

GIS对接冲击试验方法及冲击电压波形分析

谭向宇¹, 文 韬², 刘轩东², 庞 磊²

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217;

2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 大容量GIS冲击电压试验电压波形受回路电感影响较大,影响输出波形波前时间,降低冲击试验绝缘缺陷检测的有效性。笔者从冲击试验时电压引入方式入手,基于研制的2 000 kV紧凑型冲击电压发生装置,提出了GIS对接冲击试验方法,开展了145 kV和252 kV GIS对接冲击试验。该方法利用变阻抗转接段和液压升降装置,可将冲击电压发生器电压输出端直接与GIS预留对接口相连,回路紧凑,减小了因高压导线引入的电感,提高了冲击试验波形质量。最后通过仿真软件,分析了当负载电容量较大时,回路电感对冲击电压波形参数的影响规律,缩小回路电感是解决大容量设备标准LI试验的关键。

关键词: 气体绝缘金属封闭开关设备; 冲击试验; 对接方式; 冲击电压波形参数; 回路电感; 负载电容

Method of Impulse Test for GIS with Docking Way and Impulse Waveform Analysis

TAN Xiangyu¹, WEN Tao², LIU Xuandong², PANG Lei²

(1. Yunnan Power Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Kunming 650217, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The impulse test waveform for GIS with large capacitance is greatly influenced by the circuit inductance, it may influence the impulse waveform front time and decrease the effectiveness of insulation defects detecting. Based on the developed 2 000 kV compact impulse voltage generator, the impulse test method of GIS with docking way is proposed, and the impulse tests for 145 kV and 252 kV GIS are carried out. Using the variable impedance switching section and the hydraulic lifting device, it can connect the voltage output terminal of the impulse voltage generator directly to the reserved docking port of GIS, which can make the circuit compact, reduce the inductance introduced by the high voltage wire, and improve the impulse test waveform quality. Finally, the influence of the circuit inductance on the impulse waveform parameters is analyzed by the simulation. Reducing circuit inductance is the key to solve the problem of standard LI test for equipment with large capacitance.

Key words: gas-insulated metal-enclosed switchgear (GIS); impulse test; docking way; impulse waveform parameter; circuit inductance; load capacitance

0 引言

SF₆气体绝缘金属封闭开关设备(gas-insulated metal-enclosed switchgear, GIS)^[1-3]具有占地面积小、受自然环境影响小、运行安全可靠、检修和维护周期长等优点,自20世纪60年代问世以来便在国内外电力系统中得到了广泛应用^[4-5]。随着电压等级的增加,特别是超、特电压等级GIS(gas-insulated metal-enclosed switchgear)以及长GIL(gas-insulated metal-

enclosed transmission line)设备,设备负载电容量大,传统敞开式冲击电压发生器由于本体固有电感大,很难满足大容量负载条件下标准LI(lightning impulse)试验和陡波冲击试验的要求^[6-8]。在现有传统敞开式冲击设备的基础上,为了开展现场LI试验,IEC和国标放宽了LI试验波形参数要求:LI波前时间可延长至8 μs;如果采用振荡LI,波前时间可延长至约15 μs^[9-10]。与标准LI相比,此类现场冲击电压试验波形波前时间显著增加^[11-13]。相关研究表明,当GIS中存在局部电场集中的缺陷时,随冲击电压波前时

收稿日期:2017-08-01; 修回日期:2017-10-11

间增加, 间隙放电电压呈上升趋势, 即波前时间越长, 冲击电压试验检测缺陷的有效性越低^[14-17]。

LI试验波前时间受回路电感限制, 冲击电压波前时间 t_f 决定于回路电感 L 和负载电容 C_f ^[18], 即

$$t_f = 4.66 \sqrt{LC_f} \quad (1)$$

当试验负载一定时, 冲击试验的波形质量和回路电感 L 密切相关, 回路电感越低, 波前时间越短, 波形质量越高。回路电感主要来自冲击电压发生器的本体固有电感和电压引入方式带来的高压导线电感。因此, 可以从这两方面入手, 减小回路电感, 提高冲击电压发生器带负载能力。近年来, 紧凑型低电感冲击电压发生器的研究取得了突破性的进展, 冲击电压发生器每级200 kV单元电感可低于1 μH ^[16], 从一定程度上解决了大容量负载标准LI冲击电压试验的技术瓶颈。

