

抽水蓄能电站用启动开关容性电流开断的研究

吕军玲, 程立, 马冲

(西安西电开关电气有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 抽水蓄能电站具有调峰、调频、调相、紧急事故处理和黑启动等多种功能, 在机组起停和工况转换过程中, 启动开关是发电电动机的静止变频装置(SFC)启动或背靠背(BTB)同步启动时必备的专用开关设备。针对抽水蓄能电站运行过程中发现的启动开关触头烧蚀问题, 对启动开关使用工况进行分析研究, 理清了该问题产生原因, 对容性电流产生原理进行理论解析、计算, 提出启动开关需具备容性电流开断能力。继而对容性电流开断试验的参数选择、试验方法进行分析, 在研制启动开关过程中设计了引弧结构, 并通过相关试验进行验证, 解决启动开关触头被烧蚀问题。

关键词: 抽水蓄能; 启动开关; 容性电流开断; 试验方法; 参数选择

Study on capacitive current breaking of starting switch for pumped-storage power station

LV Junling, CHENG Li, MA Chong

(Xian XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Pumped-storage power station has various functions such as peak shaving, frequency modulation, phase modulation, emergency treatment and black start. In the process of unit start-up, shutdown and working condition conversion, the starting switch is a necessary special switchgear for SFC start or back-to-back (BTB) synchronous start of generator motor. Aiming at the problem of contact ablation of start-up switch found in the operation of pumped storage power station, this paper analyzes and studies the service conditions of start-up switch, clarifies the causes of the problem, theoretically analyzes and calculates the generation principle of capacitive current, and puts forward that the start-up switch needs to have capacitive current breaking capacity. Then the parameter selection and test method of capacitive current breaking test are analyzed. In the process of developing the starting switch, the arc striking structure is designed, which is verified by relevant tests to solve the problem that the contact of starting switch is ablated.

Key words: pumped-storage; starting switch; capacitive current breaking; test method; parameter selection

0 引言

近年来, 随着风电、光伏和核电等新兴能源和清洁能源的大规模开发利用^[1-2], 全球能源互联网概念的提出, 我国正加快建设以特高压电

网为骨干网架, 各级电网协调发展的坚强智能电网。抽水蓄能电站以其灵活的运行方式、快速的响应速度, 已成为我国智能电网建设的重要组成部分, 在保障电力安全、推动新能源健康发展中

发挥了至关重要的作用。但目前抽水蓄能占电源总装机容量比重不足2%，不能满足新能源快速发展需求，未来我国抽水蓄能建设步伐还将进一步加快^[3]，发展前景十分广阔。

根据抽水蓄能电站的运行特点，每台发电电动机必须配置一台启动开关，它是发电电动机在泵工况启动过程中连接启动回路的开关，实现回路的灵活、快速切换功能^[4-5]。在初期调研中了解到，前期抽水蓄能电站所使用启动开关触头上有烧蚀痕迹，由于操作频繁，一般一年多触头就需要更换。但启动开关一直受国外公司垄断，备件采购和现场服务遇到很大困难，启动开关触头更换已成为电站运行的重大困扰。因此抽水蓄能电站运行人员期望在启动开关国产化研制过程中能解决动静触头易烧蚀问题。

为满足抽水蓄能电站运行需求，解决我国启动开关“卡脖子”问题，在国产化启动开关研制过程中，需要针对动静触头易烧蚀问题进行相关工况、解决办法、试验参数、试验方法和参考依据等方面研究。

1 工况分析

在抽水蓄能电站中，启动开关在回路中，主要包括静态变频装置（Static Frequency Converter, SFC）启动或背靠背（Back To Back, BTB）启动两种方式^[6-10]，无论那种启动方式，启动开关所在回路均有较长的封闭母线，封闭母线的中心导体与母线外壳之间形成容值较大的电容，在母线导体带电的状态下进行启动开

关分闸操作，启动开关的一侧由于电容的放电产生容性电流，容性电流在启动开关的断口间形成电弧，而前期启动开关动静触头未设置铜钨材料的弧触头，主触头材料为纯铜，不具备承受电弧烧蚀能力，此为启动开关主触头产生烧蚀的根本原因。

以背靠背启动为例，启动开关在回路中，如图1所示，其启动回路Line1为GM1-GCB1-SDS1-Q2-GM2，供电回路Line2为高压系统-CB2-T2-DS2（P）-GCB2-GM2；机组（GM1）作为发电机进行发电，通过回路Line1启动机组（GM2）作为电动机进行抽水，背靠背启动包含四个阶段：加速阶段、同期阶段、停拖动机阶段和完成阶段。

