

汽轮发电机失磁保护典型判据的适应性仿真研究

汽轮发电机失磁故障严重威胁发电机安全和电网稳定,要求失磁保护正确、及时动作,针对异步阻抗圆加延时出口这一典型失磁保护判据,从机网间电气联系变化角度,研究了该判据的适应性和不能及时动作的风险。定义了临界系统联系电抗来评估典型失磁保护判据对机网互联强弱的适应度,当系统联系电抗超过临界值后,失磁故障下机端测量阻抗轨迹进入异步圆后因停留时间较短不能满足典型判据对延时的要求,会导致失磁保护不能及时动作。

於岳祥¹ 王青² 柯贤波³ 宋云亭² 杨明玉¹/1.华北电力大学电力工程系
2.中国电力科学研究院 3.国家电网公司西北分部

0 引言

随着电网互联规模的扩大,电力系统运行方式日益复杂,一些国家发生了严重的大面积停电事故,而发电机涉网保护配置不当是重要诱因^[1-4]。失磁保护是涉网保护中采用判据较为复杂,并且效果受电网运行方式影响较大的保护^[5]。

发电机励磁系统环节复杂,发生失磁故障的种类和诱因较多。一旦发生失磁故障,一方面导致发电机转子、定子过热,有功功率、转矩等参量发生周期性振荡,机端电压降低;另一方面发电机从系统中吸收大量无功功率,导致相邻机组过负荷,甚至可能破坏电力系统的稳定^[6-7]。目前对于汽轮发电机失磁故障,倾向于尽快将机组停机而非坚持运行,一方面失磁故障中短路原因较多见,另一方面通过降低原动机功率的方法因受制于机炉调节速度难以保证效果^[8]。

失磁保护目前普遍采用多段式的复合判据,其中异步阻抗圆加延时出口为典型方案,考虑躲避系统振荡、防止保

护误动作,现场广泛采用文献[9]的建议,设置延时为0.5~1 s。此典型判据对于系统和机组不同运行条件的适应性尚缺乏深入的分析。

本文从机网间电气联系变化的角度,研究对异步圆加延时起动这一典型判据方案的影响,仿真分析发电机失磁后机端测量阻抗穿越异步圆的动态特性,为优化失磁保护配置方案提供参考。

1 以往对失磁过程的基本认识

1) 发电机失磁后的阶段可按功角的变化过程分为两个阶段:第一阶段是失磁开始到临界失步之前($\delta < \delta_{jw}$);第二阶段是失步后的异步运行($\delta > \delta_{jw}$)。其中 δ 为发电机功角, δ_{jw} 为静稳极限角。

2) 发电机有功功率在第一阶段基本维持恒定(即等有功过程),第二阶段有功功率开始下降,产生了随着转差增大而增大的异步功率,在调速器的控制下,机械功率下降至与平均异步功率相平衡,发电机进入稳定的异步运行状态,并随着交变异步功率的变化呈现一定幅度的振荡。

3) 若失磁前发电机处于滞相运行状态,第一阶段无功功率单调衰减到零,第二阶段无功功率反向单调增大到一个与初始有功功率有关的相当大的负值,并呈现一定幅度的振荡。

4) 失磁后机端母线电压和主变压器高压侧母线电压持续下降,进入稳定的异步运行状态后保持较低的值,并呈现一定幅度的振荡。



於岳祥/硕士研究生

关键词/Keywords

汽轮发电机·
失磁保护·
异步阻抗圆·
机网互联强弱·

5) 第一阶段转差较小, 第二阶段发电机转速迅速上升, 转差增大到最高点, 由于机械功率的下降而随之下降至某个值, 并在这个值附近不断振荡。

6) 失磁后, 机端测量阻抗轨迹沿等有功圆前进, 达到静稳极限后脱离等有功圆进入静稳圆, 随后进入异步边界圆。由于无功功率一直为负, 而有功功率可能正负交替, 轨迹在阻抗平面的第三、四象限不断振荡, 甚至有可能走出异步圆边界。

发电机失磁保护是一个重要的涉网保护, 以往的失磁仿真只研究了机组侧的影响因子而忽略了系统侧的影响因子, 本文以中国电力科学研究院开发的商业仿真软件——电力系统全过程动态仿真程序 (PSD-FDS)^[10]为研究工具。分别以单机无穷大系统和某省实际电网为研究案例, 研究机网间电气联系变化对发电机失磁后动态特性的影响。

