第 49 卷 第 2 期：803-811 高电压技术 Vol.49, No.2: 803-811
2023 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220357

500 kV 快速开关型故障限流器的罐式快速开关

王文杰[1]，赵赢峰[1]，许元震[1]，吕　玮[1]，杨　兵[1]，方太勋[1,2]
（1. 南京南瑞继保电气有限公司，南京 211100;
2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司)，南京 211106）

摘　要：快速开关型故障限流器是有效限制短路电流的方案之一。该研究提出一种适用于 500 kV 故障限流器的多断口串联罐式快速开关，该开关采用气体绝缘金属封闭式结构，断口采用真空绝缘形式。操作机构采用电磁斥力机构，开展三维有限元仿真优化有效提升斥力机构的出力效率，平均分闸速度>5 m/s。对地绝缘方面，开展了断口绝缘屏蔽结构的电场仿真优化机绝缘试验，结构优化后场强最大为 18 kV/mm。端间绝缘方面，开展了整机的杂散电容仿真、均压效果仿真与试验验证，通过配置均压电容不均压系数限制在 1.24 以下。最后搭建整机样机，进行了短路开断试验，试验结果表明：罐式快速开关具备快速开断 50 kA 电流的能力，全开断时间小于 15 ms。
关键词：快速开关；真空灭弧室；电磁斥力；电场仿真；绝缘试验；杂散电容；均压

Tank-type Fast Switching of 500 kV Fast-switching Fault Current Limiter

WANG Wenjie[1], ZHAO Yingfeng[1], XU Yuanzhen[1], LÜ Wei[1], YANG Bing[1], FANG Taixun[1,2]
(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211100, China;
2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211006, China)

Abstract: Fast switching fault current limiter is one of the effective schemes to limit short-circuit currents. In this study, a multi-fracture series tank-type fast switch suitable for 500 kV fault current limiter is proposed, in which gas insulated metal enclosed structure and vacuum insulated fracture are adopted. The operating mechanism adopts electromagnetic repulsion mechanism, three-dimensional finite element simulation and optimization are performed to effectively improve the output efficiency of repulsion mechanism, and the average opening speed is greater than 5 m/s. In terms of ground insulation, the insulation tests for electric field simulation optimization machine of fracture insulation shielding structure are carried out, and the maximum field strength after structural optimization is 18 kV/mm. In terms of inter terminal insulation, the stray capacitance simulation, equal-voltage effect simulation and test verification of the whole machine are carried out. By configuring the voltage equalizing capacitor, the non-equal-voltage coefficient is limited to less than 1.24. Finally, the prototype of the whole machine is built and the short-circuit breaking test is carried out. The test results show that the tank-type fast switch has the ability to quickly break 50 kA current, and the total breaking time is less than 15 ms.
Key words: fast-switching; vacuum arcing chamber; electromagnetic repulsion; electric field simulation; insulation test; stray capacitance; voltage equalizing

0　引言

500 kV 等级电网已成为各省区电网的主网架，为了满足不断增加的用电负荷需求和供电可靠性要求，网架结构不断增强、串补设备大量应用，导致 500 kV 枢纽变电站的等值阻抗不断降低，短路电流超标问题十分突出，严重影响电网运行安全，成为当前电网必须解决的问题[1]。

解决短路电流超标问题的措施主要有调整电网结构、改变系统运行方式、加装故障限流器[2-4]。调整电网结构需要巨大的投资，改变系统运行方式将牺牲供电可靠性[5]，加装故障限流器是一种经济、有效的手段。故障限流器主要分为超导型[6]、电力电子型[7]、串联谐振型[8]和快速开关型[9]。快速开关型故障限流器相对于其它类型限流器拥有损耗低、成本低、电磁污染少、结构简单、控制简单等优势[2]，适合于工程应用推广。目前 220 kV 快速开关型故障限流器已有工程应用，能够快速有效地限制短路电流幅值[10]。有必要研制 500 kV 快速开关型

基金资助项目：国网电力科学研究院科技项目(JS2000546)。
Project supported by Science and Technology of State Grid Electric Power Research Institute(JS2000546).

故障限流器用于解决工程实际问题。

快速开关型故障限流器主要由具备快速分合能力的机械式开关和限流电抗器并联组成，其中快速开关是故障限流器的关键设备。220 kV 快速开关可以采用隔离供能技术，将操作机构与断口等电位，从而取消绝缘拉杆，解决对地绝缘难题[10]。500 kV 快速开关若仍沿用该技术路线，500 kV 隔离变的体积及成本将成为工程化的极大障碍。500 kV 快速开关保留绝缘拉杆，外绝缘采用 SF_6 气体绝缘金属全封闭结构。真空灭弧室是快速开关中负责开合的核心部件[11]，由于真空灭弧室寿命与承受气压成反比，为保证真空灭弧室寿命，金属筒内绝缘气体气压比常规 500 kV 等级发电机断路器(generator circuit breaker, GCB)要小[12-14]，对地绝缘设计是一大考验。受制于单个真空灭弧室的性能，500 kV 快速开关需要串联多个真空灭弧室，串联个数过多会导致不均压问题突出[15-18]，又对单个真空灭弧室提出更严酷的考验。有必要针对快速开关开展电气设计和试验研究，保障设备运行安全。