1）加速阶段。启动回路工作频率为0～50 Hz，回路Line1的开关GCB1、SDS1和Q2处于合闸位置；回路Line2开关GCB2处于分闸位置，CB2、DS2（P）处于合闸位置。

2）同期阶段。回路Line1工作频率达到50 Hz后，择机进行GCB2合闸，回路Line1和Line2进行同步，开关CB2、DS2（P）、GCB2、GCB1、SDS1和Q2等均为合闸状态，开关Q1、DS1（G）、DS1（P）、DS2（G）、SDS2和CB1等均为分闸状态。

3）停拖动机阶段。回路Line1和Line2完成同步后，回路Line1中，GCB1首先切掉电流，该回路上A-B点无电流通过，但处于高电位，接着需要将启动开关（Q2）进行分闸操作，在分闸过程中，启动开关连接的封闭母线所形成电容进

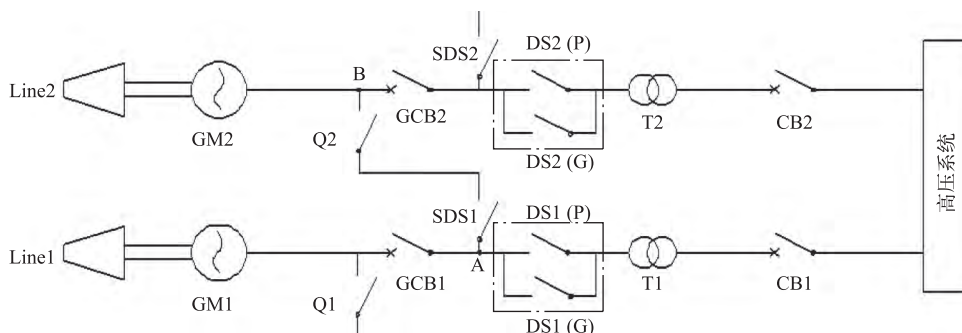


图1 背靠背启动原理图

Fig. 1 Schematic diagram of back to back start

行电荷释放,形成容性电流在断口间产生电弧,而启动开关动静触头材料均为纯铜,不具备承受电弧烧蚀能力,若开关动静触头对中有偏差,触头分闸时刻,圆周间隙不均匀,则电弧每次均在同一点烧蚀,启动开关Q2的主触头被烧蚀,长期积累烧蚀结果如图2所示。因此启动开关Q2的动静主触头需要频繁更换。



图2 某电站启动开关触头的容性电流烧蚀

Fig. 2 Capacitive current ablation of starting switch contacts in a power station

4) 完成阶段。GM1发电完成停机,GM2在工作频率50 Hz下进行抽水。

根据启动开关在回路中所处位置完成其功能,并保证使用寿命长,可靠性高,需要具有开断容性电流能力。

CB1、CB2—高压系统的断路器T1、T2—主变压器;DS1(G)、DS2(G)—换相开关(发电工况回路)DS1(G)、DS2(G)—换相开关(泵工工况回路)GCB1、GCB2—发电机断路器Q1、Q2—启动开关SDS1、SDS2—拖动开关GM1、GM2—发电电动机Line1—背靠背启动回路Line2—利用高压系统电源进行抽水回路。

2 容性电流理论分析及计算方法

在抽水蓄能电站中,连接启动开关的封闭母线中心导体和母线外壳之间为同轴导体,如图3所示,封闭母线中心导体半径为 R_1 ,外壳半径为 R_2 ,介质常数为 ε ,单位长度电容值为 C_0 ,计算公式为^[11]