2 单机无穷大系统仿真

图1为单机无穷大系统, 发电机额定容量为388 MV·A, 经主变压器升压至220 kV后向无穷大母线送电, 其中发电机模型采用经典六阶模型, 折算到发电机容量的直轴暂态电抗标么值 $X'_d = 0.301$, 交轴暂态电抗标么值 $X'_q = 0.448$, 直轴不饱和同步电抗标么值 $X_d = 2.155$, 交轴不饱和同步电抗标么值 $X_q = 2.1$, 直轴次暂态电抗标么值 $X''_d = 0.218$, 交轴次暂态电抗标么值 $X''_q = 0.235$, 直轴暂态开路时间常数 $T'_d = 9.68$, 交轴暂态开路时间常数 $T'_q = 0.96$, 直轴次暂态时间常数 $T''_d = 0.147$, 交轴次暂态时间常数 $T''_q = 0.368$ 。励磁系统选用典型的励磁系统模型, 调速器模型选用液压调速器模型, 原动机模型选用无再热汽轮机模型, 折算到发电机容量的主变压器电抗标么值 $X_T = 0.1468$ 。

设置发电机励磁绕组直接短路失磁故障, 失

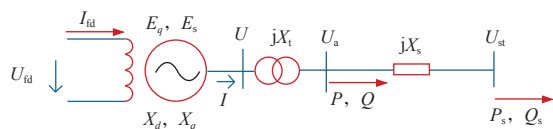


图1 单机无穷大系统

磁保护动作条件设置为异步圆加0.5 s延时出口于切除发电机, 采用以固定的步长逐渐增加系统电抗从而增加机网间系统联系电抗的方法, 仿真不同条件下机组失磁后的动态过程, 机网间的系统联系电抗 X_{st} 为

$$X_{st} = X_s + X_T \tag{1}$$

式中, X_s 为系统电抗; X_T 为主变压器电抗。

各方案机端测量阻抗轨迹第一次进出异步时刻及保护动作时间统计如表1所示。表中, “-”为机端测量阻抗轨迹第一次进入异步圆后, 不再出圆, 轨迹一直保持在异步圆内。

表1 各方案机端测量阻抗轨迹第一次进出异步圆时刻

方案号	系统联系电抗(pu)	初始转子角(°)	失磁时刻/s	第一次进圆时刻/s	第一次出圆时刻/s	第一次圆内延时/s	保护动作时间/s
1	0.044 57	42.101	0.1	4.89	-	一直	5.39
2	0.105 14	52.118	0.1	4.71	-	一直	5.21
3	0.138 79	60.918	0.1	4.35	-	一直	4.85
4	0.145 52	62.252	0.1	4.25	-	一直	4.75
5	0.152 25	63560	0.1	4.14	-	一直	4.64
6	0.158 98	63.844	0.1	4.02	4.38	0.36	5.23
7	0.165 71	66.107	0.1	3.91	4.23	0.32	5.39
8	0.172 44	67.352	0.1	3.80	4.10	0.3	5.84
9	0.179 17	68.581	0.1	3.70	3.98	0.28	6.04

(1) 机端测量阻抗进入异步圆的位置和时刻

图2为方案1~方案9中发电机的机端测量阻抗轨迹的变化与异步圆的关系。

由图2可以看出, 随着系统联系电抗的增大, 机端测量阻抗轨迹进入异步圆的位置明显上升, 这是因为等有功圆可表示为^[11]

$$Z = \frac{U_{st}^2}{2P_s} + jX_{st} + \frac{U_{st}^2}{2P_s} e^{j2\varphi_{st}} \tag{2}$$

式中, Z 为失磁发电机的机端测量阻抗; U_{st} 为无穷大母线处的电压; X_{st} 为系统联系电抗; P_s 为发电机送至无限大母线的有功功率; φ_{st} 为无限大母线处的功率因数角。

