

大容量试验系统建模方法及一键顺控方案研究

戴建卓¹, 张思聪¹, 申家铭², 陶闯闯², 陶加贵¹, 陈昱彤¹, 吴鑫², 吴益飞^{2*}

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏省 南京市 210000;

2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049)

Research on Modeling Method and One-key Sequence Control Scheme of Large-capacity Test System

DAI Jianzhuo¹, ZHANG Sicong¹, SHEN Jiaming², TAO Chuangchuang², TAO Jiagui¹, CHEN Yutong¹,
WU Xin², WU Yifei^{2*}

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 210000, Jiangsu Province, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

Abstract: The large-capacity test plays a crucial role in evaluating the performance of power equipment and ensuring their safe and reliable operation. However, the existing large-capacity test setups heavily rely on manual operation, leading to issues such as complex processes, low efficiency, and the possibility of errors. To address the challenge of intelligent control in large-capacity test setups, we have developed a single-motor short-circuit model and a double-motor parallel short-circuit model for short-circuit generators. These models facilitate a streamlined, one-key sequence control operation process for the test setup. By simulating the generator short-circuit model and the overall large-capacity test loop system, we have validated the accuracy of the constructed generator short-circuit model and the effectiveness of the simplified one-key sequence control approach for conducting large-capacity short-circuit tests.

Keywords: large-capacity test; one-key sequence control; impulse generator; short circuit model; intelligent control

摘要: 大容量试验是检验电力装备性能, 保障装备安全可靠运行的重要环节。现有的大容量试验回路主要依靠人工操作, 存在流程复杂、效率低且易出错的问题。针对大容量试验回路智能化控制的难题, 研究建立了冲击发电机单电机短路模型和双电机并联短路模型, 分析了发电机短路特性, 结合典型大容量试验回路设计了一键顺控方案, 提出试验回路一键顺控操作流程。通过对发电机短路模型和大容量试验回路系统的仿真, 验证了所建发电机短路模型的正确性及大容量短路试验一键顺控方案的合理性。

关键词: 大容量试验; 一键顺控; 冲击发电机; 短路模型; 智能化控制

0 引言

电网物资质量检测是优选高质量电力设备的重要举措, 对于电网安全稳定运行至关重要^[1-5]。近年来, 随着物资检测工作的深入开展, 电网物资检测的覆盖范围和工作要求均不断提升, 检测业务量日益增长, 电网物资检测中心的检测能力也面临许多挑战。目前短路类项目试验参数高, 所需电源容量大, 试验方式复杂、步骤繁琐、成本较高, 极大地制约了开展有效试验的效率^[6-9]。现行的大容量短路试验一般是通过人工操作实现的, 效率低且容易出错, 因此进行智能化改造非常有必要。开发大容量短路试验智能化控制平台, 可以大量节省人力、物力, 大大降低了因作业流程不规范导致的系统隐患, 从而做好电网物资质量检测的第一道防线^[10-14]。

按照控制系统主器件的类型和功能, 与变电站类似, 国内外大容量试验站经历了3个发展阶段: 传统的电磁型或晶体管型模拟控制系统; 以微机自动装置、可编程逻辑控制器 (programmable logic controller, PLC) 等为基本组件的自动化控制系统; 以智能组件为基本组成的智能化控制系统^[15-19]。为满足系统安全可靠、人性化服务、智能化等方面的要求, 系统的稳定性、精确性、可靠性及高效性需要进一步提高。智能一键顺控技术, 可由系统自动控制设

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (J2021119)。
Science and Technology Foundation of SGCC (J2021119)。

备运行,减轻人员的工作强度,提高对电气设备操作的准确性、有效性、快捷性。目前一键顺控技术已在多个地区得到应用^[20-23],国网山东省电力公司日照供电公司基于一键顺控系统实现了变电站主设备状态转换的一键顺控操作,效率提高了76%^[24]。与变电站的一键顺控不同,大容量试验一键顺控难点在于试验参数数据库的构建、试验波形分析判读及试验结果分析评价算法的设计,以及试验过程中故障的处理。试验系统需要建立试验参数的数据库,根据输入的目标试验条件,调节各试验回路参数。引入分布式传感器对回路各设备状态进行实时监测,能够对系统出现的偏差和故障进行自动处理,使整个试验过程处于可追溯的状态。

大容量短路发电机试验站典型试验回路的主要设备包括短路发电机、保护断路器、合闸开关、短路变压器、暂态恢复电压(transient recovery voltage, TRV)调频装置、调节电抗器、功率因数电阻、人工链路、关合装置以及保护与控制装置^[1]。传统的试验过程中,试验开始时保护断路器处于合闸状态,合闸开关处于分闸状态,电动机M驱动短路发电机G运转到指定转速,通过励磁系统给发电机的转子施加励磁激励;当发电机G的出口电压达到指定值后,切除电动机M的电源,通过储存的动能提供试验能量;最后关合合闸开关,将短路电流施加到被试品(test circuit breaker, TCB),记录相关波形,并对试验波形进行判读和评价,完成整个试验过程^[25-27]。而大容量试验系统一键顺控方案,则是通过在试验系统中引入分布式传感器与智能控制模块,通过智能化控制技术协调各类试验设备的自动操作,系统根据所需试验条件自动设置试验回路参数,并对试验过程中出现的故障进行报警和处理。

本文对发电机短路特性和大容量试验回路控制方案进行研究,搭建发电机短路仿真模型以及试验回路系统仿真模型,提出大容量试验一键顺控方案,对发电机短路特性以及不同阻抗回路投入下的试验系统进行仿真分析,并对所提一键顺控系统控制方案进行验证。

1 发电机短路特性研究

1.1 同步发电机数学模型

规定定转子磁轴正方向后,理想同步发电机的定子与转子等值电路如图1所示,图中a、b、c是发电机的定子三相绕组,f是励磁绕组,d、q分别是转子直轴、

转子交轴等值阻尼绕组,g为交轴增加等值绕组, θ_r 是直轴超前于a轴的角度, ω 是同步发电机的角速度^[28-29]。

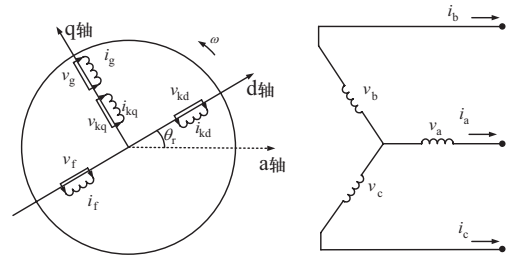


图1 发电机定子与转子等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit of generator stator and rotor

