

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.04.012

大容量发电机断路器 TRV 开断特性及抑制措施研究

白玉卓¹, 李朋飞^{2,3}, 关寓丹¹, 房崇豪², 郭洁², 王致远², 全恒立¹

(1. 国核电力规划设计研究院有限公司, 北京 100089; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 3. 国网冀北电力科学研究院(华北电力科学研究院有限责任公司), 北京 100045)

摘要: 发电机断路器(GCB)位于发电机组和升压变压器之间,针对负荷电流高达 50 kA、故障电流高达 200 kA 以上的大容量机组,GCB 传导和开断电流远高于线路断路器,在开断过程中,GCB 两端会产生非常严重的瞬态恢复过电压,威胁 GCB 的可靠性。文中基于某大型核电站的实际接线,单机容量为 1 722.2 MVA,利用 EMTP-RV 仿真计算研究了 GCB 在各种故障下开断时的 TRV 的电磁暂态特性,分析配置不同容量电容器对 TRV 幅值和陡度的影响效果。提出了采用辅助断口装设非线性阻尼电阻抑制 TRV 的方法,并给出了非线性阻尼电阻参数选取原则,并通过仿真验证了其可行性,针对失步故障非线性阻尼电阻可使 TRV 幅值降低 29.2%,具有更高的灵活性与经济性。

关键词: 大容量发电机; 发电机断路器; 瞬态恢复过电压; 失步故障; 三相短路; 非线性阻尼电阻

Study on Interruption Characteristics and Suppression Measures of TRV of High-capacity Generator Circuit Breaker

BAI Yuzhuo¹, LI Pengfei^{2,3}, GUAN Yudan¹, FANG Chonghao², GUO Jie²,
WANG Zhiyuan², QUAN Hengli¹

(1. National Nuclear Power Planning and Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100089, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. State Grid Jibei Electric Power Research Institute(North China Electric Power Research Institution Co.,Ltd.), Beijing 100045, China)

Abstract: Generator circuit breaker(GCB) is located between the generator set and booster transformer. For high capacity units with load current up to 50 kA and fault current up to 200 kA, the current conducted and interrupted by the GCB is far above that of line circuit breaker. During the interruption period, very serious transient recovery over voltage is generated on both sides of the GCB, threatening reliability of GCB. Based on the actual wiring of a large nuclear power station with capacity of sing unit at 1 722.2 MVA, the electromagnetic transient characteristics of TRV, in case of interruption of GCB at various faults, is calculated and studied by the use of EMPT-RV simulation and the influence effect of capacitor with different capacity configuration on amplitude and steepness of TRV is analyzed. The method of suppressing TRV by adding non-linear damping resistor of auxiliary open contacts is proposed, the principle of parameter selection of the non-linear damping resistor is given and its feasibility is verified by simulation. As for the out of step fault, the non-linear damping resistor can reduce the TRV amplitude by 29.2%, which has higher flexibility and economic performance.

Key words: high capacity generator; generator circuit breaker; transient recovery over-voltage; out of step fault; three phase short circuit; nonlinear damping resistor

0 引言

随着电力工业的快速发展,中国电力需求持续增长,单机容量超过 1 000 MW 的水电,核电,火电机

组广泛应用,大容量发电机断路器(GCB)的运行可靠性对电厂的安全性起了至关重要作用。

目前,发电机断路器主要有两种类型:SF₆断路器和真空断路器。对于 300 MW 以上的大容量机

收稿日期:2023-12-01; 修回日期:2024-02-04

基金项目:国家电力投资集团有限公司科技项目(大型先进压水堆核电厂发电机断路器成套装置工程应用技术研究)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Power Investment Group Co., Ltd.(Research on the Application Technology of the Complete Set of Generator Circuit Breakers for Large Advanced Pressurized Water Reactor Nuclear Power Plants).

组,通常采用 SF₆ 型断路器,电压等级一般为 24 kV 和 36 kV。而真空断路器通常用于 100 MW 以下的小容量发电机组^[1-4]。

发电机断路器位于发电机和升压变压器之间,由于 GCB 的安装位置不同,保护对象不同,与普通断路器性能要求差别很大,GCB 的负荷电流和断开的故障电流远高于线路断路器,GCB 所承受的 TRV 陡度与幅值也更加严酷。因此 GCB 具有额定电压低,开断短路电流大,开断短路电流直流分量高,瞬态恢复过电压高等特点。

GCB 的瞬态恢复过电压(TRV)对于断路器开断发电机的故障电流至关重要。断路器的瞬态恢复过电压是指断路器电弧熄灭之后,在断路器触头上出现的具有显著的恢复过电压,TRV 对断路器的可靠灭弧具有决定性意义。

TRV 的幅值和陡度决定 GCB 的开断能力,目前抑制 TRV 方法:①GCB 两侧并联电容器,能明显降低 TRV 陡度,但是 TRV 幅值会增加。②GCB 断口间并联分闸电阻,能明显减低 TRV 幅值,但受到分闸电阻热容量的限制,同时需要装设辅助断路器来开断电阻,可能存在辅助断口 TRV 更加严重的问题^[5]。

重庆大学刘渝根教授^[6]对小容量发电机 TRV 进行研究,探讨用普通断路器代替小容量发电机 GCB 可能性。清华大学学者^[7-8]对线路断路器开断感性负载及抑制措施进行研究。国网电科院学者^[9]对特高压线路断路器 TRV 影响和抑制措施;西安高压电器研究所学者^[10-11]对发电机出口装设 RC 吸收器抑制效果进行了研究,同时说明了发电机断路器装设电容器的必要性。上海电力大学学者^[12]对发电机断路器弧隙电阻对 TRV 影响进行分析,弧隙电阻阻值越大,产生 TRV 幅值越小。ABB 公司^[13]对断路器常用的电弧模型进行适应性分析。目前国内外研究小容量发电机的断路器和高压线路断路器较多,缺少对于大容量发电机出口断路器 TRV 的影响因素及抑制措施的系统性研究。

文中以中国某大型核电站为例,采用电力系统仿真软件 EMTP-RV 进行计算,分析不同故障条件下大容量发电机断路器 TRV 的波形特征,分析了最严酷工况下 TRV 特性;研究了并联电容对 TRV 的影响,同时提出了一种装设非线性阻尼电阻抑制 GCB 的 TRV 全新方法,并验证了该方案的可行性。对于 GCB 安全配置具有重要意义。