设 P_s 、 X_{st} 和 U_{st} 为已知常数, 则式(2)在阻抗平面上是一个圆, 圆心 Z_c 和半径 Z_r 分别为

$$Z_c = \frac{U_{st}^2}{2P_s} + jX_{st} \tag{3}$$

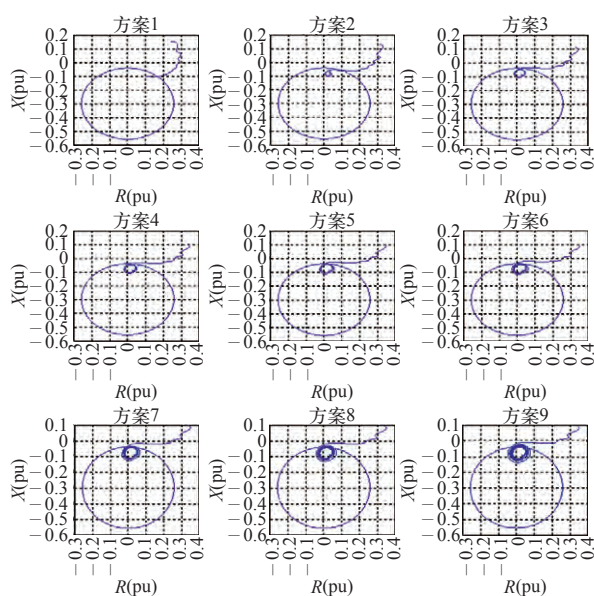


图2 各方案机端测量阻抗轨迹与异步圆的关系

$$Z_r = \frac{U_{st}^2}{2P_s} \quad (4)$$

由式(3)可得等有功圆与纵轴相切于 X_{st} 点,故随着系统联系电抗的增大,等有功圆向上平移,机端测量阻抗轨迹进入异步圆的位置也随之上升。图3为方案1和方案6等有功圆与异步圆位置的比较。

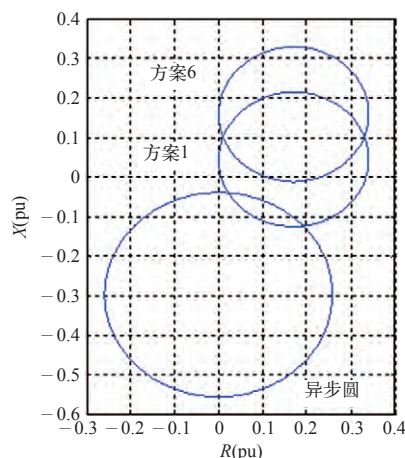


图3 方案1和方案6等有功圆与异步圆的位置关系

另外,随着 X_{st} 的增大,机端测量阻抗轨迹进入异步圆的时刻提前,这是因为随着 X_{st} 的增大,故障前转子角初始值增大,稳定裕度降低,发电机维持等有功过程时间缩短,且根据失磁后同步

功率衰减的表达式^[15]

$$P_t = \frac{U_{st} E_0}{X_{d\Sigma}} e^{-\frac{t}{T_d'}} \sin(\delta_0 - st) \quad (5)$$

随着 X_{st} 的增大, P_t 跌落速度增快,机端测量阻抗轨迹加速失步进入异步圆,表2为方案1和方案6机端测量阻抗轨迹进入异步圆时发电机各参量的数据统计。

表2 方案1和方案6机端测量阻抗轨迹进入异步圆时各参量

方案	进入异步圆时刻/s	有功功率 P /MW	无功功率 Q /Mvar	机端母线电压 U (pu)	主变压器高压侧母线电压 U_L (pu)	转子角/ $^\circ$	频率偏差/Hz
1	4.89	299	-180	0.824	0.982	112.0	0.054
6	4.02	-19	-102	0.205	0.424	238.8	1.28