忽略阻尼作用,建立同步发电机暂态模型,则有 $i_{kd} = i_{kq} = 0$ 。设机械转矩为 T_{mech} ,电磁转矩为 T_{em} ,阻尼转矩为 T_{damp} ,对转子运动方程进行标准化,将定子绕组中磁链变化的影响忽略,取g绕组的外部电压和电动势为0,并假设 $\omega_e = \omega_b$,则发电机的暂态数学模型可化简为下列方程组:

$$\begin{cases} v_d = -R_s i_d - x'_q i_q + E'_d \\ v_q = -R_s i_q - x'_d i_d + E'_q \\ T'_{do} \frac{dE'_q}{dt} + E'_q = E_f + (x_d - x'_d) i_d \\ T'_{qo} \frac{dE'_d}{dt} + E'_d = -E_g + \omega_r (x_q - x'_q) i_q \\ T_{em} = E'_q i_q + E'_d i_d + (x'_q - x'_d) i_d i_q \\ T_{mech} - T_{em} - T_{damp} = 2H \frac{d\{(\omega_r - \omega_e)/\omega_b\}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω_r 为同步发电机的角速度; ω_e 为电网角频率; ω_b 为基准角频率; E'_q 为交轴暂态电势; E'_d 为直轴暂态电势; E_f 为励磁电动势; E_g 为交轴增加等值绕组电动势。

1.2 空载下发电机短路特性

大容量短路试验回路不需要承担负荷供电功能,所以在试验中短路形式均为空载状态下的短路。

短路前空载,转子位置角为 180° 时发生三相短路时,电流瞬时值最大,与无穷大电源电路结论一致。空载运行下:同步电机电压 U_0 、空载电势 $E_{q(0)}$ 、暂态电势 $E'_{q(0)}$ 、交轴次暂态电势 $E''_{q(0)}$ 相等, $E''_{d(0)}$ 为0,取 $x''_d \approx x''_q$,由短路电流公式可得定子短路电流为

$$i_a = E''_{(0)} \left[\left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-t/T''_d} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} + \frac{1}{x_d} \right] \times \cos(\omega t + 180^\circ) + \frac{E''_{(0)}}{x''_d} e^{-t/T''_d} \quad (2)$$

式中: x_d 、 x_q 、 x'_d 分别为定子直轴电抗、交轴电抗、

直轴暂态电抗； x_d'' 为纵轴次暂态电抗； T_a 为定子非周期分量衰减时间常数； T_d'' 为定子绕组短路时纵轴阻尼绕组时间常数。

1.3 并联发电机空载下短路分析

为了满足大容量需求，大冲击电流的工况往往需要采用多台发电机并联的回路形式。发电机并联合闸瞬间冲击电流的大小与并联发电机之间的频率差、幅值差、相角差等因素有关，且相位差是影响并联运行冲击电流大小的关键因素^[29]。

1) 并联发电机存在幅值差的情况。设发电机并联运行时的电压向量如图2(a)所示，并联运行前发电机频率等于运行机组频率，相角差为0，待并联机组电压幅值 $\dot{U}_1 \neq \dot{U}_2$ ，两电机并联时冲击电流的有效值可表示为

$$I_C'' = \frac{U_1 - U_2}{X_d'' + X_N} = \frac{u}{X_s} \quad (3)$$

式中： X_d'' 为发电机次暂态电抗； X_N 为系统线路等值电抗。

式(3)表明待并联机组电压幅值差较大时，并联合闸瞬间会产生一个很大的冲击电流，此冲击电流可能会导致发电机损坏。

2) 并联发电机存在相位差的情况。如图2(b)所示，设 $(\omega_1 t + \varphi_1) - (\omega_2 t + \varphi_2) = \delta \neq 0$ ， $f_1 = f_2$ ， $\dot{u} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2$ ，计算冲击电流大小，取 $X_d'' = X_q''$ ， $U_1 = U_2$ ，有

$$I_C'' = \frac{U_1}{X_d'' + X_N} \sqrt{1 - 2\cos\delta + \cos^2\delta + \sin^2\delta} = \frac{2U}{X_d'' + X_N} \sin\frac{\delta}{2} \quad (4)$$

当并联机组存在较小的相角差时，并联合闸时的冲击电流主要为有功性质的电流分量，两机组存在有功功率交换，因此产生的冲击力矩可能会损伤发电机。当 $\delta = 180^\circ$ 时，冲击电流达到最大值。

3) 并联发电机存在频率差的情况。图2(c)所示为待并联机组与在运行机组的电压相量，设两并联机组的相角 $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ ，电压幅值 $U_1 = U_2$ ，频率 $f_1 \neq f_2$ ，取 $U_s = 2U_1 \sin\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t\right)$ ，将电压差 u 等效为幅值 U_s 、滑差角频率为 $\omega_s = \omega_1 - \omega_2$ 的交流电压，电压之间的相角差为 $\delta_s = \omega_s t$ ，两发电机电压差可表示为

$$\dot{u} = 2U_1 \sin\frac{\omega_s t}{2} = 2U_2 \sin\frac{\omega_s t}{2} = 2U_1 \sin\frac{\delta_s}{2} \quad (5)$$

因此可得， \dot{u} 为幅值最大为 $2U_1$ 的正弦脉动波，周期为 $T_s = 2\pi/\omega_s$ 。当相角差 δ_s 在 $0 \sim \pi$ 变化时， \dot{u} 的幅

值由0变到最大值 $2U_1$ ；当相角差 δ_s 在 $\pi \sim 2\pi$ 变化时， \dot{u} 的幅值由最大值变到0。如果恰好在电压重合时（即 $\delta_s = 0$ ）两机组并联合闸，合闸后机组之间的冲击电流为零。当两机组频率差较大时，即使机组并联合闸时相角差 δ_s 很小，两并联机组仍需要经历很长的暂态过程才能达到同步，且严重时会导致失步。当两机组存在较小的频率差时，机组转子上由微小的频率差带来的冲击电流产生的力矩，会促使两机组进入同步运行。