1 仿真模型建立

1.1 GCB 模型建立

GCB 型号为 HEL9-250L,两侧各配备有 2×260 nF

保护电容,其断路器参数见表 1。

表 1 断路器主要参数

Table 1 Main parameters of the circuit breaker

额定电压/kV	额定短路对称分量切断 电流/kA		额定短路非对称开断 分量/%	
	系统侧	发电机侧	系统侧	发电机侧
27	250	203	77	122

目前,众多文献、标准对 TRV 特性的研究,常采用简单理想开关模型模拟断路器^[14],忽略了电弧模对 TRV 的影响,基于理想开关的断路器模型在模拟发电机故障开断时过电压的适用性有限^[13];而电弧的发展是影响 TRV 特性的重要因素之一,文中 GCB 仿真模型中充分考虑了电弧特性采用非线性电弧 Schwarz-Avdonin 模型^[15]。该模型适用于 GCB 开断模拟^[16],将电弧的冷却功率与时间常数当作电弧电导 g 的自由函数,在实际应用中被广泛采用,该方法基于式(1)-(3):

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau(g)} \left[\frac{i^2}{P(g)} - g \right] \quad (1)$$

$$P = P_0 g^\beta \quad (2)$$

$$\tau = \tau_0 g^\alpha \quad (3)$$

式(1)-(3)中: g 为电弧电导, S/m; i 为电弧电流, A; τ 为电弧电导的电弧热时间常数, s; P 为电弧电导的电弧冷却功, W; α, β 为自由参数。

各参数的取值为^[17]: $P_0=4$ MW; $\tau=1.5$ μ s; $\alpha=0.17$; $\beta=0.68$ 。其仿真控制逻辑图见图 1。

1.2 同步发电机模型建立

发电机采用 EMTP-RV 中的同步发电机模型,同步电机电气参数具有明显的频率特性,短路电流的交流分量按发电机的次瞬态和瞬态时间常数衰减,而直流分量按电枢时间常数衰减,若发电机空载或在故障前释放能量,则发电机源短路电流的交流分量和非对称度依情况而变化。发电机主要参数见表 2。

1.3 变压器模型建立

通过对比发现考虑励磁支路能够降低 GCB 所承受的 TRV 幅值,本次仿真过程中考虑最严酷的情况,对变压器的建模不考虑励磁支路,变压器主要参数见表 3。

1.4 系统运行方式的确定

仿真系统采用“单机—单变”接线方式,考虑系统正常运行情况下,出线侧等效输出容量为每台机 1 600 MVA。500 kV 发电厂系统电气接线共有 2 台发电机组,系统接线见图 2。

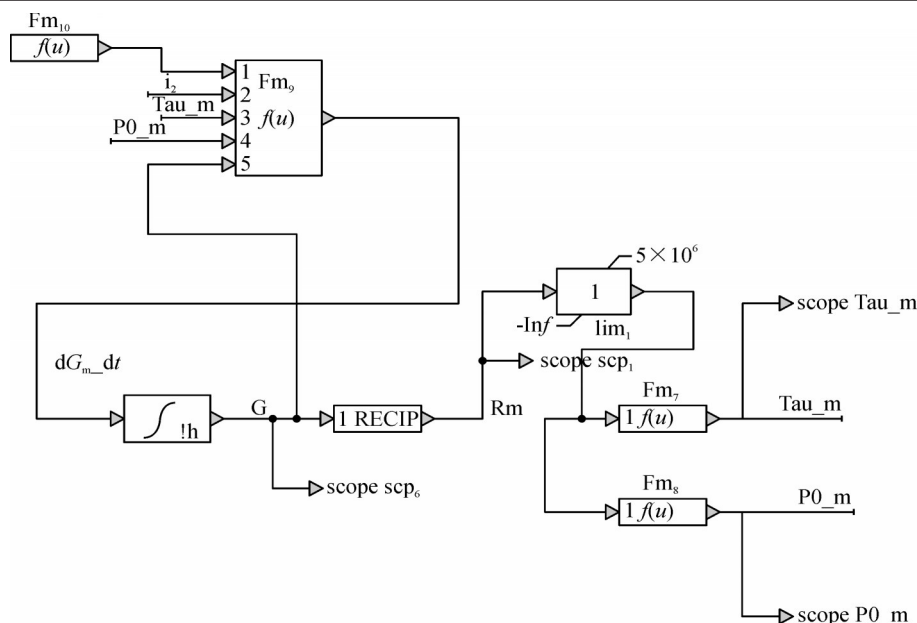


图1 仿真控制逻辑图

Fig. 1 Simulation control logic diagram

表2 发电机主要参数

Table 2 Main generator parameters

额定电压/kV	额定容量/MVA	额定功率/MW	X_d /p.u.	X'_d /p.u.	X''_d /p.u.
27	1 722.2	1 550	2.06	0.385	0.235

表3 变压器主要参数

Table 3 Main parameters of transformer

额定变比/kV	额定功率/MVA	绕组电阻/ Ω		阻抗电抗压/%
		高压侧	低压侧	
525/27/ $\sqrt{3}$	3×575	0.116 2	0.000 7	20

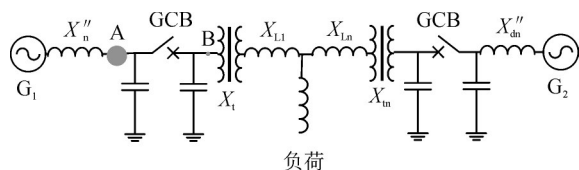


图2 仿真模型图

Fig. 2 Simulation model diagram

2 TRV 仿真结果与分析

该电站发电机中性点为非有效接地方式,采用离相封闭母线设置,由于单相接地故障电流较小,系统发生三相短路故障时 GCB 开断条件最为恶劣,会出现最大短路电流和最大 TRV 陡度。因此仿真中重点考虑三相短路开断情况,设置的故障方式为^[18-21]:

- 1)发电厂内发生三相短路故障,故障点位置设置见图2,B点升压变压器低压侧出线端;
- 2)发电厂内发生三相短路故障,故障点位置设置在图2,A点发电机出线端;

- 3)发电厂内两台发电机发生失步故障;
- 4)GCB 开断负荷电流。

2.1 变压器低压侧发生三相短路

由于发电机绕组的电抗较高,因此图2仿真模型中B位置上的短路电流比系统侧A位置上故障时低。尽管发电机源故障的短路电流和 TRV 上升率比系统源故障的低,由于短路电流的非对称度高,发电机源故障不能被忽略。