本文提出一种 500 kV 多真空断口串联的罐式快速开关，保留绝缘拉杆，对地气体绝缘，不需要隔离供能。通过三维电磁场仿真和磁回路优化设计，有效提升斥力机构的出力效率，保证大运动质量下的分闸速度。针对对地与端间绝缘，开展了建模仿真、优化和试验验证工作，通过整机绝缘试验。最后搭建了整机样机，并通过了第三方试验机构的短路开断试验。

1 设备结构和参数

1.1 设备结构

500 kV 罐式快速开关电气结构如图 1(a)所示，由 6 个真空灭弧室串联组成，每个断口均放置于 SF_6 罐体内进行外绝缘保护，两侧通过出线套管串联在电网线路中；整机实际结构如图 1(b)所示，每个真空灭弧室安装于一个金属罐体内，整机外观上为 6 个金属罐体串联；各真空灭弧室之间、真空灭弧室与出线套管之间通过管母连接，连接位置设计了金属屏蔽罩对电场进行优化；单个金属罐体内，真空灭弧室安装于两个金属屏蔽罩之间，真空灭弧室外安装有绝缘套管用于固定两个金属屏蔽罩，绝缘拉杆安装于下部金属屏蔽罩与底部金具之间，绝缘拉杆外安装有绝缘套管用于固定下部金属屏蔽罩与底部金具。

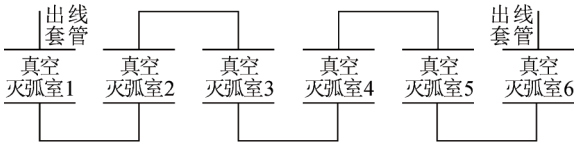
1.2 开关操作机构

在需要快速分合闸的开关领域，如故障限流器和混合式直流断路器等产品，普遍采用电磁斥力操动机构，从而实现快速分合闸动作、操动机构简单可靠等要求。电磁斥力快速开关的工作原理如图 2 所示，预先充电的储能电容向分闸或合闸线圈放电，斥力盘由于线圈上的脉冲电流产生感应涡流，涡流产生的磁场与线圈脉冲电流产生的磁场相互作用，从而推动斥力盘和连杆运动，实现开关真空灭弧室的分合闸动作。

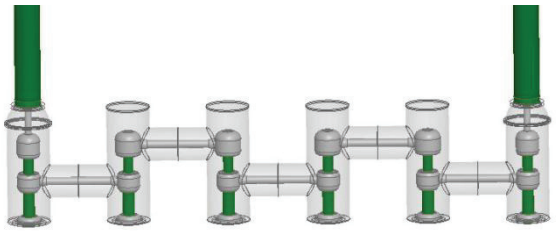
1.3 绝缘参数

500 kV 罐式快速开关断口采用真空绝缘，对地采用 SF_6 气体绝缘，需验证 6 个真空灭弧室串联后的断口绝缘和罐体内金具与内壁的对地绝缘性能。快速开关处于分位时，由于罐体内金具与罐体内壁之间杂散电容的存在，导致真空灭弧室电压分布不均，有必要对均压系数进行测量，指导单个真空灭弧室电气参数及均压措施的设计。

根据产品实际运行工况和标准要求[19-20]，确定 500 kV 气体绝缘快速开关绝缘试验项目见表 1。



(a) 电气结构



(b) 实物结构

图 1 500 kV 罐式快速开关结构

Fig.1 Structure of 500 kV tank type fast switching

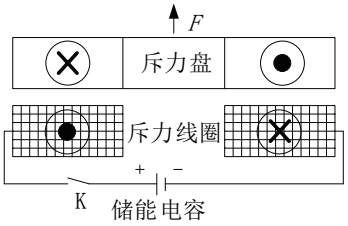


图 2 斥力操作机构原理图

Fig.2 Principle diagram of electromagnetic repulsion mechanism

表 1　500 kV 罐式快速开关绝缘试验项目

Table 1　The insulation test project of 500 kV tank type fast switching

试验项目	工频耐压/kV，局放电压/kV	操作冲击耐受电压/kV	雷电冲击耐受电压/kV
对地	740，381	1175	1550
均压	55	55	17
端间	740，381	1175	1550

2　斥力机构设计与仿真

500 kV 罐式快速开关不采用隔离供能技术，操作机构与断口处于不同电位，需保留绝缘拉杆。开关运动部件质量的增加，对电磁斥力机构的出力特性有了更高的要求，有必要开展斥力机构设计和优化工作，提升斥力机构转换效率。

2.1　斥力机构仿真优化

影响电磁斥力机构出力特性的主要因素包括：储能电容、斥力线圈、斥力盘以及双稳机构等。采用 Ansys 三维电磁场仿真软件可对电磁斥力机构的上述主要因素进行联合求解，按照表 2 参数进行仿真三维模型设计。考虑仿真计算效率，仿真模型进行了简化处理，仿真模型主要包括关键零件斥力盘、线圈盘、支撑板。

通过仿真发现，分合闸线圈周围支撑材料对电磁斥力的出力特性影响很大，如采用常规的铝材料支撑会产生涡流消耗部分转化能量，不利于电磁效率的转化。在保持储能电容容值、电压值和分合闸线圈感值的前提下，对线圈上下和包围支撑材料进行更换和仿真，多种组合的仿真结果见表 3。