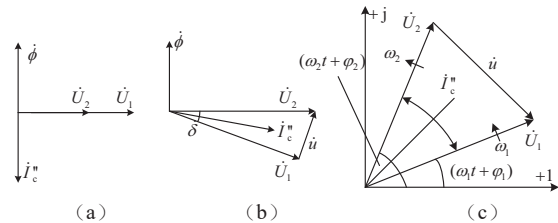


图2 电压幅值、相位、频率分别不同时的冲击电流向量图
Fig. 2 Impulse current vector diagram when voltage amplitude, phase and frequency are different respectively

2 试验回路控制研究

大容量试验站的任务是寻求等价的试验方法^[30-31]，来满足标准和实际工况中提出的参数和要求。大容量短路试验在设计时需要满足安全性、可靠性、先进性、易用性、标准化开放性和可扩展性等方面的设计要求^[32-34]。

2.1 试验回路结构

本研究针对的典型大容量试验回路如图3所示，短路试验系统分为发电机回路、主回路、试品端（1号和2号试品室）及后级负载3部分组成。

1) 发电机回路方案：包含2台短路发电机、2台拖动电动机、调速系统、励磁系统、润滑油系统、冷却水系统等。根据试验需求选择1号或2号发电机或2台发电机并联。

2) 主回路方案：将发电机输出的电流通过各回路送到试品端进行试验，同时对回路参数（2L，3R，3L，4R）进行调节，主回路共设4条支路。

第1条支路：1G、2G输出经回路母线、开关设备（1QF、1HK、2QF、6QS）分别通过气动隔离开关（5QS或8QS）引入试品端。

第2条支路：1G、2G输出经回路母线、开关设备（1QF、1HK、2QF、2QS）、调节电抗器（2L）、限制直流分量电阻（3R）分别通过气动隔离开关（5QS或

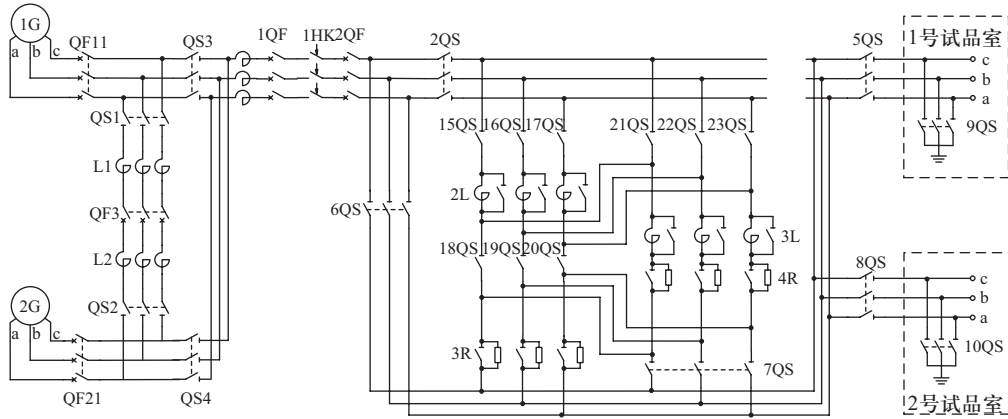


图3 短路试验系统图

Fig. 3 Short circuit test system diagram

8QS)引入试品端,实现25 kA及以上试验电流及相应功率因数的调节。

第3条支路:1G、2G输出经回路母线、开关设备(1QF、1HK、2QF、2QS)、调节电抗器(2L、3L)、限制直流分量电阻(3R)分别通过气动隔离开关(5QS或8QS)引入试品端,实现10 kA~25 kA试验电流及相应功率因数的调节。

第4条支路:1G、2G输出经回路母线、开关设备(1QF、1HK、2QF、2QS)、调节电抗器(2L、3L)、限制直流分量电阻(4R、3R)分别通过气动隔离开关(5QS或8QS)引入试品端,实现10 kA及以下试验电流及相应功率因数的调节。

3)试品端及后级负载方案:设置2个试品端,1个试品室在试验时,另外1个试品室可以安装调试试品。2个试品室进线处布置自动切换气动隔离开关(5QS或8QS),可以远程遥控,自动切换到需要进行试验的试品室。后级负载设置TRV装置和负载阻抗(Z),2个试品室均可以连接后级负载进行试验。

2.2 大容量试验一键顺控方案

一键顺控短路试验系统主要包括发电机系统控制、试验回路控制和时序控制。根据试验要求可实现回路自动配置、时序自动运行、试验数据自动采集、试验自动结束、安全警告、紧急控制。

1)发电机控制。发电机系统由管理层、控制层、现场层和网络设备组成,具备以下功能:油、水系统控制与必要的流量、温度、压力显示及故障报警;各测温点的温度巡回检测及故障报警;拖动电机、发电机的振动值显示及故障报警;高压油顶起装置的控制及压力显示;变频器的调速控制,转速自动设定,电

动机转速显示及故障报警;发电机的励磁控制,发电机输出电压、状态及故障报警。

2)试验回路控制。回路中所有隔离开关均采用气动控制,具有可靠的合、分闸位置反馈信号;控制对象包括回路切换隔离开关的控制、阻抗切换隔离开关的控制、TRV切换隔离开关的控制。

3)时序控制。时序控制系统的主要功能是控制开关有序动作、准确选相合闸角度。时序控制系统对试验过程进行控制,试验前回路切换接好开关,控制开关动作由控制室专用时序控制器完成,以满足试验过程快速精准控制,同时时序系统最大满足其任意一路输出与基准(同步)信号不同相位准确输出,完成对象开关选相位合闸操作。