仿真设置当变压器低压侧图2所示的B点位置处 15 ms 发生三相短路故障,GCB 在故障后跳闸。

短路电流波形见图3,A相第一个周波存在延迟过零状况,A相电流最大(交流分量有效值为 146 kA),其幅值为 419 kA,非对称度 A 相为 101%。B 相 55%,C 相 44%,低于 GCB 开断发电机故障的最大开断电流 203 kA 和不对称度 122%。

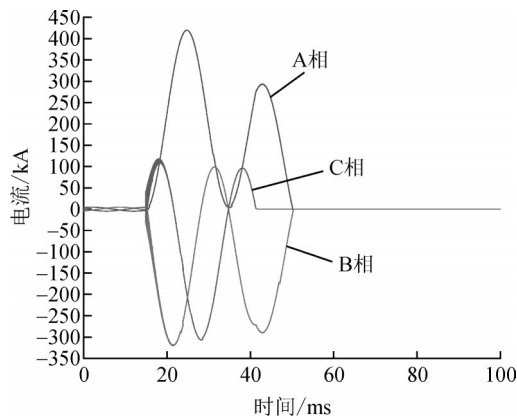


图3 三相短路电流波形

Fig. 3 Three phase short circuit current waveform

GCB 断口间 TRV 波形见图4,由图4可知:C 相

电流最先过零开断,是首开相,其断口最先出现瞬态恢复过电压,A、B两相GCB电流同时过零并出现瞬态恢复电压。

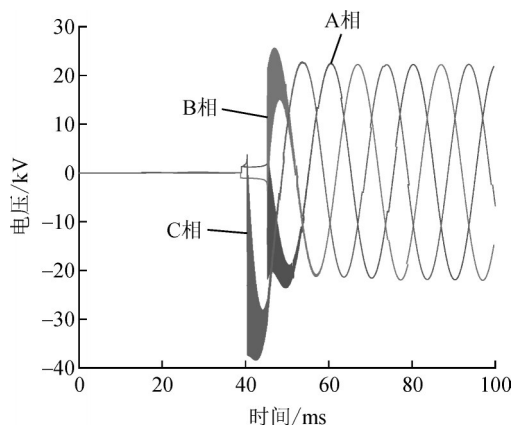


图4 GCB断口间TRV波形

Fig. 4 TRV waveform on break of circuit breaker

计算结果见表4,首开C相GCB瞬态恢复电压的幅值及陡度最大,A、B两相GCB瞬态恢复电压的幅值电压及陡度相接近且略低于C相GCB瞬态恢复电压的幅值电压及陡度;C相GCB瞬态恢复电压的等值频率低于后开相A、B两相GCB瞬态恢复电压的等值频率。满足IEC/IEEE 62271中发电机源故障情况下首开相的陡度和幅值要求,GCB首开相幅值规定值为57.96 kV,陡度为2.2 kV/ μ s。

表4 三相GCB瞬态恢复电压计算结果表

Table 4 Calculation of transient recovery voltage for three phase circuit breakers

参数	A相	B相	C相
U_{shm}/kV	21.0	21.7	36.9
$t_3/\mu\text{s}$	45.1	44.3	58.1
$dU/dt/(\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1})$	0.521	0.537	0.728
f/kHz	8.61	7.63	8.61

仿真中,通过改变GCB的电容配置发现^[22],变压器低压侧出线端发生三相短路时,GCB变压器侧电容参数变化对TRV影响较小,GCB发电机侧电容参数变化对TRV的幅值和陡度影响较大。随着发电机侧电容值的增加,TRV陡度明显下降,幅值上升^[23],见图5,但随着电容值的进一步增大,TRV陡度下降的幅度也逐渐变缓,TRV的振荡时间增长。在原配置520 nF条件下,首开相C相TRV幅值达到37 kV,陡度为0.569 kV/ μ s,TRV幅值增加了0.27%,陡度下降了22%。

2.2 发电机侧发生三相短路

在实际应用中,因为变压器和系统的短路电抗之和低于发电机的次瞬态、瞬态电抗,所以系统源短路电流的交流分量高于发电机源短路电流的交

流分量。

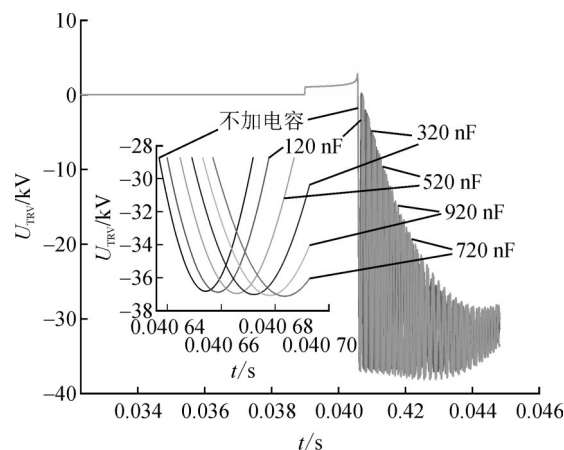


图5 电容量变化对TRV的影响

Fig. 5 Changing capacitance TRV effect

当发电机侧图2所示的A点位置20 ms发生三相短路故障,GCB在故障后跳闸。三相短路电流波形见图6。

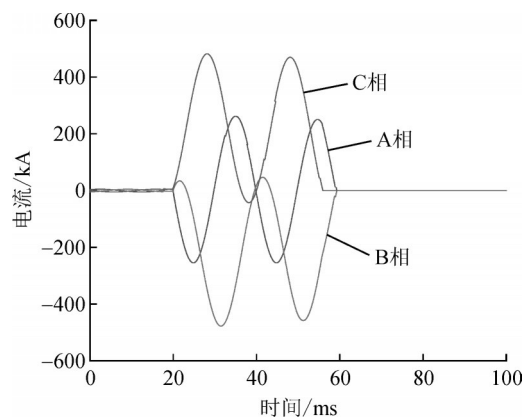


图6 三相短路电流波形

Fig. 6 Three-phase short-circuit current waveform

三相短路电流无延迟过零点,其最大值为C相481 kA(交流分量有效值173 kA),非对称度A相为0.2%。B相70%,C相83%,低于GCB最大开断电流。系统侧对称开断分量250 kA,非对称开断(直流)分量77%。首开相C相的非对称度高于77%,需要进行核算。