对比方案1和方案6失磁后的有功功率、无功功率、机端母线电压、主变压器高压侧母线电压、发电机功角以及转速偏差的波形,如图4~图8所示,图中标记了进入异步圆的位置。

可以看出,与方案1不同的是,方案6机端测量阻抗轨迹进入异步圆时发电机功角超过 180° ,有

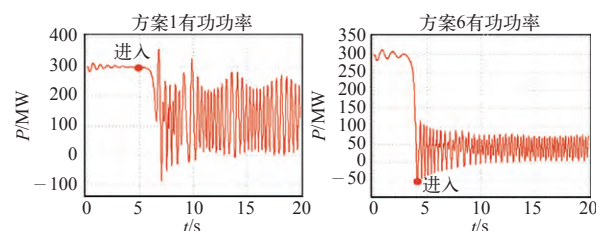


图4 发电机的有功功率波形

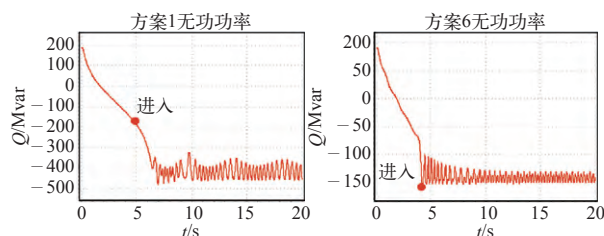


图5 发电机的无功功率波形

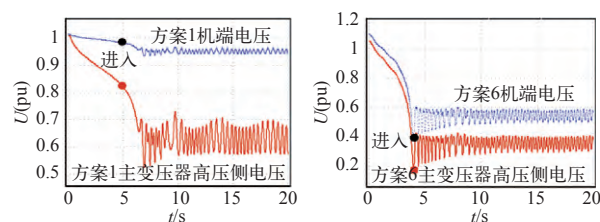


图6 机端电压及主变压器高压侧母线电压波形

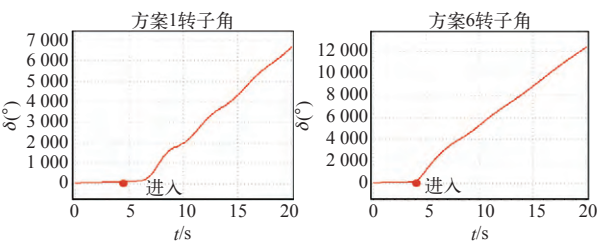


图7 发电机的转子角波形

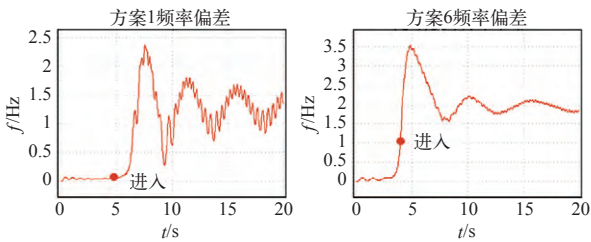


图8 发电机的频率偏差波形

功率反向，机端母线电压和主变压器高压侧母线电压跌落到相当低的程度，频率偏差更为严重。

(2) 机端测量阻抗在异步圆内停留时间

方案6~方案9中，发电机的机端测量阻抗轨迹进入异步圆较短时间后均离开异步圆，在圆内停留时间小于0.5 s，不满足失磁保护动作延时条件。如表3所示，方案6中，机端测量阻抗轨迹第1、2次进出圆在圆内延时分别为0.36 s、0.26 s，第3次进圆才最终停留在圆内，不出圆，导致失磁保护在失磁故障发生后机端测量阻抗轨迹第1次进圆后1.21 s动作，相比方案5失磁保护动作时刻滞后0.59 s。

表3 方案6机端测量阻抗轨迹各次进出异步圆的时刻

(单位: s)			
序号	进异步圆	出异步圆	圆内延时
1	4.02	4.38	0.36
2	4.44	4.70	0.26
3	4.73	—	一直

如表4所示，方案9中机端测量阻抗轨迹6次进出圆后在圆内延时分别为0.28 s、0.21 s、0.20 s、0.21 s、0.24 s和0.26 s，第7次进圆才最终停留在圆内，不出圆，导致失磁保护在失磁故障发生后机端测量阻抗轨迹第一次进圆后2.34 s动作，相比方案5失磁保护动作时刻滞后1.4 s。

这是由于方案1~方案5失磁后，机端测量阻抗轨迹从第四象限进入异步圆，方案6~方案9机

表4 方案9机端测量阻抗轨迹各次进出异步圆的时刻

(单位: s)			
序号	进异步圆	出异步圆	圆内延时
1	3.70	3.98	0.28
2	4.09	4.30	0.21
3	4.38	4.58	0.20
4	4.66	4.87	0.21
5	4.94	5.18	0.24
6	5.24	5.50	0.26
7	5.54	—	一直

端测量阻抗轨迹从第三象限进入异步圆。

以一定的步长增加发电机的系统联系电抗，达到某较大的值后，机端测量阻抗轨迹若干次穿入穿出异步圆并导致失磁保护动作滞后，定义这个值为临界系统联系电抗 X_{li} ，如方案5中的0.152 25。方案6~方案9的系统联系电抗大于临界系统联系电抗，此时使用异步圆判据将会导致保护动作的滞后。

3 实际系统仿真

图9为某水平年下某省实际电网部分地理接线图及其有功潮流分布，其中G代表有功出力，L代表负荷。M电厂拥有一台发电机组，实际有功出力为330 MW，经一台主变压器A升压至330 kV后，由10 km长的双回输电线路途经330 kV变电站B送电至330 kV变电站C，变电站B与C之间相距15 km。在变电站C由两台变压器降压为220 kV后，由双回输电线路通过220 kV变电站D、E、F、G和H同该省电网相连，其中变电站C与变电站D、G和H分别相距47 km、20 km和18 km，变电站D与