$$C_0 = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (1)$$

封闭母线容性电流计算公式为

$$I = \frac{U}{\frac{1}{2\pi f C_0 l}} \quad (2)$$

式中, I 为容性电流; f 为频率; l 为母线长度; U 为导体和外壳之间电压。

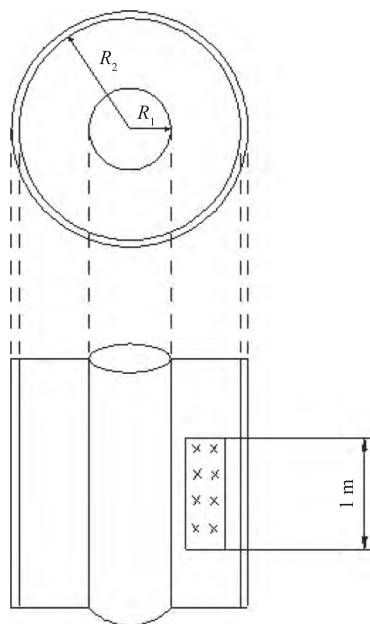


图3 同轴导体

Fig. 3 Coaxial conductor

在抽水蓄能电站发电机起动回路中,额定电压为 U_r ,封闭母线的中心导体和外壳之间的电压(相电压)为 $U_r/\sqrt{3}$,依据式(1)和式(2),母线的导体直径和外壳直径确定后,其容性电流大小和封闭母线的长度及直径有关。不同长度封闭母线的容性电流大小计算公式为

$$I = \frac{U_r/\sqrt{3}}{\frac{1}{2\pi f C_0 l}} \quad (3)$$

以某抽水蓄能电站所使用封闭母线尺寸为例,测定的单位长度封闭母线电容值 C_0 为 $3.83 \times 10^{-11} \text{F}$,该电站的额定电压 U_r 为24 kV,频率 f 为50 Hz,不同长度封闭母线容性电流值见表1。

表1 不同长度封闭母线的容性电流值

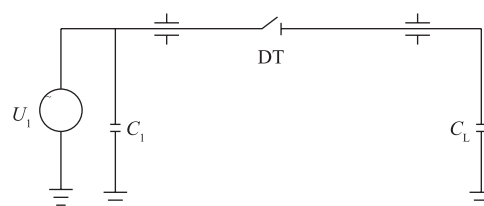
Tab. 1 Capacitive current values of enclosed busbars with different lengths

母线长度 l/m	容性电流 I/mA	母线长度 l/m	容性电流 I/mA
1	0.166	1 100	183.7
50	8.35	1 200	200.4
100	16.7	1 300	217.1
150	25.05	1 400	233.8
200	33.4	1 500	250.5
250	41.75	1 600	267.2
300	50.1	1 700	283.9
350	58.45	1 800	300.6
400	66.8	1 900	317.3
450	75.15	2 000	334
500	83.5	2 100	350.7
550	91.85	2 200	367.4
600	100.2	2 300	384.1
650	108.55	2 400	400.8
700	116.9	2 500	417.5
750	125.25	2 600	434.2
800	133.6	2 700	450.9
850	141.95	2 800	467.6
900	150.3	2 900	484.3
950	158.65	3 000	501
1 000	167	3 100	517.7

3 试验方法研究、结构设计及结果验证

3.1 试验方法研究及试验参数选择

图1中, Line1和Line2两回路完成同步后, 回路Line1中, GCB1首先切掉电流, 该回路上A-B点无电流通过, 但导体处于高电位, 其回路的简化图^[12-13]如图4所示, 该回路的状态和GB/T 1985中附录F.6.108.5.3的工况相同, 因此启动开关的容性电流开断试验可参考GB/T 1985《高压隔离开关和接地开关》中附录F.6.108.5.3。但在图1中, 在启动开关Q2进行合闸时, 回路Line1中的GCB2处于分闸状态, 回路Line2中的GCB1处于分闸状态, 启动开关Q2断口两侧不带电, 启动开关Q2合闸过程中断口间不存在电压, 不产生击穿电弧, 因此启动开关只须考虑通行容性电流的开断试验, 关合试验无须进行。



说明:
DT为被试隔离开关。

图4 GB/T 1985的试验方式3简化原理图

Fig. 4 Simplified schematic diagram of test method 3 in GB/T 1985

以某抽水蓄能电站为基础, 启动开关容性电流开断试验参数, 需要考虑其额定电压(24 kV)、额定频率(50 Hz)和封闭母线尺寸, 参考表1所计算的容性电流值, 同时根据抽水蓄能电站中, 启动回路封闭母线长度规模, 并考虑到更大规模的抽水蓄能电站情况, 试验参数考虑选择两个档次, 具体见表2。

表2 容性电流开断试验参数

Tab.2 Capacitive current breaking test parameters

额定电压 U_e/kV	额定频率 f/Hz	容性电流 I/mA	备注
24	50	50	相当于 300 m 封闭母线
24	50	150	相当于 900 m 封闭母线