如图4所示,试验回路整体控制方案为:①启动发电机(根据试验项目选择1台或者2台);②输入预

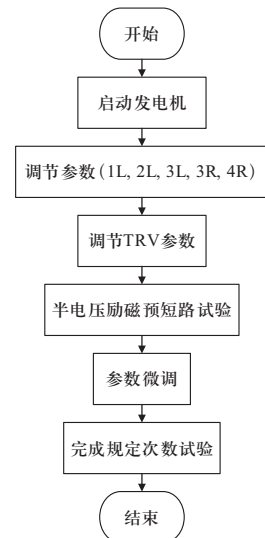


图4 试验回路操作流程

Fig. 4 Flow chart of test loop operation

期工况, 自动化程序调节参数1L、2L、3L、3R、4R;
 ③调节TRV参数(根据试验项目和试品参数调节预期TRV波形); ④以半电压加励磁做预短路试验; ⑤微调2L、3L、3R、4R、TRV参数; ⑥按照标准要求完成规定次数试验。

在试验进行过程中若出现故障, 控制程序根据当前所处的阶段、工作项目、流程步骤、时序及各传感器读取的数据等信息, 自动在数据库中检索当前相关的故障模式, 按照数据库中的故障检测方法匹配故障模式, 并执行故障处置策略。当检测出的故障模式没有硬件冗余或故障预案时, 根据其影响的严重程度、当前子流程的特点, 进行如下处理: ①提示故障模式信息, 提醒试验人员做好进一步的状态监测和分析, 必要时进行人工干预; ②提示故障模式信息并暂停自动控制程序, 同时将当前流程转入安全状态; ③提示故障模式信息并停止自动控制程序, 同时将当前流程转入安全状态。

3 短路特性仿真及控制方案验证

3.1 发电机短路特性仿真

选取发电机型号为SCG-75-2, 构建单台同步发电机对三相短路故障进行计算分析。基于PSCAD/EMTDC搭建同步发电机三相短路模型, 如图5所示。

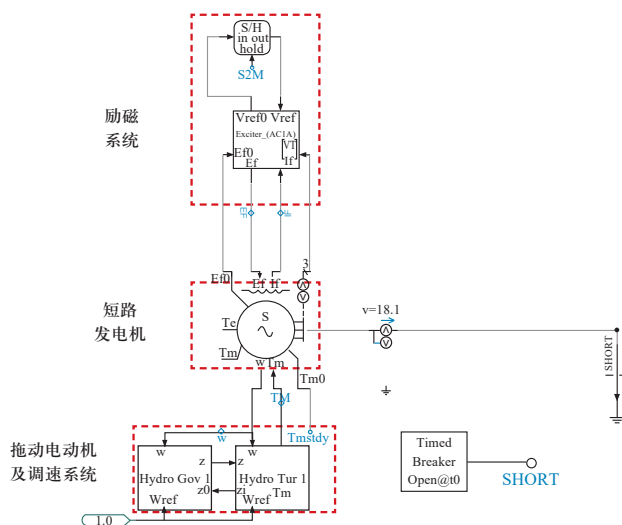
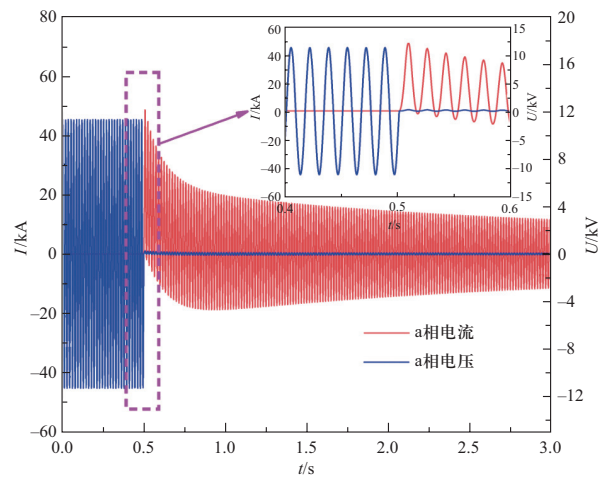


图5 冲击发电机三相短路故障模型

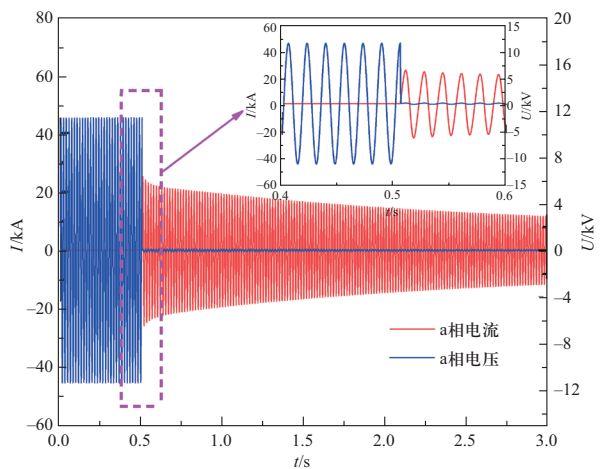
Fig. 5 Three-phase short-circuit fault model of impulse generator

设置发电机短路前处于空载状态, 定子电压处于额定工作电压, 设置故障发生时刻为a相机端电压相位角处于 0° 、 90° 、 180° 、 270° , 对应的转子位置角

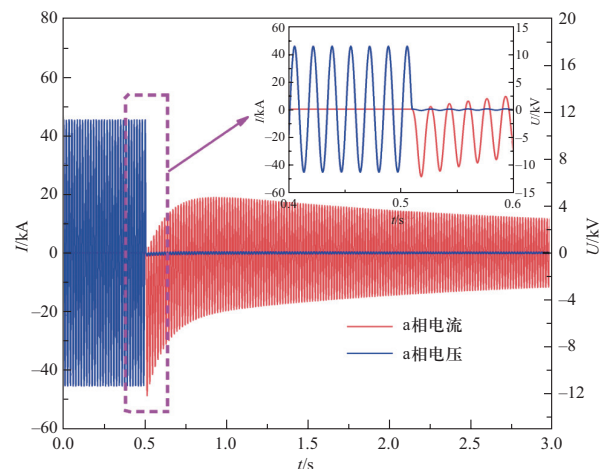
为 180° 、 270° 、 360° 、 90° , 对应的定子电压电流波形如图6(a)~(d)所示。