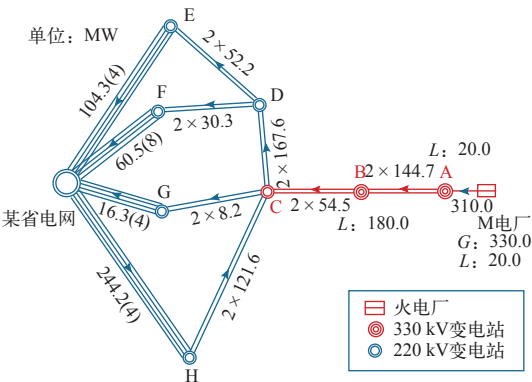


图9 某省电网部分地理接线

变电站E、F分别相距18 km、24 km。

经计算M机组的系统电抗 X_s 标幺值为0.024 2，系统联系电抗 X_{st} 标幺值为0.060 1。

采用以固定的步长逐渐增加线路A—B的长度从而增加机网间联系电抗的方法，仿真不同条件下机组励磁绕组直接短路失磁后的动态过程，在此过程中通过修改负荷母线无功补偿量维持系统电压水平基本不变。

仿真结果呈现与单机无穷大系统相同的规律，随着系统联系电抗的增加，失磁后机端测量阻抗进入异步圆的时刻提前，位置上升，方案1~方案5机端测量阻抗轨迹从第三象限进入异步圆，且进入异步圆后一直保持在异步圆内，方案6和方案7机端测量阻抗从第四象限进入异步圆，且经过较短延时离开异步圆导致失磁保护动作滞后。故M机组的临界系统联系电抗 X_{lj} 为0.083 2，如表5所示。

表5 各方案轨迹第一次进出异步圆时刻

方案号	系统联系电抗(pu)	初始功角(°)	失磁时刻/s	第一次进圆时刻/s	第一次出圆时刻/s	圆内延时/s	保护动作时间/s
1	0.060 1	41.63	0.1	2.57	—	一直	3.07
2	0.077 6	45.82	0.1	2.25	—	一直	2.75
3	0.796	46.45	0.1	2.13	—	一直	2.63
4	0.081 4	47.03	0.1	2.06	—	一直	2.56
5	0.083 2	47.60	0.1	1.99	—	一直	2.49
6	0.084 8	48.16	0.1	1.92	2.33	0.41	2.90
7	0.086 3	48.69	0.1	1.89	2.26	0.37	3.17

在该水平年下发生了严重连锁故障，导致M电厂附近网架严重弱化，而M电厂实际有功出力不变，经一台主变压器A升压至330 kV后，仅通过单回输电线途径变电站B送电至变电站C，在变电站C由单台变压器降压至220 kV后，由单回输电线路通过220 kV变电站D、E与该省电网相连，各变电站间的输电距离不变，其地理界线图及有功潮流分布如图10所示。

此时，经计算M机组的系统电抗 X_s 标幺值为0.047 9，系统联系电抗 X_{st} 标幺值为0.083 8，超过临界系统联系电抗 X_{lj} 。失磁后，机端测量阻抗如图11所示，其进出异步圆时刻如表6所示。

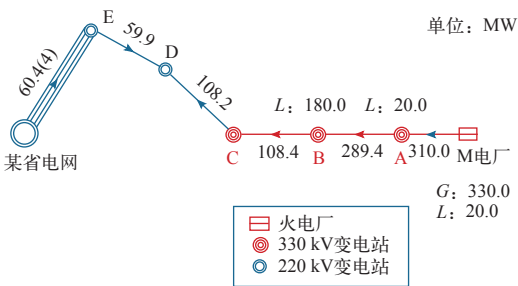


图10 某省电网部分地理接线

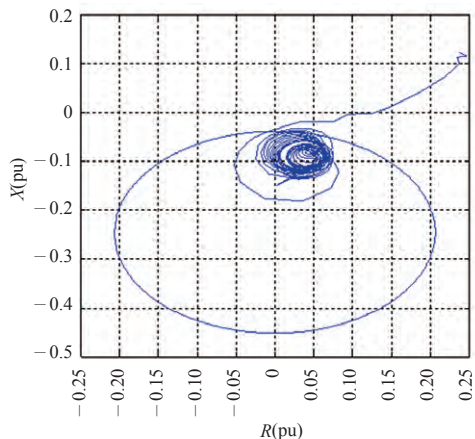


图11 发电机机端阻抗轨迹与异步圆关系

表6 方案6机端测量阻抗轨迹各次进出异步圆的时刻 (单位: s)