3.2 结构设计及计算

启动开关要具有开断容性电流能力, 其难点在于: 断口以空气为绝缘介质, 断口距离小, 且触头运动速度慢, 导致燃弧时间长, 触头烧蚀严重。将启动开关的触头设计成弧回路和主回路, 其中弧回路触头系统前端设计了耐烧蚀结构, 耐烧蚀结构为耐电弧烧蚀的铜钨材料, 承担容性电流开断; 主回路承担额定电流长期通流; 在分闸过程中, 主回路触头先脱离, 弧回路触头后脱离, 从而保证开断时的起弧点在弧回路上。

为保证在分闸过程中, 弧回路电场强度始终大于主回路的电场强度, 使电弧保持在弧回路上。针对分闸过程中, 不同位移条件下进行动态电场分步计算, 校核启动开关在分闸过程中的电场变化, 优化相应结构, 以避免开断过程中电弧由弧回路转移到主回路上, 烧蚀主回路的触头。

计算中高电压取值145 kV, 低压侧取值0 kV, 图5为不同位移条件下的电场强度云图, 主回路和弧回路电场强度结果见表3。表3中, 弧回路电场强度值始终大于主回路电场强度值, 从而确保容性电流开断过程中避免主回路的触头烧蚀, 有效提高启动开关的电气使用寿命。

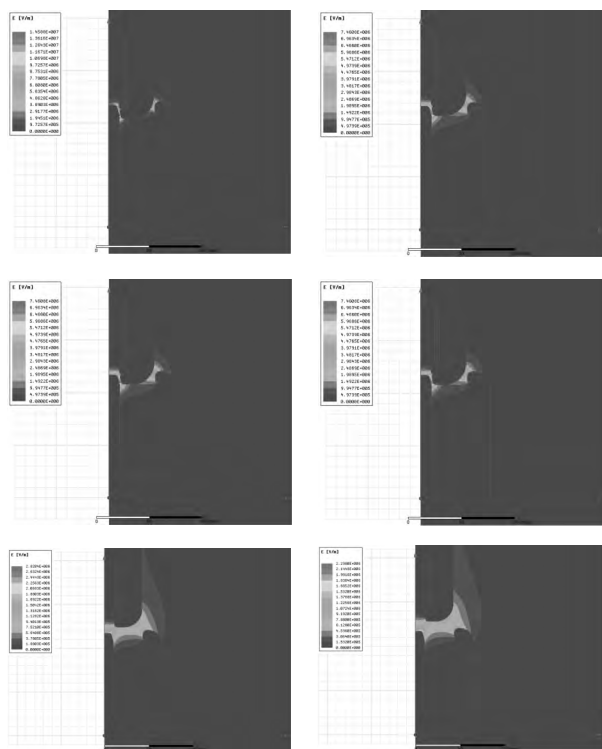


图5 不同位移电场计算云图

Fig. 5 Cloud chart of electric field calculation at different displacements

表3 电场计算值

Tab. 3 Electric field calculation value

(单位: kV/mm)

位移	动侧 145 kV, 静侧 0 kV		动侧 0 kV, 静侧 145 kV	
	弧回路	主回路	弧回路	主回路
0	14.5	6.8	14.5	6.88
4	7.46	3.48	7.48	3.49
8	6.35	2.11	6.39	2.13
12	4.86	1.62	4.91	1.63
16	3.62	1.20	3.64	1.21
20	2.82	0.940	2.84	0.946
24	2.29	0.766	2.28	0.760

3.3 试验结果验证

为保证启动开关产品在工程应用中^[14-15],

具有较好的耐烧蚀能力, 针对启动开关的耐烧蚀触头结构, 通过容性电流开断试验进行相关结构功能验证, 以保证其耐烧蚀能力。根据3.1节中所确定的试验参数(电压 $24/\sqrt{3}$ kV, 试验电流50 mA/150 mA, 50次), 参考GB/T 1985《高压隔离开关和接地开关》中附录F.6.108.5.3, 进行容性电流开断试验, 试验样机如图6所示, 各完成50次试验后, 动静弧触头没有明显烧蚀痕迹, 如图7所示, 轻微的泛黄, 用杜邦纸能够轻易擦掉。