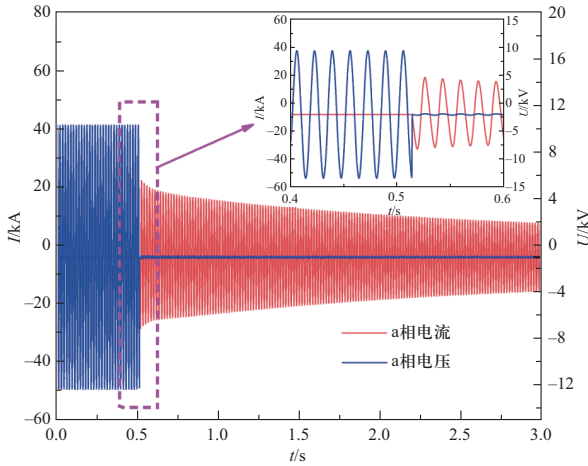
(a) a相机端电压相位角 0°



(b) a相机端电压相位角 90°



(c) a相机端电压相位角 180°



(d) a相机端电压相位角270°

图6 发电机短路定子电压及电流波形

Fig. 6 Generator short-circuit stator voltage and current waveforms

由图6可知, 在短路时刻电压相位角处于 0° , 即转子位置角处于 180° 时, 可取到最大的短路冲击电流, 可用来验证发电机最大冲击电流峰值, 与上文理论分析一致。

3.2 发电机并联短路特性仿真

选取发电机型号为SCG-75-2, 构建并联同步发电机对三相短路故障进行计算分析。基于PSCAD/EMTDC搭建同步发电机并联三相短路模型, 如图7所示。

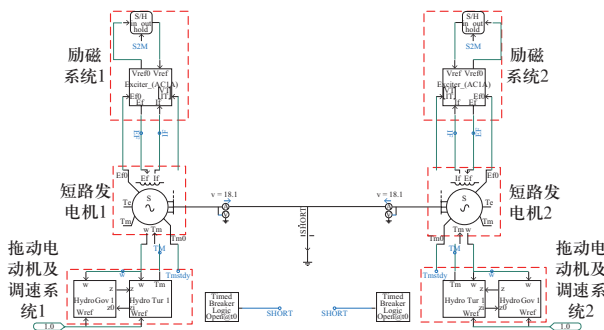


图7 冲击发电机并联三相短路故障模型

Fig. 7 Three-phase short-circuit fault model in parallel with impulse generators

下面对2台发电机在同参数、存在幅值差、存在相位差、存在频率差的情况分别进行仿真分析。

1) 双电机同参数并联短路仿真。

设置2台发电机短路前处于空载状态, 定子电压

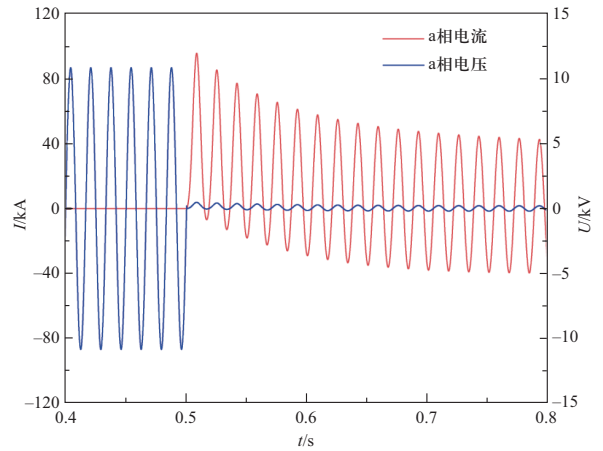


图8 并联发电机同参数下短路定子电压及电流波形

Fig. 8 Short-circuit stator voltage and current waveforms of parallel generators with the same parameters

处于额定工作电压, 设置故障发生时刻为a相机端电压相位角处于 0° , 对应的转子位置角为 180° 。定子电压电流波形如图8所示。

2) 存在幅值差情况下发电机并联短路仿真。

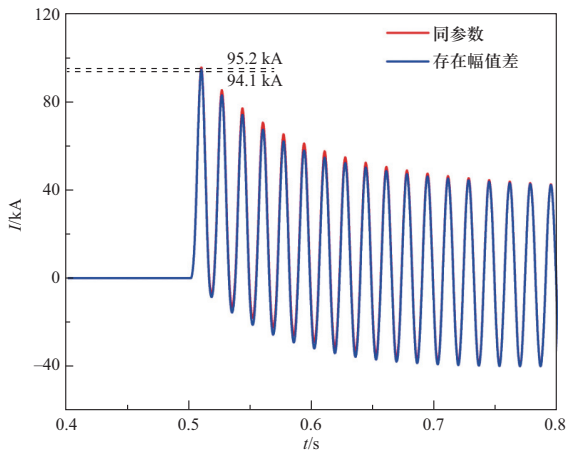
设置2台发电机短路前处于空载状态, 1#发电机定子电压为额定电压13.2 kV, 2#发电机定子电压为12.5 kV, 其他参数均相同。设置故障发生时刻为a相机端电压相位角处于 0° , 对应的转子位置角为 180° 。定子短路电流波形如图9(a)所示, 短路电流幅值与正常情况(即无幅值差)下相差1.1 kA。

3) 存在相位差情况下发电机并联短路仿真。

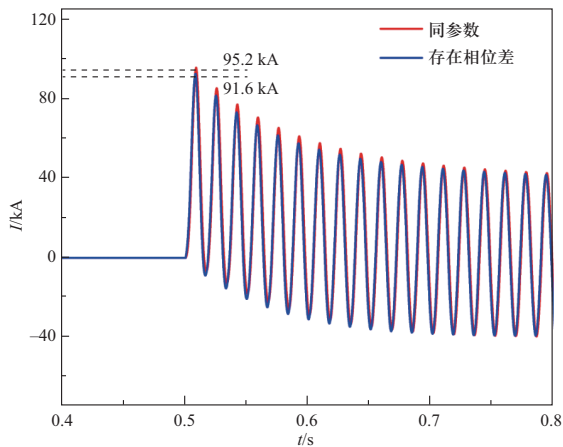
设置2台发电机短路前处于空载状态, 1#发电机初始相位为 0° , 2#发电机初始相位为 30° , 其他参数均相同。设置故障发生时刻为1#发电机a相机端电压相位角处于 0° , 对应的转子位置角为 180° 。定子短路电流波形如图9(b)所示, 短路电流幅值与无相位差情况相差3.6 kA, 并联合闸时冲击电流产生的冲击力矩可能会损伤发电机。