序号	进异步圆	出异步圆	圆内延时
1	2.001 0	2.344 3	0.343 3
2	2.491 5	2.688 6	0.197 1
3	2.753 2	2.986 2	0.233 0
4	3.036 2	—	一直

机端测量阻抗2.001 0 s进入异步圆后，无法保持在异步圆内，振荡若干次直到3.036 2 s后才能保持在异步圆内，并于3.536 2 s达到延时要求动作跳闸，明显导致了失磁保护动作的延迟。

因此，临界系统联系电抗可作为实际系统中评估失磁保护的异步圆加延时起动判据对运行方式变化适应性的风险指标，当发电机的系统联系电抗大于临界系统联系电抗时，认为适应性不佳，宜考虑其他判据作为补充，以便尽快起动失磁保护。

4 结束语

针对失磁保护广泛采用的异步圆加延时起动的典型配置方案，从机网间电气联系变化方面研

究了该方案的适应性。定义了发电机临界系统联系电抗 X_{lj} ，与电网联系较为薄弱的机组或在系统发生网架被严重削弱的故障导致机组与系统的联系大幅减弱时，发电机的系统联系电抗可能会大于临界系统联系电抗，这种情况下发电机发生失磁故障后，机端测量阻抗进入异步圆后容易不断进出异步圆，其在异步圆内的停留时间达不到阻抗判据动作的最小延时要求，导致失磁保护动作滞后。

参考文献

- [1] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8·14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训 [J]. 电网技术, 2003, 27(10): 8-11.
- [2] 张旭东. 不同原理的发电机失磁保护误动分析与改进 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(6): 63-65.
- [3] 殷建刚, 彭丰, 杨平, 等. 发电机失磁保护中系统低电压判据的探讨 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23(12): 28-31.
- [4] 刘伟良, 陈宏, 刘宇, 等. 由一起发电机失磁事

故谈失磁和逆功率保护的设置 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 164-166.

- [5] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用 [M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [6] 魏燕, 高有权. 发电机失磁保护及其出口方式研究 [J]. 继电器, 2003, 31(2): 54-56.
- [7] 隋佳音, 毕天姝, 薛安成, 等. 新型发电机失磁保护加速判据研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 69-73.
- [8] 高春如. 大型发电机组继电保护整定计算与运行技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [9] 汤涌. 电力系统全过程动态 (机电暂态与中长期动态过程) 仿真技术与软件研究 [D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2002.
- [10] 姚晴林. 同步发电机失磁及其保护 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [11] 王维俭, 侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1989.

(收稿日期: 2015-07-31) **EA**

(上接第87页)

文设计了磁力耦合器试验台的13 kW直流驱动电动机的电枢供电回路和励磁供电回路, 电枢供电回路采用三相桥式半控整流电路, 励磁供电回路采用三相桥式不可控整流电路。

2) 通过对驱动电动机电枢供电回路的试验调试, 对比分析了驱动电动机电枢回路未接入电源和接入电源的电压波形, 验证了驱动电动机电枢供电回路设计的可行性, 所设计的电路工作性能良好, 能满足要求。

3) 对驱动电动机励磁回路额定励磁电压波形进行了简要的分析, 验证了驱动电动机励磁供电回路设计的可行性。

4) 证明该驱动电动机供电单元切实好用, 能满足磁力耦合器试验台驱动电动机的供电要求, 为小功率磁力耦合器试验台的设计与实现奠定了基础, 同时也为下一步小功率磁力耦合器的传动特性的研究奠定了试验基础。

参考文献

- [1] 于红梅. 旋转机械联轴器的安装找正研究 [J]. 辽宁科技学院学报, 2007(4): 10-11.
- [2] Wallace A, Wohlgemuth C, Lamb K. A high efficiency alignment and vibration tolerant, coupler using high energy product permanent magnets [C]. IEEE Seventh Electric Motors and Drives Conference, 1995, 73(2): 299-305.
- [3] 耿庆鲁. 整流电路的分类 [J]. 氯碱工业, 2007(4): 7-10.
- [4] 曲学基, 曲敬凯, 于明扬, 等. 电力电子整流技术及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 99-100.
- [5] 季本山. 谈船舶电气设备中的续流二极管 [J]. 航海技术, 2011(3): 56-58.
- [6] 顾绳谷. 电机及拖动基础 (下册) [M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2007: 77.

(收稿日期: 2015-10-27) **EA**