对比仿真显示：将斥力线圈、斥力盘中的磁力线有效约束在开关运动范围内，通过磁回路分区闭合和切割的方式，可以解决磁轭带来的环流损耗问题，有效提升斥力机构的出力效率。升级材料前后线圈磁场仿真图对比见图 3。线圈支撑结构件应选用磁导率高导电率小的材质，如纯铁、硅钢等材料；考虑磁饱和问题，支撑板应尽量设计厚一些。

2.2　斥力机构仿真结果

根据仿真优化情况，更换分合闸线圈支撑材料后，从晶闸管导通放电开始到触头分离的分闸时间(刚分时间)<1 ms；在 1 ms 附近时刻，斥力达到峰值 119.5 kN，电流达到峰值 9.96 kA；在 2.25 ms 附近时刻，触头分闸速度达到峰值 7.6 m/s；5.25 ms 时刻，触头达到 30 mm 完整开距，平均分闸速度>5 m/s。

表 2　仿真优化模型参数

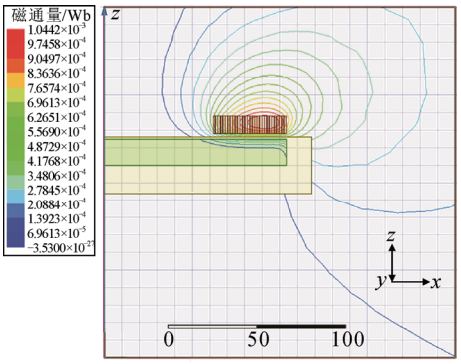
Table 2　Parameters of prototype

项目参数	数值
线圈外半径 R_1/mm	200
线圈内半径 R_2/mm	133
线圈高度 h_1/mm	10
线圈匝数 N	18
斥力盘及连杆质量 m/kg	15
初始间隙 d/mm	2
储能电容容值 C/mF	10
电容电压/V	900
斥力盘材料	铝合金
斥力盘半径/mm	180
线圈盘支撑材料	铝合金/环氧

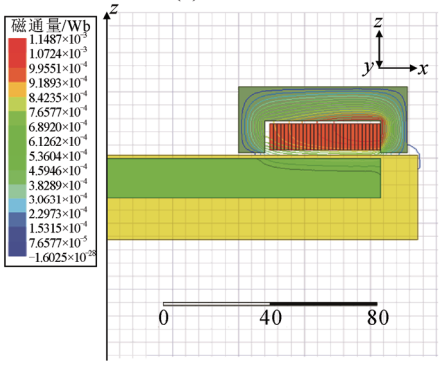
表 3　仿真数据对比

Table 3　Comparison of prototype

线圈上下支撑板	线圈骨架支撑	电流峰值/kA	斥力峰值/kN	触发分闸时间/ms	最大分闸速度/(m·s^{-1})
铝	环氧	11.0	100	6.7	5.9
	环氧	11.2	108	6.0	6.4
铁	环氧	10.4	113	5.7	7.1
铁	铁	9.9	119	5.2	7.6



(a) 优化前仿真磁场



(b) 优化后仿真磁场

图 3　斥力操作机构仿真磁场对比

Fig.3　Simulation comparision of electromagnetic repulsion mechanism

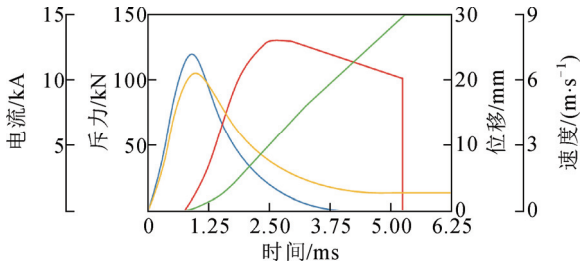


图 4 斥力机构仿真结果图

Fig.4 The simulation diagram of electromagnetic repulsion mechanism

3 对地绝缘设计与试验

对地绝缘试验时，快速开关处于合位，罐体内所有金具均为高压，金属罐壁为地电位。各罐体内结构一致，两个带出线套管的罐体与中间 4 个罐体相比，只是取消了顶部盖板，换成出线套管。出线套管结构复杂，场强比只有顶部盖板的罐体更严酷，前期设计时，仅需考虑对带出线套管的罐体进行优化设计，即可保证整机的对地绝缘性能。

3.1 单个罐体对地绝缘设计

对于气体绝缘金属全封闭产品设计时，考核绝缘间隙最严酷的工况是雷电冲击工况[21]。故本文以雷电冲击工况开展对地绝缘设计。

对单个罐体进行建模，开展电场仿真，仿真模型如图 5 所示。罐体内金具电位为 1550 kV，罐体电位为 0 kV。材料属性如表 4 所示。

罐体内场强云图如图 6 所示，最大场强出现在两个屏蔽罩相对的边缘位置，最大场强值为 22 kV/mm。

SF_6 气体绝缘设备场强限值 E_1 如表 5 所示[21]。表中 E_1 值适用于同轴圆柱形电极，其他偏离这种电场的非同轴圆柱形稍不均匀电场(不均匀系数≤2)的产品，如 GIS 中三相共箱的 DS 的断口间、三相触头间及母线间，其设计基准 E_{1a} 值应小于表 5 所列 E_1 值，建议取 E_{1a}=0.85E_1(系数 0.85 参考了某些产品的测试值)。