依据《IEC/IEEE 62271-37-013: 2015》标准对GCB开断给定短路电流的能力进行评估,可将交流分量和直流分量任意合并,但须在触头分离时符合下述条件:

- 1)交流分量不超过额定系统源短路开断电流的交流分量;
- 2)非对称短路电流不超过非对称开断能力;
- 3)非对称度不超过100%。

1)、3)条件均满足只需验证GCB的非对称开断能力,该GCB的非对称开断能力为

$$I_{\text{asymcs}} = I_{\text{sc}} \sqrt{1 + 2A_{\text{sy}}^2} \quad (4)$$

式(4)中: I_{sc} 为短路电流交流分量有效值, kA; $A_{\text{sy}}^{\text{cs}}$ 为非对称度。

GCB的非对称开断能力为

$$I_{\text{asymcs}} = I_{\text{sc}} \sqrt{1 + 2A_{\text{sy}}^2} = 250 \sqrt{1 + 2 \times 0.77^2} = 370 \text{ kA} \quad (5)$$

该发电机非对称短路电流可以按照式(4)计算得出

$$I_{\text{asymcs}} = I_{\text{sc}} \sqrt{1 + 2A_{\text{sy}}^2} = 173 \sqrt{1 + 2 \times 0.83^2} = 266 \text{ kA} \quad (6)$$

虽然非对称度高于GCB额定值,但是非对称短路电流不超过非对称开断能力,满足条件2),可以开断。GCB断口TRV见图7。

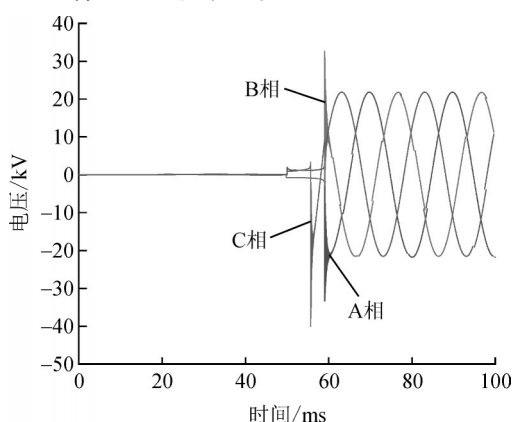


图7 GCB断口间TRV波形

Fig. 7 TRV waveform on break of circuit breaker

C相电流最先过零开断,是首开相,其断口最先出现瞬态恢复过电压, A、B两相GCB电流同时过零并出现瞬态恢复电压,计算结果见表5。

表5 三相GCB瞬态恢复电压计算结果表

Table 5 Calculation of transient recovery voltage for three phase circuit breakers

参数	A相	B相	C相
U_{shn}/kV	33.6	32.3	40.4
$t_3/\mu\text{s}$	9.6	9.0	11.7
$dU/dt/(\text{kV} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	3.27	3.36	3.60
f/kHz	55.6	52.1	42.7

首开C相GCB瞬态恢复电压的幅值电压及陡度最大, A、B两相GCB瞬态恢复电压的幅值电压及陡度略低于C相; C相GCB瞬态恢复电压的等值频率低于随后断开的A、B两相。满足IEC/IEEE 62271中发电机源故障情况下首开相的陡度和幅值要求, 断路器首开相幅值规定值为57.96 kV, 陡度为6 kV/ μs 。

仿真中, 通过改变GCB电容配置发现, 在发电机出线端发生三相短路时, GCB发电机侧电容参数变化对TRV影响较小, GCB变压器侧电容参数变化对TRV的幅值和陡度影响较大。电容量变化对

TRV的影响见图8, 随着电容值的增加, 陡度明显下降, 幅值上升。但随着电容量的进一步增大, 发电机出口断路器TRV陡度下降的幅度逐渐变缓趋于饱和, TRV的振荡时间增长, 即在能有效降低TRV陡度基础上, 再增加电容量, 所获得的技术经济意义不大。在原配置520 nF条件下, 首开相C相TRV最大幅值达到42.1 kV, 最大陡度为1.38 kV/ μs , TRV幅值增加了4.2%, 陡度下降了61.6%。

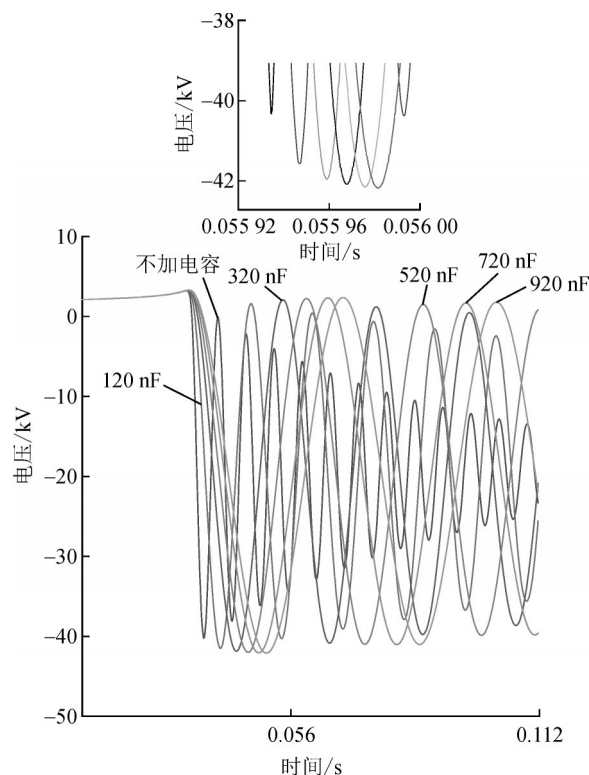


图8 电容量变化对TRV的影响

Fig. 8 Changing capacitance TRV effect

2.3 发电厂内两台发电机发生失步故障

由于失步故障也是发电厂内常出现的故障之一, 并影响发电机出口断路器的选型。

假设系统中发生最严重的失步故障(根据断路器最大失步角为90°)对发电机GCB的瞬态恢复电压进行仿真分析, 失步故障发生在20 ms, 故障后GCB分闸, 三相失步电流见图9。

三相电流无延迟过零点, 其最大瞬态恢复电压出现在B相幅值为147 kA(交流分量有效值98 kA), 非对称度A相为6%。B相7%, C相7.3%, 根据IEC/IEEE 62271规定的失步电流开合额定值将不超系统源对称故障开断电流的50%即125 kA。满足开断条件。