通过试验验证, 启动开关在弧触头结构条件下具有较好的耐受电弧烧蚀能力, 且具备开断容性电流的工况需求。

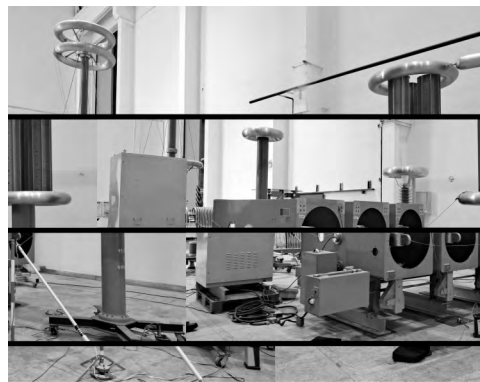
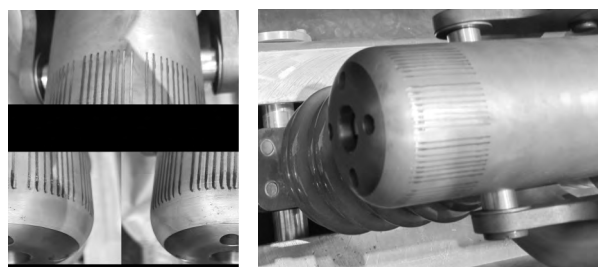


图6 容性电流开断试验

Fig. 6 Capacitive current breaking test



(a) 50 mA, 50次试验后

(b) 150 mA, 50次试验后

图7 试验后的触头表面

Fig. 7 Contact surface after test

4 结束语

综上所述, 通过对抽水蓄能电站用启动开关的工况分析, 对容性电流产生的原理进行分析计算等, 诠释了启动开关要具备容性电流开断能力

的必要性。为实现启动开关产品具备容性电流开断能力,研究了容性电流开断试验的试验参数、试验依据和试验方法。在启动开关研发过程中,设计了触头系统的耐烧蚀结构,通过仿真计算和多轮的优化,使分闸过程中弧回路电场强度值始终大于主回路电场强度值,以保证开断过程中电弧在弧触头上烧蚀,并在试验样机上对相应参数进行试验验证,达到预期目的,解决了启动开关触头被烧蚀问题。为抽水蓄能电站用启动开关的国产化产品增添新亮点,同时大幅度降低启动开关的检修频率,为客户减少近百万元维修费用和维修时间,从而满足抽水蓄能工程应用需求,降低运营成本。

参考文献

- [1] 张娜,黄和,等.抽水蓄能电站消纳新能源作用分析[J].水力发电,2021,47(6):105-108.
- [2] 孙望良,梅亚东,等.面向清洁能源消纳的抽水蓄能电站运行方式研究[J].中国农村水利水电,2020(12):172-179.
- [3] 林铭山.抽水蓄能发展与技术应用综述[J].水电与抽水蓄能,2018,4(1):1-4.
- [4] 邵宜祥,纪历.可变速抽水蓄能机组在抽水工况下的启动方案[J].电力系统自动化,2016,40(24):125-130.
- [5] 颜全椿,范立新,徐钢,等.抽水蓄能机组SFC强迫换流阶段协调配合与保护整定计算[J].电气技术,2017,18(8):43-46.
- [6] 吕宏水,冯勇,朱晓东.抽水蓄能机组背靠背启动的研究[J].水电厂自动化,2006(4):182-189.
- [7] 骆林,马志云.抽水蓄能电动发电机组背靠背启动过程仿真研究[J].大电机技术,2005(1):11-14.
- [8] 方军民.抽水蓄能机组变频启动技术研究[J].水电站机电技术,2012,38(2):17-19.
- [9] 李海波,仇岚.宜兴抽水蓄能电站SFC启动与背靠背启动的比较分析[J].抽水蓄能电站工程建设会议文集,2014:285-288.
- [10] 戈宝军,陶大军,董传友,等.静止变频器启动抽水蓄能电机初始导通方案[J].电工技术学报,2013,28(11):147-154.
- [11] 琚新刚,刘保庆.同轴线导体电容和电感计算理论[J].河南教育学院学报(自然科学版),2005,14(2):26-27.
- [12] 黎斌.SF₆高压电器设计[M].4版.北京:机械工业出版社,2010.
- [13] 高压交流隔离开关和接地开关:GB/T 1985—2014[S].
- [14] 周喜军,周攀,等.抽水蓄能机组背靠背启动策略分析与研究[J].水电自动化与大坝监测,2014,38(6):69-71.
- [15] 高从闯,张存建,陈忠宾.溧阳抽水蓄能电站机电设备选型及特点[J].抽水蓄能电站工程建设会议文集,2018:315-319.

作者简介

吕军玲(1982—),男,高级工程师,研究方向:从事高压开关电器产品的研发工作。

(收稿日期:2022-07-10)