背景场强值，即9 kHz～30 MHz频段内的最大场强为95.7 8 dB(μV/m)或0.06 V/m，30～200 MHz频段内的最大场强为55.30 dB(μV/m)或0.006 V/m。考虑最严重情况，即只考虑幅值线性叠加，将189支灯管产生的总场强与目前主控室背景场强值相加，得到189支灯管运行后的主控室可能得到的最大场强值。不同品牌LED灯的辐射骚扰值如表3所示。

表3 不同品牌LED灯的辐射骚扰值

频段	骚扰值	品牌 三星	湖南麓山	Spark
30～200 MHz	1支灯/(μV/m)	95.88	69.18	38.27
	189支灯/(V/m)	0.018	0.013	0.007
	主控室/(V/m)	0.024	0.019	0.013
9 kHz～30 MHz	1支灯/(μV/m)	1346.50	422.59	541.78
	189支灯/(V/m)	0.254	0.080	0.102
	主控室/(V/m)	0.314	0.14	0.162
9 kHz～20 MHz	1支灯/(μA/m)	7.60	2.18	2.36
	189支灯/(A/m)	0.001	0.000 4	0.000 4

由表3可知：

1）在30～200 MHz频率区间内，主控室分别更换为三种LED灯后，产生的辐射电磁骚扰水平在0.01～0.03 V/m之间，远小于10 V/m的限值要求。

2）在9 kHz～30 MHz频率区间内，主控室分别更换为三种LED灯后，产生的辐射电场水平在0.01～0.04 V/m之间，远小于10 V/m的限值要求。

3）在9 kHz～20 MHz频率区间内，主控室分别更换为三种LED灯后，189支LED灯所产生的低频磁场辐射水平在0.000 4～0.001 A/m之间，与30 A/m限值相比，该取值几乎可以忽略，尽管未对主控室的磁场进行测量，但能够推算由LED灯引起的低频磁场辐射骚扰可以忽略。

5 结束语

1）核电站照明设备辐射电磁骚扰限值可考虑9 kHz～300 MHz频段范围，推荐在20～300 MHz频段内，核电设备电场辐射抗扰度水平为10 V/m；磁场辐射抗扰度水平在9～50 kHz频段为300 A/m，100 kHz～1 MHz频段为30 A/m。

2）从辐射骚扰水平大小来看，考虑最严重条件下，主控室分别更换为三种LED灯后，产生的电场辐射骚扰水平和低频磁场辐射骚扰水平均远小于上述提出的核电设备抗扰度水平，三种LED灯具均可替换目前主控室照明的电感灯。

参考文献

[1] 黄小文．照明类产品电磁兼容问题的分析及其解决方法研究 [D]．杭州：浙江大学，2011．

[2] 吴庆荣．照明器具的电磁兼容问题 [J]．中国照明电器，2000 (3)：22-23．

[3] 马宇驰．LED开关电源EMC的设计与评估 [D]．广州：华南理工大学，2014．

[4] 蔡春锋，涂辛雅，潘建根．LED照明产品的EMC检测技术探讨 [R]．中国照明学会，2013：251-257．

[5] 倪济宇，伍华嘉．LED照明产品各国准入要求分析综述 [J]．照明工程学报，2013，24 (2)：21-29．

[6] GB 17743—2007 电气照明和类似设备的无线电骚扰特性的限值和测量方法 [S]．

[7] 俞磊，张翼翔，梁仙灵．核电仪控设备电磁兼容要求与设计对策 [J]．自动化仪表，2014，35 (12)：43-48．

[8] 张顺达．核电控制设备的电磁兼容试验方法 [D]．上海：华东理工大学，2012．

(下转第55页)

Windings中的Winding 1、Winding 2和Winding 3的Connection分别设置为Wye、Delta和Wye。T_1、T_2和T_3接入Winding 1，对应接线端子为F_1、F_2和F_3；T_{11}、T_{14}和T_{17}，T_{12}、T_{15}和T_{18}，T_{13}、T_{16}和T_{19}叠加合成电流经过相应中间变流器T_{29}、T_{30}和T_{31}接入Winding 2，对应接线端子为M_1、M_2和M_3；T_{20}、T_{23}和T_{26}，T_{21}、T_{24}和T_{27}，T_{22}、T_{25}和T_{28}叠加合成电流经过相应中间变流器T_{32}、T_{33}和T_{34}接入Winding 3，对应接线端子为M_5、M_6和M_7。

经过与GE公司T_{35}保护装置技术人员探讨，对隔离变二次电流采集方法、差动保护接线图设计及差动保护定值进行设定，确认是正确可行的。

需要注意的是，两侧电流进T_{35}差动保护装置Current Inputs端子的电流为180°接线，在接线时注意电流的极性。

变频系统安装完成后，进行隔离变压器冲击试验时差动保护未发生误动作，录取的电流波形正常；试运行及运行时用向量仪检测二次接线正常，从T_{35}装置内部读取的差动回路不平衡电流接近零。通过实际验证了本工程隔离变差动保护的设计及T_{35}差动保护定值的设置是完全正确的。

5 结束语

通过分析隔离变压器的结构，用电流叠加和加装中间变流器的方法，将多绕组特殊接线组别变压器二次电流回路变换为标准接线组别和标准二次电流的回路，用保护单铁心变压器的微机保护装置实现了对两铁心特殊变压器的差动保护。

实践证明，这一方案的实施保证了电网和隔离变压器安全可靠运行，为被类似问题困扰的同行提供了借鉴。

参考文献

[1] 姚东晓，邓茂军，倪传坤，等．变压器多侧励磁涌流产生机理及对差动快速动作区影响研究 [J]．电力系统保护与控制，2016，44 (5)：36-41.

[2] 陈继瑞，张营伟，刘洁，等．一种变压器保护采样可靠性及涌流识别方案的研究 [J]．电力系统保护与控制，2016，44 (14)：166-170.

[3] 兰生，张小钒．基于多判据的变压器差动保护方法 [J]．电力系统保护与控制，2015，43 (23)：125-131.

(收稿日期：2017－02－10) EA

(上接第51页)

[9] 核工业标准化研究所．EJ/T 1143-2002 核电站控制室设计功能分析与分配 [S]．北京：中国标准出版社，2002.

[10] Office of Nuclear Regulatory Research. NUEG-0700-2002 Human-system interface design review guidelines [S]. Washington DC: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 2002.

[11] IEC 61000-4-9 Electromagnetic compatibility (EMC) －part 4-9: testing and measurement techniques－pulse magnetic field immunity test [S]. International Electrotechnical Committee, 1993.

[12] IEC 61000-4-10 Electromagnetic compatibility (EMC) －part 4-10: testing and measurement techniques－damped oscillatory magnetic field immunity test [S]. International Electrotechnical Committee, 1993.

[13] IEC 61000-4-3 Electromagnetic compatibility (EMC) －part 4-3: testing and measurement techniques radiated－radio-freqxiency, electrostatic field immunity test [S]. International Electrotechnical Committee, 1995.

[14] 邱建文，孔海志，莫国钧．核电厂电磁兼容挑战及应对策略 [J]．原子能科学技术，2009，43 (增刊)：360-363.

[15] GB/T 11684—2003 核仪器电磁环境条件与试验方法 [S].

(收稿日期：2016－05－23) EA