考虑真空灭弧室的寿命，选择 0.4 MPa 作为 500 kV 快速开关 SF_6 气体的气压，则设计场强限值选择为 E_{1a}=20.4 kV/mm。

单个罐体内中部金具上最大场强为 22 kV/mm，不满足要求。由于最大场强出现在两个屏蔽罩相对的边缘位置，下面对屏蔽罩进行结构优化。针对屏蔽罩结构，优化方向为保持 R_1 曲率不变，降低 R_2 和 R_3，使 R_3 位置产生内卷的效果，如图 7 所示。

表 4 快速开关材料属性

Table 4 The material properties of fast switching

部件	电导率/(S·m^{-1})	相对介电常数
金属罐体	1.03×10^7	—
罐体内部金具	3.8×10^7	—
罐体内部绝缘件	0	3.6
SF_6 区域	0	1

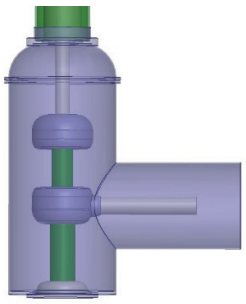


图 5 单个罐体电场仿真模型

Fig.5 The electric field simulation model of single tank

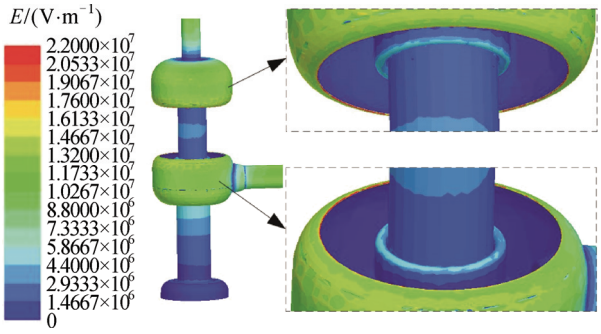


图 6 单个罐体内部电场云图

Fig.6 The electric field cloud diagram inside a single tank

表 5 SF_6 气体绝缘设备场强限值

Table 5 The material properties of fast switching

SF_6 表计气压/MPa	E_1/(kV·mm^{-1})
0.3	20
0.4	24
0.5	29

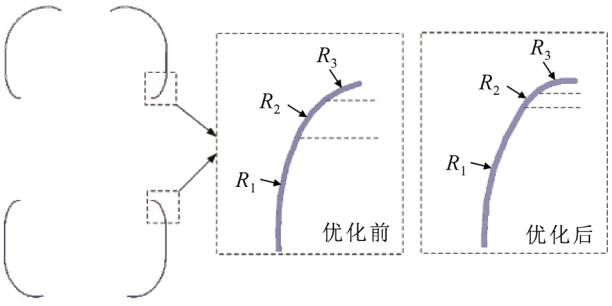


图 7 屏蔽罩结构优化

Fig.7 Optimization of shield structure

优化后单个罐体内场强云图如图 8 所示，最大场强仍出现在两个屏蔽罩相对的边缘位置，场强值为 18 kV/mm，满足要求。

3.2 对地绝缘试验

单个罐体对地绝缘试验，真空灭弧室处于合位，金属罐体接地，电压施加在套管顶部金具上，罐体内部 SF_6 气压 0.4 MPa。雷电冲击约±1550 kV 各 15 次通过；操作冲击±1175 kV，各 15 次通过；工频耐压 740 kV 通过，381 kV 时局放为 3 pC。

整机对地绝缘试验，真空灭弧室处于合位，金属罐体接地，电压施加在套管顶部金具上，罐体内部 SF_6 气压 0.4 MPa。雷电冲击约±1550 kV 各 15 次通过；操作冲击±1175 kV，各 15 次通过；工频耐压 740 kV 通过，381 kV 时局放为 4 pC。

4 端间绝缘设计与试验

4.1 杂散电容计算

500 kV 气体绝缘快速开关在运行时承受工频、操作冲击、雷电冲击等交变电压，各真空灭弧室断口之间均压主要受电容影响，对于气体绝缘金属全封闭类设备，内部金具与筒壁之间杂散电容较大，导致真空灭弧室断口不均压严重，需要掌握内部金具与筒壁之间杂散电容大小，以便采取合理的均压措施[15-18]。杂散电容通过仿真获得。

杂散电容仿真模型见图 9，将快速开关罐体内部金具电位定义为 U_1~U_7，筒壁电位接地(GND)。根据仿真模型，500 kV 快速开关整机各电位之间的杂散电容如表 6 所示。

4.2 均压优化设计

空气绝缘类产品开展不均压系数测量结果表明，雷电工况下不均压系数大于操作冲击工况，故本节对雷电冲击工况下的均压特性进行扫描。

500 kV 快速开关整机均压特性仿真模型如图 10 所示，图中 C_a、C_b、C_c 为各断口并联的均压电容，由于故障可能发生在快开的两侧，故均压电容按对称布置；C_{12} 为 U_1 和 U_2 之间杂散电容，C_{23}、C_{34}、C_{45}、C_{56}、C_{67}、C_{17} 依次类推；C_{1GND} 为 U_1 和 GND 之间杂散电容，C_{2GND}、C_{3GND}、C_{4GND}、C_{5GND}、C_{6GND}、C_{7GND} 依次类推；U_s 为电压源。

均压电容越大，不均压系数越小，但均压电容过大会导致熄弧困难，并增加重燃弧概率[15-18]。综合考虑后，电容 C_a、C_b、C_c 选取 6000~8000 pF 区间进行扫描，步长 100 pF，得到最小不均压系数为