目前冲击试验往往通过高压导线经套管引入GIS, 该方式操作方便, 易于冲击试验在工厂和现场的开展。但高压导线的电感量达 $\mu\text{H}/\text{m}$ 量级, 特别是对于电压等级较高的GIS, 试验时高压导线长度可达数十m, 使回路电感增加量达数十 μH 。因此, 笔者依托研制的2 000 kV紧凑型冲击电压发生装置^[20](简称2 MV装置), 配合对接冲击试验辅助设备, 提出GIS对接冲击电压试验, 并开展了145 kV和252 kV GIS对接冲击试验。

1 对接冲击试验的准备

1.1 GIS 间隔介绍

以某厂145 kV GIS样机为例对试品作简要介绍, 见图1。包括: 套管、DES(三工位隔离/接地开关)、ES(接地开关)、CB(断路器)、CB操作机构、电流互感器、电缆终端和对接口。该产品为三共箱式结构, 与冲击电压发生器实现对接功能的对接口见图2。通过高压开关测试仪可实现控制CB、DES、ES机构动作。



图1 某厂145 kV GIS样机实物图

Fig. 1 Picture of the 145 kV GIS prototype

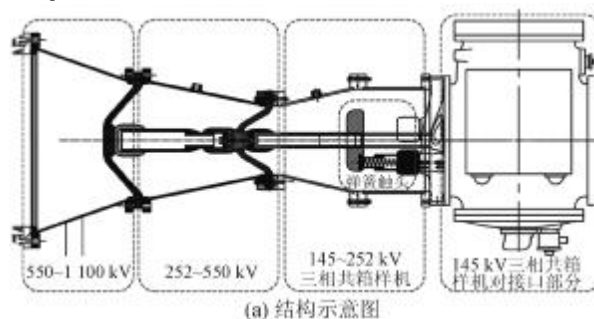


图2 对接口实物图

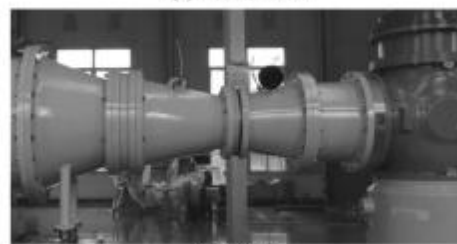
Fig. 2 Picture of the docking port

1.2 变阻抗转接段设计

所研制2 MV装置末端接口为百万特高压GIS尺寸, 要通过变阻抗转接段将其过渡到与样机相同的尺寸。考虑到要同时能对550 kV GIS和252 kV GIS进行对接试验, 变阻抗转接段分为550~1 100 kV(可直接对接550 kV GIS)、252~550 kV(可直接对接252 kV GIS)、145~252 kV三相共箱样机, 见图3。其中, 对接使用的弹簧触头安装在需要进行试验的某一相上, 另外两相通过套管外部接地。弹簧触头与另一侧对接平板电极相接, 实现电气上的连接, 见图4。



(a) 结构示意图



(b) 实物图

图3 对接用变阻抗转接阶段

Fig. 3 The transition tank used for docking

1.3 对接试验辅助设备

由于2 MV装置和样机对接口中心不在同一水平高度, 需要通过对接辅助设备液压升降装置将2 MV装置的对接口中心调节到与样机中心同样高度, 便于对接操作。该液压升降装置主要有3大功能:

1) 升降功能: 由4只升降液压缸驱动剪刀叉组件

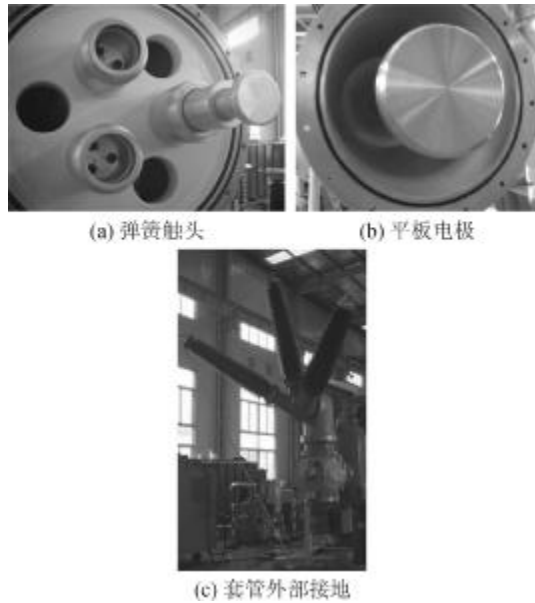


图4 对接时电气连接

Fig. 4 The electrical connections during docking

旋转,从而带动平台上下运动,升降高度为350 mm;

2)左右滑移功能:由2只左右滑移液压缸驱动平台做左右滑移运动,滑移范围为 ± 150 mm;

3)前后滑移功能:由2只前后滑移液压缸驱动平台做前后滑移运动,滑移范围为 ± 300 mm;

通过对接辅助设备的配合,2 MV装置与145 kV GIS和252 kV GIS样机对接现场布置见图5。



图5 对接冲击试验现场

Fig. 5 The impulse test site using docking way

2 试验结果及分析

2.1 145 kV GIS对接冲击试验

三工位隔离接地开关的动触头位于CB两侧的母线端口上,通过操作样机DES和ES,可实现3种负载形式的切换。①Case₁: DES₂隔离开关断开、接地开

关闭合,DES₁隔离开关和接地开关都断开,相当于发生器空载(或只带变阻抗转接段),见图6(a);②Case₂: DES₂隔离开关闭合、接地开关断开,DES₁隔离开关和接地开关都断开,相当于负载为不带套管的样机部分,见图6(b);③Case₃: DES₂隔离开关闭合、接地开关断开,DES₁隔离开关闭合、接地开关断开,相当于负载为整个样机间隔,见图6(c)。

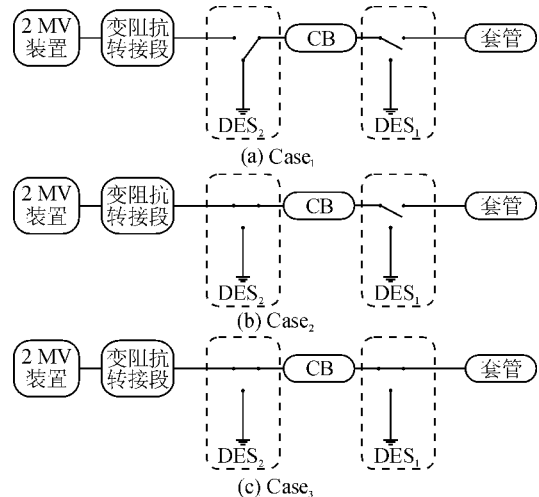


图6 3种负载接入方式

Fig. 6 Three types of load access

调节2 MV装置波前电阻阻值,可获得不同波形参数冲击电压,波前电阻分别设置为 R_f 为5、10、500、2 000 Ω 。输出冲击电压波形由2 MV装置锥形电容分压器测量,经过标定,该测量系统可满足ns级陡脉冲和数百 μs 缓脉冲的准确测量^[24]。不同回路参数下输出冲击电压波形见图7。