由图9可以看出, B相电流最先过零开断, 是首开相, 其断口最先出现瞬态恢复过电压, A、C两相GCB电流同时过零并出现瞬态恢复电压, TRV结果见图10。

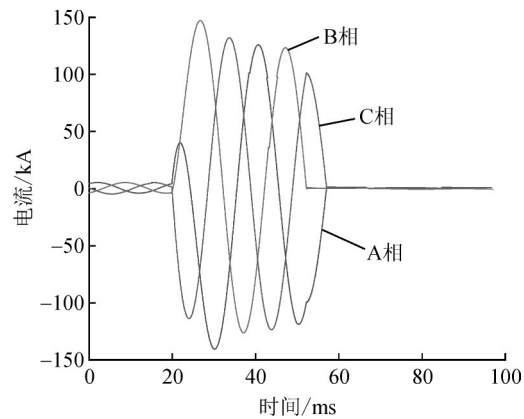


图9 三相失步时的三相电流

Fig. 9 Three-phase current at three phase out of step

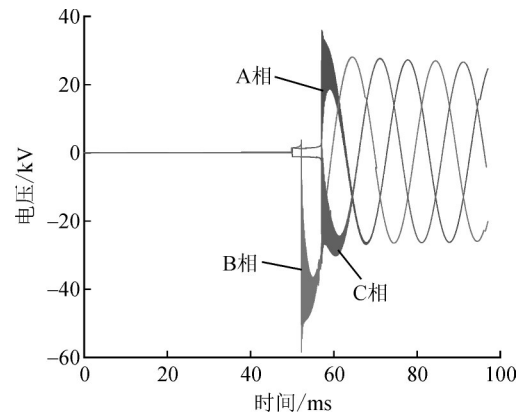


图10 GCB断口间TRV波形

Fig. 10 TRV waveform on break of circuit breaker

数据处理结果见表6,首开B相GCB瞬态恢复电压的幅值电压及陡度均最大,A、C两相GCB瞬态恢复电压的幅值电压及陡度略低于B相;TRV陡度最大值为1.13 kV/ μ s,幅值为58.8 kV,满足IEC/IEEE 62271中失步故障情况下首开相的陡度和幅值要求,断路器首开相幅值规定值为78.75 kV,陡度为5.2 kV/ μ s。

表6 三相GCB瞬态恢复电压计算结果表

Table 6 Calculation of transient recovery voltage for three phase circuit breakers

参数	A相	B相	C相
U_{shm}/kV	37.4	58.8	31.1
$t_3/\mu s$	102.7	84.8	103.5
$dU/dt/(kV \cdot \mu s^{-1})$	0.923	1.130	0.768
f/kHz	4.9	5.9	4.8

电容量变化对TRV的影响见图11,失步故障双频振荡曲线^[24-25],变压器的固有频率高于发电机的固有频率。当增设的三相对地电容器电容量相同时,三相对地电容器安装在变压器低压侧比安装在靠近发电机侧,更能有效降低断路器TRV的陡度和振荡频率。发电机侧电容器能够抑制发电机甩负

荷后电压升高^[26],在原配置520 nF条件下,首开相B相TRV幅值达到54.5 kV,陡度为1.01 kV/ μ s,TRV幅值下降了7%,陡度下降了10.6%。

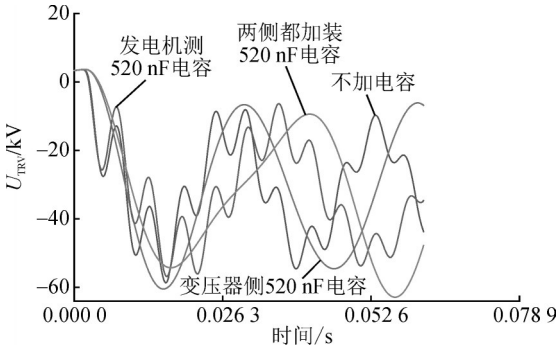


图11 电容量变化对TRV的影响

Fig. 11 Effect of changing capacitance on TRV

2.4 开断负荷电流

系统正常运行时,出线侧每台机等效输出容量为1 600 MVA,仿真设置GCB在40 ms时分断负荷电流,TRV波形见图12。

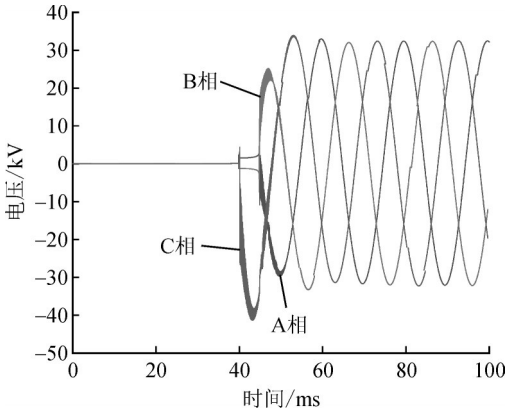


图12 GCB断口间TRV波形

Fig. 12 TRV waveform across break of circuit breaker

C相电流最先过零开断,是首开相,其断口最先出现瞬态恢复过电压,A、B两相GCB电流同时过零并出现瞬态恢复电压,计算结果见表7。TRV陡度最大值为0.609 kV/ μ s,最大幅值为28.1 kV,满足IEC/IEEE 62271中失步故障情况下首开相的陡度和幅值要求,断路器首开相幅值规定值为28.98 kV,陡度为1.6 kV/ μ s。

表7 三相GCB瞬态恢复电压计算结果表

Table 7 Calculation of transient recovery voltage for three phase circuit breakers

参数	A相	B相	C相
U_{shm}/kV	20.2	11.3	28.1
$t_3/\mu s$	44.1	56.4	51.1
$dU/dt/(kV \cdot \mu s^{-1})$	0.364	0.365	0.609
f/kHz	11.3	8.9	9.8

增加电容后,TRV波形见图13,波形与系统发生失步故障情况规律类似^[27-28],为双频振荡曲线,变压器的固有频率高于发电机的固有频率。

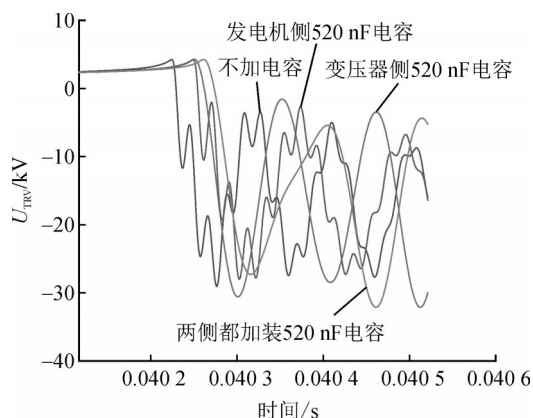


图13 电容量变化对TRV的影响

Fig. 13 Effect of changing capacitance on TRV

表8 三相GCB瞬态恢复电压计算结果表

Table 8 Calculation of transient recovery voltage for three phase circuit breakers