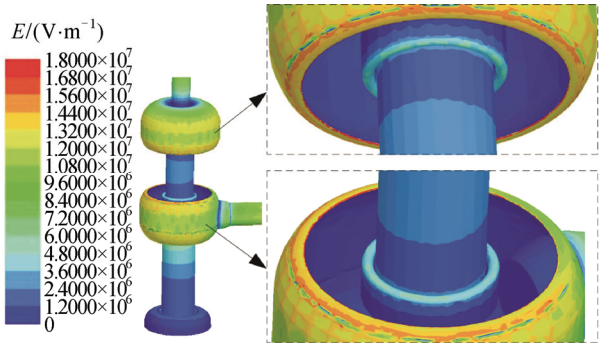


图 8 单个罐体优化结构后内部电场云图

Fig.8 The internal electric field cloud map after the optimized structure of a single tank

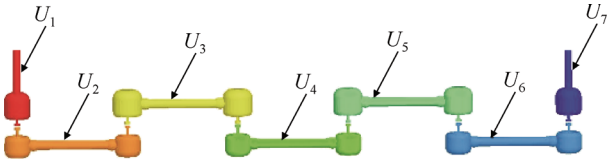


图 9 500 kV 快速开关整机杂散电容仿真模型

Fig.9 Simulation model of stray capacitance of 500 kV fast switching

表 6 500 kV 快速开关整机杂散电容仿真值

Table 6 Simulation value of stray capacitance of 500 kV fast switching

金具之间	容值/pF	金具之间	容值/pF
U_1–GND	194.9	U_1–U_2	8.58
U_2–GND	153.7	U_2–U_3	8.73
U_3–GND	190.7	U_3–U_4	8.75
U_4–GND	153.5	U_4–U_5	8.76
U_5–GND	190.8	U_5–U_6	8.75
U_6–GND	153.8	U_6–U_7	8.61
U_7–GND	196.2	U_1–U_7	10.50

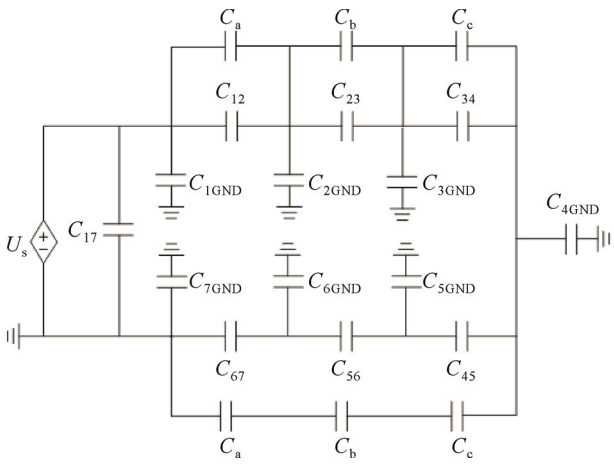


图 10 500 kV 快速开关整机均压特性仿真模型

Fig.10 Simulation model of uniform voltage characteristic of 500 kV fast switching

1.19，此时真空灭弧室 1 和 6 的均压电容为 6000 pF，真空灭弧室 2—5 的均压电容为 5600 pF，各真空灭弧室断口电位如图 11 所示。若不配置均压电容 C_a、C_b、C_c，各真空灭弧室断口电位如图 11 所示。从图中看出，无均压电容时，整机端间电压基本上被施加在第一个真空灭弧室断口间。

考虑工程实际应用情况和型号统一，最终真空灭弧室断口 1~6 的均压电容配置为 6000 pF，此时仿真得到不同类型电压下的不均压系数如表 7 所示。均压电容一般为圆柱形结构，布置在罐体内部，与真空灭弧室并联连接，罐体内径尺寸变大，但不影响罐体高度。

4.3 均压试验验证

整机真空灭弧室断口均压测量方法如图 12 所示，采用分压器测量每个真空灭弧室断口间电压，测量断口 1 和断口 2 的分压器低压线等电位并接入同一个前端，测量断口 3 和断口 4 的分压器低压线等电位并接入同一个前端，断口 5 和断口 6 的分压器低压线等电位并接入同一个前端。前端由于带电放置于绝缘子上隔离地电位。

试验结果如图 13 所示，不同类型电压下，试验得到的不均压系数与仿真值基本一致。

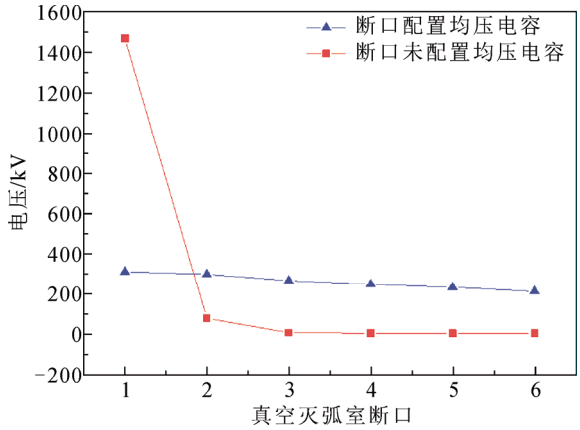


图 11 雷电冲击电压下配置和未配置均压电容时各真空灭弧室断口端间电位

Fig.11 The potential between the fracture ends of each vacuum interrupter when the equal-voltage capacitor is configured or not configured under lightning impulse voltage