4) 存在频率差情况下发电机并联短路仿真。

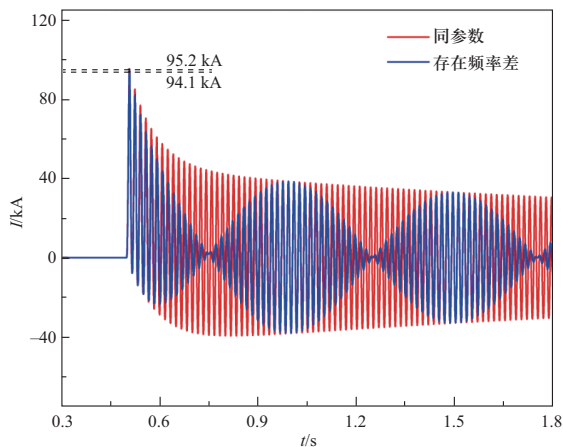
设置2台发电机短路前处于空载状态, 1#发电机工作在额定工作频率50 Hz, 2#发电机工作频率为55 Hz, 其他参数均相同。设置故障发生时刻为1#发电机a相机端电压相位角处于 0° , 对应的转子位置角为 180° 。定子电压电流波形如图9(c)所示, 虽然短路电流幅值与无频率差情况只相差1.1 kA, 但是从电流波形可以看到, 并联发电机长时间无法进入同步状态。仿真结果与理论分析一致。



(a) 存在幅值差情况



(b) 存在相位差情况



(c) 存在频率差情况

图9 不同情况下定子短路电流波形

Fig. 9 Stator short-circuit current under different conditions

3.3 大容量试验系统仿真

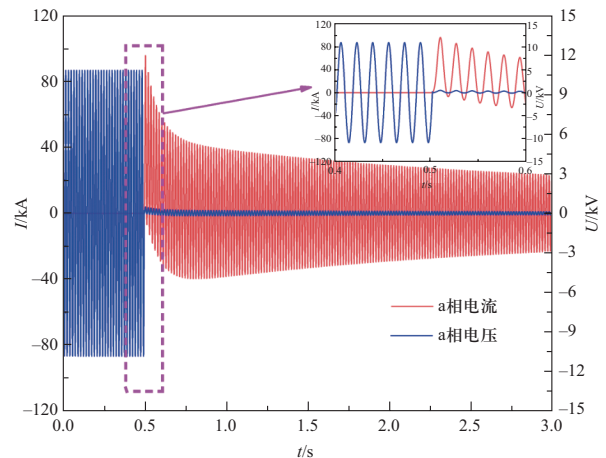
基于PSCAD/EMTDC搭建大容量开关短路试验系

统一键顺控仿真模型,对多种回路参数下的试验系统进行仿真,以帮助进一步建立系统一键顺控数据库。

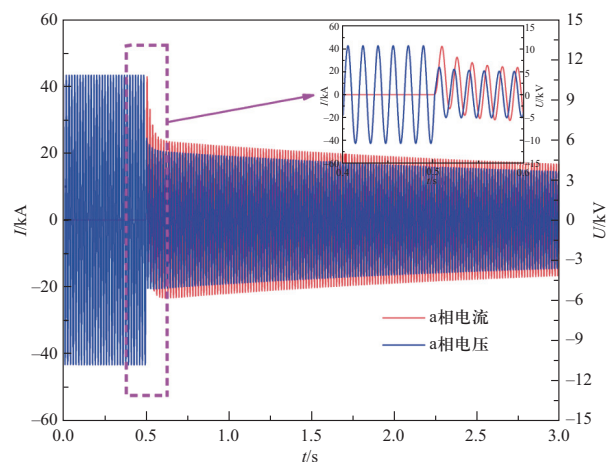
1) 不投入阻抗回路。当一、二层阻抗回路均不投入使用,发生短路后,试验回路短路冲击电流达到最大值,为98 kA,如图10(a)所示,约为单机运行短路的2倍。短路电流次暂态阶段持续0.3 s左右后进入暂态阶段,为了获得最大短路电流,试品试验最好在此区间内完成。

2) 投入一层阻抗回路。当一层阻抗回路投入使用时,发生短路后,由于一层阻抗回路阻抗值较小,试验回路短路冲击电流达到42 kA,如图10(b)所示,约为单机运行短路情况的1.5倍。

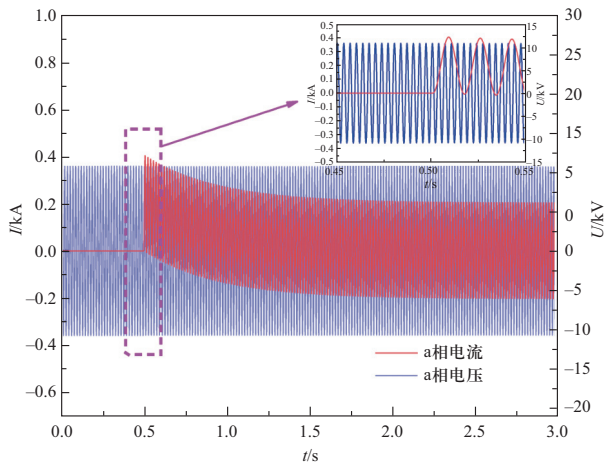
3) 投入二层阻抗回路。当一、二层阻抗回路均投入使用时,发生短路后,试验回路短路冲击电流仅为0.4 kA,如图10(c)所示,与单电机运行短路情况几乎相同。这是由于当回路阻抗逐渐增大时,发电机运行工况逐渐由短路向正常负载过渡,定子绕组为了维