故障状态	首开相TRV幅值 U/kV			裕度/%	首开相TRV陡度 $dU/dt/(kV \cdot \mu s^{-1})$			安全裕度/%
	规定值	预期	配置电容器		规定值	预期	配置电容器	
变压器低压侧三相短路	57.960	39.900	37.000	36.2	2.200	0.728	0.569	74.1
发电机侧三相短路	57.960	40.400	42.100	27.4	6.000	3.600	1.380	77.0
开断失步电流	78.750	58.800	54.500	30.8	5.200	1.130	1.010	80.6
开断系统负荷电流	28.980	28.100	27.300	5.5	1.600	0.609	0.520	67.5

非线性阻尼电阻为金属氧化物非线性电阻,其吸收能力是电阻的重要指标之一,一般用比能量(kJ/kV)来表征,一般考虑到非线性阻尼电阻的热容量和工频耐受特性,非线性阻尼电阻不能耐受持续时间较长的工频暂时过电压,其最大值不超过最高运行相电压的1.7倍^[18]。故采用的非线性阻尼电阻参数为 $U_{1mA}=28.9$ kV, $U_{5kA}=46.75$ kV,比能量为10 kJ/kV,方波能量吸收容量为289 kJ,其 $U-I$ 特性见图14。

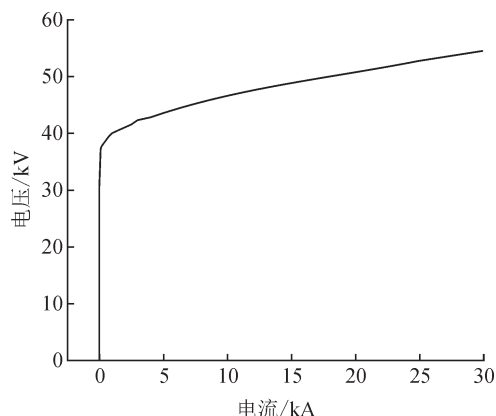


图14 非线性阻尼电阻的 $U-I$ 特性

Fig. 14 $U-I$ characteristics of varistor

其抑制原理为:借助非线性阻尼电阻的非线性通过吸收高幅值高次谐波能量以限制TRV幅值,并

3 非线性阻尼电阻抑制TRV效果分析

根据上述仿真,结果见表8,根据《IEC/IEEE 62271-37-013:2015》中对TRV幅值和陡度的规定值,装设520 pF电容器后GCB的安全裕度见表8。

装设电容器后,TRV陡度安全裕度在50%以上,已经不是威胁GCB开断的主要因素,而TRV幅值的安全裕度并不理想,由于TRV断口两侧的暂态电压分别出现振荡,对地振幅均不大,但断口两侧电压呈现反向振荡,因此断路器断口处的瞬态恢复电压幅值仍较高。为此,提出了增加辅助断口,利用非线性阻尼电阻的非线性特性来抑制GCB断口间TRV的幅值。

在短路故障情况下抑制TRV上升陡度,同时还可以明显加快高频谐波电压分量的衰减速度,在暂态过程结束后,恢复成高阻状态。由于装设在断口之间,采取短时接入方式,同时辅助断口在开断能力上,不会超过主断口,辅助断口的设计更经济。

分闸过程:断路器接到分闸命令,主断口动触头向上与静触头分离,非线性阻尼电阻接入回路中,直到主断口动触头行程将尽,非线性阻尼电阻的接入时间就是主断口动触头的行程时间,选取30 ms后,非线性阻尼电阻退出。仿真结果见表9。

加装非线性阻尼电阻后,对比发生失步故障首开相TRV幅值和陡度的变化,见图15,GCB首开相TRV幅值从54.5 kV降低为38.6 kV,降低了29.2%,安全裕度提升到50.1%,削减了TRV电压振荡。非线性阻尼电阻在GCB断口间TRV幅值未达到动作电压时不起作用,对TRV陡度影响较小,当达到非线性阻尼电阻动作电压时,开始吸收能量,抑制TRV振荡。

4 结论

文中通过对某大型核电站的GCB瞬态恢复过电压TRV的计算分析,得出如下结论。

表9 装设非线性阻尼电阻后三相GCB瞬态恢复电压计算结果表

Table 9 Calculation of transient recovery voltage for three phase circuit breakers

故障状态	首开相 TRV 幅值 U/kV			安全裕度/%	首开相 TRV 陡度 $dU/dt/(kV \cdot \mu s^{-1})$			安全裕度/%
	规定值	非线性阻尼电阻	配置电容器		规定值	非线性阻尼电阻	配置电容器	
变压器低压侧三相短路	57.960	36.500	37.000	37.1	2.200	0.545	0.569	75.2
发电机侧三相短路	57.960	38.100	42.100	34.3	6.000	1.030	1.380	82.8
开断失步电流	78.750	38.600	54.500	50.1	5.200	1.090	1.010	79.0
开断系统负荷电流	28.980	27.000	27.300	6.8	1.600	0.510	0.520	68.1

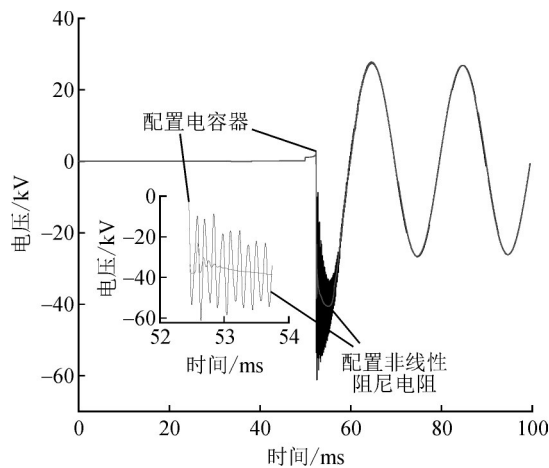


图15 GCB断口间TRV波形

Fig. 15 TRV waveforms between GCB breaks

1)发电机发生失步故障时,GCB的TRV幅值最高,发电机出线端发生短路时TRV陡度最大。由于发电机绕组的电抗较高,因此发电机源侧短路电流比系统源侧短路故障时低。所以发电机源侧短路故障出现的最大短路电流和TRV上升陡度均比系统源侧故障时低,但是发电机源故障开断电流含有较高的直流分量,存在电流延迟过零问题。