表 7 500 kV 快速开关整机不同类型电压下不均压系数

Table 7 Non-uniform voltage coefficient of 500 kV fast switching under different types of voltages

电压类型	雷电	操作	工频
断口 1 不均压系数	1.211	1.235	1.235

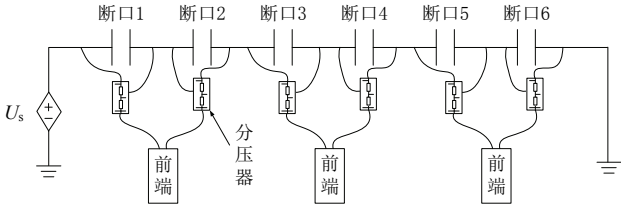


图 12 整机均压试验接线图

Fig.12 Uniform voltage test wiring diagram of the whole machine

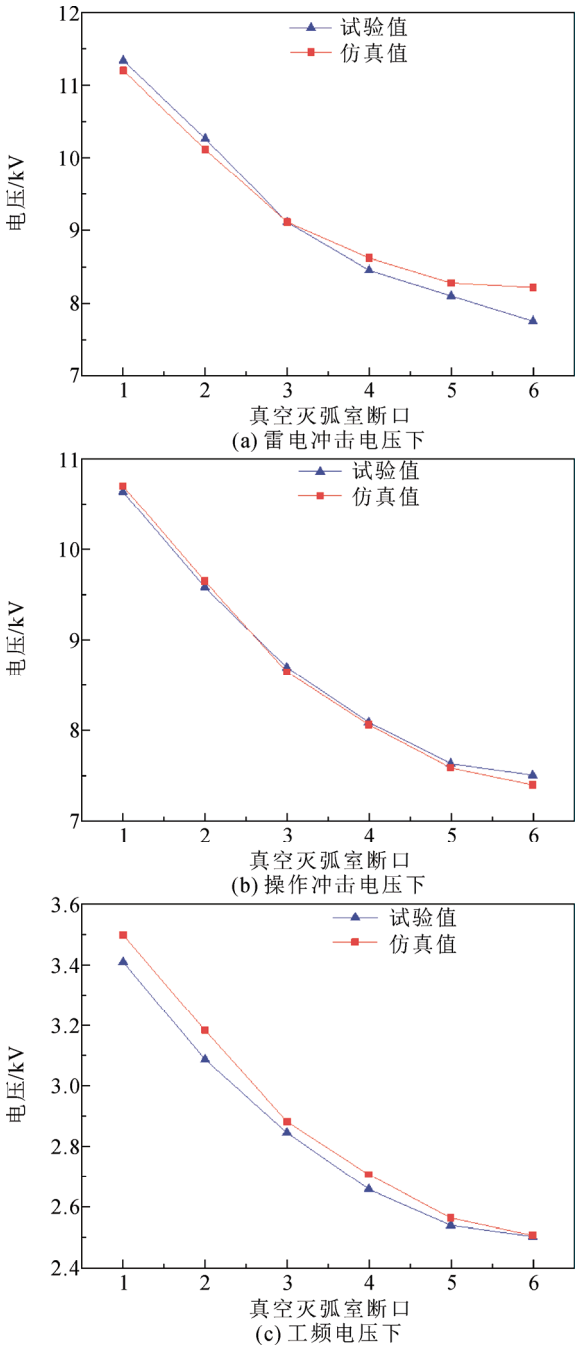


图 13 不同类型电位下整机均压特性仿真值和试验值对比

Fig.13 Simulation value and test value of uniform voltage characteristic under different types of potential are compared

4.4 整机端间绝缘试验与定型

端间绝缘试验，真空灭弧室处于分位，气压 0.4 MPa，雷电冲击电压约±1550 kV 各 15 次通过；操作冲击电压±1175 kV，各 15 次通过；工频耐压 740 kV 通过，381 kV 时局放为 3 pC。

根据实测最大不均压系数可得：单个真空灭弧室断口雷电冲击耐压要求 320 kV，操作冲击耐压要求 243 kV，工频耐压要求 153 kV。考虑到一度裕度，实际选择的真空灭弧室参数如表 8 所示。

5 整机试验

以理论分析和仿真结果为基础，试制了适用于 500 kV 快速开关型故障限流器的罐式快速开关样机，整体参数如表 9 所示，设备外观如图 14 所示。

整机试验主要对快速开关进行了 T100a 分闸、T100s(a)合闸、温升和机械特性试验项目，试验原理和参数参考《GB1984—2014 高压交流断路器》和《GB/T4473—2008 高压交流断路器合闸试验》。T100a 分闸和 T100s(a)合闸试验参数分别如表 10、表 11 所示，重点验证快速开关整机在长、中和短燃弧时间下的非对称电流开断和关合能力。温升试验在 4 kA 长期试验电流下各部件温升小于国标要求，机械特性试验中合闸实测时间范围 23.0~23.8 ms，分闸实测时间范围 1.0~1.1 ms(刚分)。