(a) 不投入阻抗回路



(b) 投入一层阻抗回路



(c) 投入二层阻抗回路

图 10 双电机并联短路电流波形

Fig. 10 Short-circuit current waveform of two generators in parallel

持磁链守恒所需的直流分量逐渐降低。

由仿真结果可知,通过调节试验回路一、二层阻抗回路几乎可以实现全范围电流调节,在可调范围内满足各种类型的试验需求。

大容量试验系统仿真可以为前期试验建立数据库提供参考。在前期试验进行前,将仿真参数设置为目标试验回路参数,根据仿真波形,可以帮助确定目标试验波形需要的回路参数,以及试验过程中可能存在的故障,从而加快前期试验的进程,加快试验系统数据库的建立。

4 结论

本文首先对短路发电机单电机和双电机并联情况下的短路特性进行了分析,在PSCAD中建立了短路发电机单电机以及双电机并联的仿真模型;对大容量试验回路控制系统设计需求进行了分析,结合大容量试验系统结构,提出了一套程序化的一键顺控方案;在PSCAD中搭建了系统仿真模型,针对不同工况对试验系统进行了仿真分析,验证了所建立模型的正确性及系统一键顺控方案的合理性,得到了试验回路不同阻抗投入下短路电流峰值范围,为形成完善的大容量短路试验平台设计提供了参考。

参考文献

[1] 江冰. 构建面向30-60的新型电力系统: 中国电力4.0的思考[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(6): 534-541.

- JIANG Bing. Building new power system for 30-60—reflections on China's electricity 4.0[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(6): 534-541 (in Chinese).
- [2] VOROPAI N, PODKOVALNIKOV S, CHUDINOVA L. The evolution of interstate power grid formation[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 335-353.
- [3] 程曦, 吴霜, 王静怡, 等. 输配电价改革背景下电网项目多阶段投资优化决策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 116-123.
- CHENG Xi, WU Shuang, WANG Jingyi, et al. Research on multi-stage investment optimization of power grid projects under transmission and distribution price reform[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 116-123 (in Chinese).
- [4] LI C H, LI K, MA C H, et al. Flexible control strategy for HVDC transmission system adapted to intermittent new energy delivery[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 425-433.
- [5] 曾飞, 黄哲忱, 卫志农, 等. 配电线路故障指示器三相同步精度检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 11-17.
- ZENG Fei, HUANG Zhechen, WEI Zhinong, et al. Three-phase synchronization accuracy detection method for a distribution line fault indicator[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 11-17 (in Chinese).
- [6] 范兴明, 邹积岩, 陈跃, 等. 高压断路器合成关合试验要求及其关合性能的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 81-85.
- FAN Xingming, ZOU Jiyan, CHEN Yue, et al. Research on requirements for synthetic making test and making capability of high-voltage circuit-breaker[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 81-85 (in Chinese).
- [7] 周会高, 许钊, 黄超, 等. 特高压直流输电换流阀运行试验合成回路研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 158-163.
- ZHOU Huigao, XU Fan, HUANG Chao, et al. Research of synthetic test circuit for operational test of UHVDC thyristor valves[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 158-163 (in Chinese).
- [8] 裴振江, 姚斯立, 何俊佳, 等. 一种新的特高压断路器合成试验回路[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(33): 65-69.
- PEI Zhenjiang, YAO Sili, HE Junjia, et al. A new synthetic test circuit for UHV circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(33): 65-69 (in Chinese).
- [9] 吴行健, 石晶, 陈红坤, 等. 基于短路电流小半波特征的短路故障快速检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 86-94.
- WU Xingjian, SHI Jing, CHEN Hongkun, et al. Fast short-circuit fault detection method based on a small half-wave feature[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 86-94 (in Chinese).
- [10] Synthetic testing of high-voltage alternating current circuit-breakers: IEC 60427-2000[S]. International Electrotechnical Commission, 2000.