2)根据《IEC/IEEE 62271-37-013:2015》中对TRV的规定值,装设电容器后TRV陡度下降明显,各种故障下安全裕度均在50%以上。在开断发电机源故障短路电流和系统源短路电流情况下,会抬升TRV的幅值;开断失步故障和负荷电流时有类似的规律,发电机侧电容能够降低发电机出口电压升高幅值,变压器侧电容能够降低和抑制TRV的振荡。

3)提出了全新抑制GCB的TRV的方法,非线性阻尼电阻的参数选择应综合考虑对过电压的抑制效果与能量吸收能力。由于非线性阻尼电阻的非线性特性,对断口间TRV幅值最高的的失步故障抑制最明显,从54.5 kV降低为38.6 kV,安全裕度达到50.1%;暂态过程结束后,恢复成高阻状态,辅助断口在开断条件上,不会超过主断口。

参考文献:

[1] 郑珊珊,任洪涛. 大容量发电机断路器主要特性分析[J]. 电工电气,2016(4):40-42.
ZHENG Shanshan, REN Hongtao. Main characteristic analysis of high - capacity generator circuit breakers[J]. Electrotechnics Electric, 2016(4):40-42.

[2] 孙 华,王 宾. 基于分合闸电气量的真空断路器灭弧能力在线检测研究[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(2):102-109.
SUN Hua, WANG Bin. Arc-quenching ability detection of a high voltage vacuum circuit breaker based on switching and closing current[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 102-109.

[3] 王军龙,杨欢红,张劲松,等. 基于低能量直流的真空断路器短路开断能力评估[J]. 智慧电力,2022,50(7):23-28.
WANG Junlong, YANG Huanhong, ZHANG Jinsong, et al. Short-circuit breaking capacity evaluation of vacuum circuit breaker based on low - energy DC[J]. Smart Power, 2022, 50(7):23-28.

[4] 张晓鹏,朱苛姝. 基于电磁驱动的40.5 kV快速真空断路器研究[J]. 电测与仪表,2023,60(5):79-84.
ZHANG Xiaopeng, ZHU Kelou. Research on 40.5 kV fast vacuum circuit breaker based on electromagnetic drive[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 79-84.

[5] 那 虎,李亚梅,魏志勇,等. 带分闸电阻断路器开断失步故障分析与研究[J]. 电工电气,2011(12):13-18.
NA Hu, LI Yamei, WEI Zhiyong, et al. Analysis and study on out-of-phase fault of circuit breaker's break-off with opening resistance[J]. Electrotechnics Electric, 2011(12): 13-18.

[6] 刘渝根,米宏伟,王建南,等. 小容量发电机出口断路器的瞬态恢复电压研究[J]. 高电压技术,2015,41(6):1943-1950.
LIU Yugen, MI Hongwei, WANG Jiannan, et al. Research of transient recovery voltage of circuit breaker in small capacity generator terminal[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6):1943-1950.

- [7] 陈水明, 许伟, 杨鹏程, 等. 500 kV 变电站 66 kV 侧断路器瞬态恢复电压特征[J]. 高电压技术, 2009, 35(6): 1301-1308.
CHEN Shuiming, XU Wei, YANG Pengcheng, et al. Characteristics of transient recovery voltage of 66 kV circuit breaker in 500 kV substation[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1301-1308.
- [8] 杜宁, 关永刚, 张景升, 等. 真空断路器开断并联电抗器的三相建模[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 6-9.
DU Ning, GUAN Yonggang, ZHANG Jingsheng, et al. Three-phase modeling of vacuum circuit breakers switching off shunt reactors[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 6-9.
- [9] 周沛洪, 谷定燮, 戴敏, 等. 1 000 kV 特高压断路器的瞬态恢复电压[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 211-217.
ZHOU Peihong, GU Dingxie, DAI Min, et al. Research on transient recovery voltage of UHV circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 211-217.
- [10] 张万荣, 赵伯楠, 苟锐锋. 发电机出口真空断路器瞬态恢复电压的研究[J]. 高压电器, 2000, 36(4): 15-18.
ZHANG Wanrong, ZHAO Bonan, GOU Ruifeng. Research on transient recovery voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2000, 36(4): 15-18.
- [11] 马占峰, 成勇, 贾华, 等. 发电机断路器用防护电容器的选型及应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(5): 57-61.
MA Zhanfeng, CHENG Yong, JIA Hua, et al. Investigation on the model selection and application of the voltage protection capacitors for generator circuit breaker[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(5): 57-61.
- [12] 淡淑恒, 余潇寒. 弧隙电阻对发电机断路器瞬态恢复电压的影响研究[J]. 高压电器, 2018, 54(12): 36-42.
DAN Shuheng, YU Xiaohan. Effect of arc-gap resistance on transient recovery voltage of generator circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 36-42.
- [13] ORAMUS P, CHMIELEWSKI T, KUCZEK T, et al. Transient recovery voltage analysis for various current breaking mathematical models: Shunt reactor and capacitor bank de-energization study[J]. Archives of Electrical Engineering, 2015, 64(3): 441-458.
- [14] 黄绍平, 杨青, 李靖. 基于 MATLAB 的电弧模型仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 64-66.
HUANG Shaoping, YANG Qing, LI Jing. Simulation of arc models based on MATLAB[J]. Proceedings of the Electric Power System and Automation, 2005, 17(5): 64-66.
- [15] ZIANI A, MOULAI H. Hybrid model of electric arcs in high voltage circuit breakers[J]. Electric Power Systems Research, 2012(92): 37-42.
- [16] CHMIELEWSKI T, ORAMUS P, SZEWCZYK M, et al. Circuit breaker models for simulations of short-circuit current breaking and slow-front overvoltages in HV systems[J]. Electric Power Systems Research, 2017(143): 174-181.
- [17] HUTTER S, UGLEŠIĆ I, ZAGREB E, et al. Universal arc resistance model 'zagreb' for EMTP[C]//19th International Conference on Electricity Distribution. Vienna: [s.n.], 2007: 1-4.
- [18] 施围, 邱毓昌, 张乔根. 高电压工程基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
SHI Wei, QIU Yuchang, ZHANG Qiaogen. Fundamentals of high voltage engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [19] 严旭, 姜旭, 朱凯, 等. SF₆ 断路器灭弧室内电弧特性参数间的相互关系研究[J]. 电气技术, 2021, 22(5): 6-9.
YAN Xu, JIANG Xu, ZHU Kai, et al. Study on interrelationship between parameters of arc characteristics of SF₆ circuit breaker[J]. Electrical Engineering, 2021, 22(5): 6-9.
- [20] 刘北阳, 傅中, 刘春, 等. 高压断路器弧触头动态接触电阻研究[J]. 高压电器, 2018, 54(9): 43-51.
LIU Beiyang, FU Zhong, LIU Chun, et al. Analysis on dynamic contact resistance between arcing contacts for high voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(9): 43-51.
- [21] 李兴文. 高压 SF₆ 断路器开断性能仿真方法研究综述[J]. 广东电力, 2018, 31(8): 27-36.
LI Xingwen. Research review on simulation method for interruption performance of high voltage SF₆ circuit breaker[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(8): 27-36.
- [22] 陈嵩. 真空断路器投切 10 kV 并联电抗器过电压抑制方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
CHEN Song. 10 kV parallel reactor overvoltage suppression method[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [23] 刘浩军, 赵福强, 苏超, 等. 并联电容对发电机断路器暂态恢复电压 TRV 的影响研究[J]. 高压电器, 2017, 53(2): 186-190.
LIU Haojun, ZHAO Fuqiang, SU Chao, et al. Research of shunt capacitor impact on transient recovery voltage for generator circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(2): 186-190.
- [24] YANG Qing, CHEN Song, ZENG Xianglong, et al. Suppression measures for overvoltage caused by vacuum circuit breaker switching off 10 kV shunt reactor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 540-548.
- [25] GENG Yun, DONG Jinlong, CHEN Xingguo, et al. Three-phase modeling of 40.5 kV vacuum circuit breaker switching off shunt reactors and overvoltage suppression measure analysis[J]. Electric Power Systems Research, 2021(194): 107058.