由于故障限流器在短路故障发生后应快速动作，此时短路电流的直流分量得不到有效衰减，相对于传统断路器，故障限流器中快速开关开断时刻的直流分量更高。图 15 是 T100a 的长燃弧试验波形。开断电流 51.1 kA，电流直流分量 50%，工频恢复电压 396 kV，TRV 峰值–718 kV，燃弧时间 13.6 ms，刚分时间 1.0 ms，全开断时间 14.6 ms。

表 8 单个真空灭弧室电气参数

Table 8 Electrical parameters of a single vacuum arcing chamber

电压类型	额定电压	雷电冲击	工频
耐压要求/kV	72.5	380	160

表 9 500 kV 罐式快速开关主要参数

Table 9 Parameters of 500 kV tank type fast switching

项目参数	数值
额定电压/kV	500
额定电流/A	4000
额定短路开断电流/kA	50
断口数量	6
刚分时间/ms	≤1
合闸时间/ms	≤20
动作分散性/%	±10
雷电冲击电压/kV	1550



图 14 500 kV 罐式快速开关样机图

Fig.14 Prototype picture of 500 kV tank type fast switching

表 10 500 kV 罐式快速开关 T100a 分闸试验数据

Table 10 Parameters of 500 kV tank type fast switching T100a switch-off test

试验方式	开断电流/kA	直流分量/%	暂态恢复电压峰值/kV	工频恢复电压峰值/kV	燃弧时间/ms
T100a	50.0	13	821	396	4.7
T100a	50.3	36	717	393	7.3
T100a	51.1	50	718	394	13.6

表 11 500 kV 罐式快速开关 T100s(a)合闸试验数据

Table 11 Parameters of 500 kV tank type fast switching T100s(a) switch-on test

试验方式	关合电流/kA	关合电压/kV	合闸相角/(°)	关合时间/ms
T100(a)	50.3	451	97.2	14.9

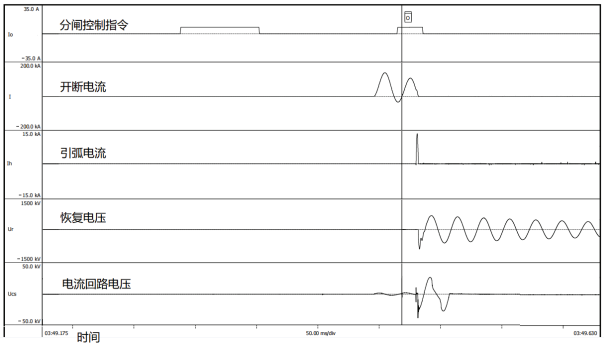


图 15 T100a 试验波形图

Fig.15 T100a test waveform

6 结论

1）快速开关保留绝缘拉杆后不需要高电位供能，但对电磁斥力机构的出力特性要求更高。分合闸线圈周围支撑材料对电磁斥力的出力特性影响大，线圈支撑结构件应选用磁导率高导电率小的材质，将斥力线圈、斥力盘中的磁力线有效约束在开关运动范围内。磁回路分区闭合切割，可以解决磁轭带来的环流损耗问题，有效提升斥力机构的出力效率。

2）根据对地绝缘仿真结果，最大场强出现在屏蔽罩相对的边缘位置，最大场强值超过 20 kV/mm。通过对上下屏蔽罩边缘曲率进行优化，使得屏蔽罩边缘位置产生内卷的效果，最大场强为 18 kV/mm，场强满足要求。

3）罐式快速开关内部金具与筒壁之间杂散电容大，断口两端金具对地杂散电容约 150 pF 和 190 pF，断口间杂散电容约 8.7 pF。未配置均压电容时，整机端间电压基本上被施加在第一个真空灭弧室断口间。配置 6000 pF 均压电容后，雷电冲击、操作冲击和工频的不均压系数为 1.24，不均压系数仿真和试验结果较一致。

4）在短路故障发生后故障限流器快速动作，短路电流直流分量得不到有效衰减。重点验证快速开关整机在长、中和短燃弧时间下的非对称电流开断能力，刚分时间 1.0 ms，长燃弧时间 13.6 ms，全开断时间 14.6 ms。此外对关合、温升和机械特性等试验进行测试。

参考文献 References

[1] 杨振纲，李 力，李扬絮，等. 广东电网短路电流超标问题及对策[J]. 南方电网技术，2011，5(5)：90-93.
YANG Zhen'gang, LI Li, LI Yangxu, et al. The issue of short-circuit current being out of limitation in Guangdong power grid and related countermeasures[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(5): 90-93.

[2] 郭 京. 基于快速开关的故障限流器及其节能应用研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2017.
GUO Jing. Research on fault current limiter based on fast switching technology and its energy saving application[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2017.

[3] 陈丽萍，余欣梅，钟杰峰，等. 500 kV 超导限流器在广东电网应用选点研究[J]. 电网与清洁能源，2013，29(8)：48-53.
CHEN Liping, YU Xinmei, ZHONG Jiefeng, et al. Research one selection of installation site of the 500 kV superconducting current limiter in Guangdong power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(8): 48-53.

[4] 樊 扬，吴丹莉，张步涵，等. 广东 500 kV 电网短路电流来源及影响因素分析[J]. 南方电网技术，2015，9(8)：83-87.
FAN Yang, WU Danli, ZHANG Buhan, et al. Analysis on origin and influencing factors of short-circuit current in Guangdong 500 kV power grid[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(8): 83-87.

[5] 吴丹莉. 广东 500kV 电网短路电流问题研究[D]. 武汉：华中科技大学，2016.
WU Danli. Research on short-circuit current of Guangdong 500kV power grid[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.