- [11] 王永真, 张靖, 潘崇超, 等. 综合智慧能源多维绩效评价
指标研究综述[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(3): 207-225.
WANG Yongzhen, ZHANG Jing, PAN Chongchao, et al.
Multi-dimensional performance evaluation index review of
integrated and intelligent energy[J]. Journal of Global Energy
Interconnection, 2021, 4(3): 207-225 (in Chinese).
- [12] 刘壮, 赵庆斌, 黄实, 等. 大容量试验控制系统简述[J]. 高
压电器, 2018, 54(8): 237-241.
LIU Zhuang, ZHAO Qingbin, HUANG Shi, et al. Brief
overview of the control system in high power laboratories[J].
High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 237-241 (in Chinese).
- [13] 李刚, 高享想, 刘浩军, 等. 高压交流断路器大容量短路
开断与关合试验技术[J]. 高压电器, 2018, 54(2): 68-75.
LI Gang, GAO Xiangxiang, LIU Haojun, et al. High power
short-circuit breaking and making tests technique of the high
voltage AC circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2018,
54(2): 68-75 (in Chinese).
- [14] 高享想, 纪祥贞, 马健, 等. 大容量发电机断路器短路试
验程序分析与讨论[J]. 高压电器, 2017, 53(2): 172-177.
GAO Xiangxiang, JI Xiangzhen, MA Jian, et al. Analysis on
short circuit test program of circuit breaker for large capacity
generator[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(2): 172-177 (in
Chinese).
- [15] 张跃丽. 智能变电站二次系统可靠性及相关问题研究[D]. 上
海: 上海交通大学, 2013.
ZHANG Yueli. The reliability and related issues of secondary
system of intelligent substation[D]. Shanghai: Shanghai Jiao
Tong University, 2013 (in Chinese).
- [16] 陈国平, 郭文科. 基于S7-300的冲击发电机组控制系统研制
[J]. 电气自动化, 2015, 37(3): 87-89.
CHEN Guoping, GUO Wenke. Development of a control
system for S7-300-based surge generator unit[J]. Electrical
Automation, 2015, 37(3): 87-89 (in Chinese).
- [17] 蔡志远, 戈阳阳, 马少华. 合成试验数字化同步控制方法
的研究[J]. 高压电器, 2008, 44(6): 521-523.
CAI Zhiyuan, GE Yangyang, MA Shaohua. Digitized
synchronous control method for synthetic test[J]. High Voltage
Apparatus, 2008, 44(6): 521-523 (in Chinese).
- [18] 陈慧欣, 林杰, 罗园. 合成试验同步控制系统的研究[J]. 电
气传动自动化, 2017, 39(3): 56-58.
CHEN Huixin, LIN Jie, LUO Yuan. Research on synchronous
control system of synthetic test[J]. Electric Drive Automation,
2017, 39(3): 56-58 (in Chinese).
- [19] 周柯, 王晓明, 巫聪云, 等. 智能变电站改扩建镜像调试
技术研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24):
168-176.
ZHOU Ke, WANG Xiaoming, WU Congyun, et al. Research
and application of mirroring debugging technology in
reconstruction and expansion of an intelligent substation[J].
Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 168-176
(in Chinese).
- [20] 李耕, 邱智勇, 饶丹, 等. 基于SPCD的智能变电站虚实链
路映射方案研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 124-129.
LI Geng, QIU Zhiyong, RAO Dan, et al. Scheme for mapping
between virtual and real link in smart substation based on
SPCD[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020,
39(1): 124-129 (in Chinese).
- [21] 游鑫, 田维文, 范富江, 等. 基于视频监控智能识别的变
电站一键顺控技术研究[J]. 电气自动化, 2022, 44(3): 85-87.
YOU Xin, TIAN Weiwen, FAN Fujiang, et al. Research on
one-key sequence control technology of substation based on
intelligent recognition of video surveillance[J]. Electrical
Automation, 2022, 44(3): 85-87 (in Chinese).
- [22] 戴祖光. DZ公司变电站一键顺控改造项目进度管理研究
[D]. 济南: 山东大学, 2021.
DAI Zuguang. Schedule management of DZ company's
substation one-key smoothing control renovation project[D].
Jinan: Shandong University, 2021 (in Chinese).
- [23] 陈海滨, 谭畅, 张宾宾, 等. 应用于智能变电站二次检修
的一键式安措系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2021,
49(9): 172-177.
CHEN Haibin, TAN Chang, ZHANG Binbin, et al. Design of
a one-click safety measure system for secondary maintenance
of an intelligent substation[J]. Power System Protection and
Control, 2021, 49(9): 172-177 (in Chinese).
- [24] 申磊, 申光, 季金豹, 等. 智能变电站一键顺控技术研究
与应用[J]. 供用电, 2018, 35(12): 43-49.
SHEN Lei, SHEN Guang, JI Jinbao, et al. Research and
application of one-key sequence control technology for
intelligent substation[J]. Distribution & Utilization, 2018,
35(12): 43-49 (in Chinese).
- [25] 王安, 姚斯立, 阎对丰, 等. 新一代的大容量试验测量系
统[J]. 高压电器, 2012, 48(6): 38-43.
WANG An, YAO Sili, YAN Duifeng, et al. Innovatory
measuring system used in high power laboratory[J]. High
Voltage Apparatus, 2012, 48(6): 38-43 (in Chinese).
- [26] 赵庆斌, 吴钊. 智能高压开关设备容量性能试验研究[J]. 电
工电气, 2014(6): 43-46.
ZHAO Qingbin, WU Zhao. Study on intelligent high-voltage
switchgear capacity performance test[J]. Electrotechnics
Electric, 2014(6): 43-46 (in Chinese).
- [27] JIANG Y, WU J W, WANG H F. Synchronous control
system for synthetic test[J]. Electromechanical Devices, 2013,
113(298): 23-26.
- [28] 马凯悦. 基于电磁暂态仿真与实用计算的短路冲击电流比
较研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
MA Kaiyue. Comparative study of short-circuit impulse
current based on electromagnetic transient simulation and
practical calculation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020
(in Chinese).
- [29] 马晓中. 多台发电机并联运行仿真方法的研究[D]. 大连: 大
连交通大学, 2019.

MA Xiaozhong. Research on simulation method of parallel operation of multiple generators[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2019 (in Chinese).

- [30] 梁德世, 黄智慧, 郭兴宇, 等. 高压直流开断的三电源合成试验方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2465-2471.
LIANG Deshi, HUANG Zhihui, GUO Xingyu, et al. Synthetic test method with three power sources for HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2465-2471 (in Chinese).
- [31] 武建文, 王贺飞, 蒋原, 等. 高压断路器分-合能力合成回路试验模拟系统设计[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3150-3155.
WU Jianwen, WANG Hefei, JIANG Yuan, et al. Design of simulation system of the synthesis loop for testing the closing capacity of high voltage breaker[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3150-3155 (in Chinese).
- [32] 刘浩军, 黄实, 李刚, 等. 发电机断路器T100a试验方法对比研究及试验实施[J]. 高压电器, 2014, 50(8): 36-41.
LIU Haojun, HUANG Shi, LI Gang, et al. Comparative study and implementation of the T100a test methods for generator circuit-breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(8): 36-41 (in Chinese).
- [33] BELDA N A, PLET C A, SMEETS R P P, et al. DNV GL the Netherlands[Z]. Holland: KEMA Laboratories, 2017.
- [34] 李雪峰. 大容量高压开关试验站程控操作系统开发[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
LI Xuefeng. Development of the program control system for high-voltage switch test station[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017 (in Chinese).

收稿日期: 2022-08-10; 修回日期: 2023-01-31。



戴建卓

作者简介:

戴建卓(1992), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为配网一次设备质量检测、高压绝缘技术等, E-mail: 793154445@qq.com。

张思聪(1996), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为配网一次设备质量检测、自动控制技术等, E-mail: 787450949@qq.com。

申家铭(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流配电系统关键技术, E-mail: 1421403112@qq.com。

陶闯闯(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流固态断路器, E-mail: 3121304077@stu.xjtu.edu.cn。

陶加贵(1986), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为配网一次设备质量检测、自动控制、智能化技术等, E-mail: taojiagui@163.com。

陈昱彤(1995), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为配网一次设备质量检测技术, E-mail: chenytjlu@163.com。

吴鑫(1998), 男, 博士研究生, 研究方向为直流固态断路器, E-mail: wx15035485704@stu.xjtu.edu.cn。

吴益飞(1985), 男, 博士, 教授, 研究方向为新型直流开断技术、电力电子器件封装及关断技术。通信作者, E-mail: yifei208@xjtu.edu.cn。

(责任编辑 李锡)