- 析[J]. 高压电器, 2014, 50(11): 128-132.
- MA Hutao, HUANG Zhangqiang. Falling-off failure analysis on insulation lever of LW6 - 220 circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 128-132.
- [16] 张益舟, 程佳路, 汪 亮, 等. 两端接地断路器分、合闸时间测试方法研究[J]. 高压电器, 2019, 55(10): 59-64.
- ZHANG Yizhou, CHENG Jialu, WANG Liang, et al. Research of timing testing method on circuit breakers with both sides grounded[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 59-64.
- [17] 刘建寅. SF₆高压断路器机械特性测试及其状态评价[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 173-180.
- LIU Jianyin. Mechanical characteristic testing and status evaluation of SF₆ high - voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 173-180.
- [18] 刘 超, 赵伟涛, 张 强, 等. 真空断路器弹簧操动机构机械特性的仿真与优化[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 65-71.
- LIU Chao, ZHAO Weitao, ZHANG Qiang, et al. Simulation and optimization for mechanical characteristics of spring operating mechanism in vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 65-71.
- [19] 张红军, 王文文, 张 强. 断路器绝缘拉杆的动力学仿真分析与试验研究[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 83-87.
- ZHANG Hongjun, WANG Wenwen, ZHANG Qiang. Dynamics simulation analysis and experimental study of circuit-breaker's insulation pull rod[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 83-87.
- [20] 刘 煜, 韩国辉, 雷 琴, 等. 操动机构缓冲对断路器传动系统的影响分析[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 43-47.
- LIU Yu, HAN Guohui, LEI Qin, et al. Influence analysis of buffering performance of operating mechanism on the transmission system of circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 43-47.
- [21] KUMAR M S S, SELVAN C P, SAMPATH P S, et al. Enhanced mechanical properties of glass fiber/epoxy composites using nanoclay[C]//2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). Dubai: [s.n.], 2019: 1-9.
- [22] KONGKAEW P, CHOAWANKLANG W. Fiber orientation effecting the mechanical properties at coconut fiber reinforce epoxy resin composite[C]//2015 International Conference on Science and Technology (TICST). Thailand: IEEE, 2015: 523-527.
- [23] 刘鸿文, 吕荣坤. 材料力学实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992: 304-309.
- LIU Hongwen, LYU Rongkun. Mechanics of materials[M]. Beijing: Higher Education Press, 1992: 304-309.
- [24] ZHANG Dongliang, WANG Binwu, LIU Fei. Analysis about the slender rod of buckling response[C]//2012 Second International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application. China: IEEE, 2012: 114-116.
- 刘 鹏(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事高端交/直流套管关键技术、特高压 GIL/GIS 关键技术、电力设备绝缘结构优化设计及多物理场仿真方面的研究工作(E-mail: pengliu@mail.xjtu.edu.cn)。
- 胡睿智(1997—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电工材料性能检测和设备绝缘特性分析(E-mail: 195754809@qq.com)。

(上接第 100 页)

- [26] 刘 波, 陈轩恕, 兰贞波, 等. 基于紧耦合分裂电抗器的冲击发电机保护断路器成套装置动稳定分析及试验研究[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 23-31.
- LIU Bo, CHEN Xuanshu, LAN Zhenbo, et al. Analysis and experiment study on dynamic stability of setup for impulse generator protection circuit breaker based on tight coupling split reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 23-31.
- [27] 庄稼人, 张 玲, 郑占锋. 高压断路器合成试验时工频恢复电压的规定和产生[J]. 高压电器, 2021, 57(7): 12-17.
- ZHUANG Jiaren, ZHANG Ling, ZHENG Zhanfeng. Specification and generation of power frequency recovery voltage for synthetic test of HV circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7): 12-17.
- [28] 杨 为, 高享想, 朱太云, 等. 基于电流零点直流分量的中压断路器 T100a 试验 TRV 参数计算[J]. 高压电器, 2018, 54(8): 104-108.
- YANG Wei, GAO Xiangxiang, ZHU Taiyun, et al. Calculation of TRV parameters of T100a test for medium voltage circuit - breakers based on the DC component at current zero[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 104-108.
- 白玉卓(1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电气工程设计(E-mail: 719908044@qq.com)。