[6] 舒 彬，陈志莉，任安林，等. 超导限流器在解决电网短路电流中的应用分析[J]. 电网与清洁能源，2012，28(5)：19-23.
SHU Bin, CHEN Zhili, REN Anlin, et al. Application of superconducting fault current limiters in resolving short-circuit currents in power grids[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(5): 19-23.

[7] 谭凌云，吴兆麟. 桥式固态短路限流器在电网中的应用研究[J]. 电力系统自动化，2000，24(18)：41-44.
TAN Lingyun, WU Zhaolin. Application research of bridge type solid state current limiter on power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(18): 41-44.

[8] 张志丰，肖立业，邱清泉，等. 一种改进串联谐振型限流器[J]. 电工技术学报，2015，30(6)：169-177.
ZHANG Zhifeng, XIAO Liye, QIU Qingquan, et al. An improved series-resonant type fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 169-177.

[9] 胡泰山，蔡汉生，刘 刚，等. 500 kV 限流电抗器接入 90 kA 短路电流系统时瞬态恢复电压抑制分析[J]. 南方电网技术，2019，13(12)：53-59.
HU Taishan, CAI Hansheng, LIU Gang, et al. Analysis of transient recovery voltage restrictive measures when 500 kV current limiting reactor connected to 90 kA short-circuit current system[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(12): 53-59.

[10] 吕 玮，刘云飞，周启文，等. 多断口快速开关型高压故障限流器[J]. 电力系统自动化，2019，43(23)：234-239.
LÜ Wei, LIU Yunfei, ZHOU Qiwen, et al. Fast-switching high voltage fault current limiter with multiple breakers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 234-239.

[11] 闫 静，马志瀛. 高电压等级真空灭弧室绝缘结构的研究[J]. 高电压技术，2005，31(6)：6-8，18.
YAN Jing, MA Zhiying. Research on insulating structure for high voltage vacuum interrupter[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(6): 6-8, 18.

[12] 苏海博，马金伟，王立军，等. 基于流固耦合方法的罐式快速真空开关波纹管与 SF_6 气体压力配合[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1634-1639.
SU Haibo, MA Jinwei, WANG Lijun, et al. Cooperation of tank-type fast vacuum switch bellows and SF_6 gas pressure based on bi-directional coupling method[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1634-1639.

[13] 陈叔平，毛红威，姚淑婷，等. 高真空多层绝热低温管道内管路波纹管应力非线性有限元分析[J]. 天然气工业，2016，36(4)：84-89.
CHEN Shuping, MAO Hongwei, YAO Shuting, et al. Nonlinear finite element analysis on the stress of bellows in HV-MLI cryogenic pipes[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(4): 84-89.

[14] 程 显，田小倩，葛国伟，等. 环保型罐式多断口真空断路器电场分析与优化[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3200-3207.
CHENG Xian, TIAN Xiaoqian, GE Guowei, et al. Electric field analysis and optimization of 126 kV environmental protection gas insulated tank circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3200-3207.

[15] 吴高波，阮江军，黄道春，等. 多断口真空断路器均压电容研究综述[J]. 高压电器，2011，47(3)：77-81.
WU Gaobo, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Review of grading capacitors of multi-break vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3): 77-81.

[16] 吴文海，王 娜，张 浩. 特高压 1100 kV 柱式断路器断口均压电容器配置研究[J]. 电力电容器与无功补偿，2018，39(1)：76-80.
WU Wenhai, WANG Na, ZHANG Hao. Study on grading capacitor allocation across open contacts of 1100 kV live tank circuit breaker[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(1): 76-80.

[17] 吴高波，阮江军，黄道春，等. 126 kV 模块化三断口真空断路器静、动态均压设计[J]. 中国电机工程学报，2013，33(19)：215-223.
WU Gaobo, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Static and dynamic voltage sharing design of 126 kV modular triple-break vacuum circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 215-223.

[18] 舒胜文，阮江军，黄道春，等. 三断口真空断路器的动态均压措施[J]. 电网技术，2010，34(10)：43-48.
SHU Shengwen, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Dynamic voltage-sharing measures for vacuum circuit breakers with triple breaks[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 43-48.

[19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求：GB/T 11022—2011[S]. 北京：中国标准出版社，2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards: GB/T 11022—2011[S]. Beijing, China: China Standards Press, 2012.

[20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 高电压试验技术 第 1 部分：一般定义及试验要求：GB/T 16927.1—2011[S]. 北京：中国标准出版社，2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. High-voltage test techniques—Part 1: General definitions and test requirements: GB/T 16927.1—2011[S]. Beijing, China: China Standards Press, 2012.

[21] 赵赢峰，吕 玮，杨 兵，等. 535 kV 混合式直流断路器端间操作冲击电压试验研究[J]. 高电压技术，2020，46(8)：2684-2691.
ZHAO Yingfeng, LÜ Wei, YANG Bing, et al. Research on end-to-end switching impulse voltage test of 535 kV hybrid DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2684-2691.



王文杰(通信作者)
1987—，男，硕士
主要从事柔性直流输电、交直流快速开断技术的研究工作
E-mail: wangwenjie@nrec.com

WANG Wenjie
Corresponding author

收稿日期 2022-03-19 修回日期 2022-07-25 编辑 曹昭君