从图7可得冲击波形参数见表1、2。波前时间采用30%-90%方法计算,即

$$t_f = (t_{90\%} - t_{30\%}) / 0.6. \quad (2)$$

式(2)中, $t_{90\%}$ 和 $t_{30\%}$ 分别为电压值为90%或30%峰值对应的时间。

当 R_f 取500 Ω 时,带145 kV GIS样机负载时,波前时间为1.30 μs ,在标准LI的范围内($1.2 \mu s \pm 30\%$),故可证明,用该装置对145 kV电压等级GIS间隔进行标准雷电冲击耐压试验的方案是可行的。

2.2 252 kV GIS对接冲击试验

采用负载接入方式Case₃时对接252 kV GIS时输出冲击电压波形见图8,其波形参数见表3。当 R_f 取500 Ω 时,带252 kV GIS样机负载时,波前时间为1.38 μs ,也在标准LI的范围内。可进一步通过减小波前电阻获得更快的前沿。

3 回路电感对冲击电压试验波形的影响

文中进行的对接冲击试验目的是为了验证对

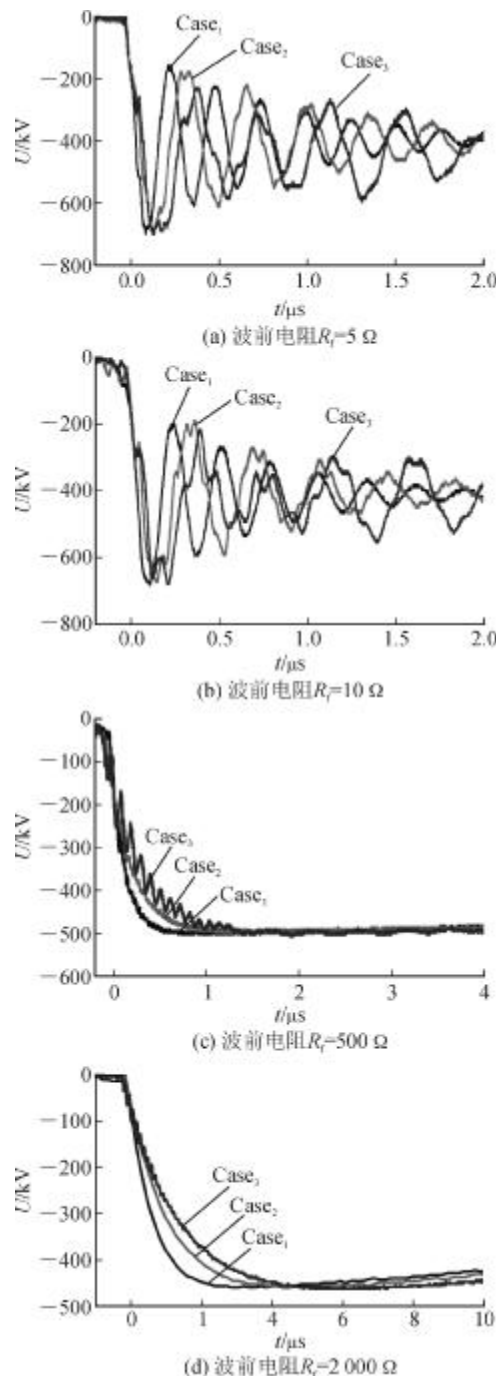


图 7 不同回路参数下输出冲击电压波形(145 kV)

Fig. 7 The impulse waveforms under different circuit parameters when docking with 145 kV GIS

接冲击试验方案,考核辅助设备(包括变阻抗转阶段、液压升降装置)在对接试验中的工作情况。由于试验采用的样机电压等级较低,并且没有分支母线,故负载电容量较小。在标准LI波形范围内,回路始终处于过阻尼状态,并没有体现回路电感对冲击电压波前时间的影响规律。下面利用ATP-EMTP电磁暂态分析软件分析当负载为特高压GIS时回路电感对波形参数的影响。

接入电容性负载的冲击电压发生器放电回路的等效简化方法见图9。其中, C_i 为冲击电压发生器的等效电容,为了满足特高压GIS冲击试验,冲击电压发生器以3 000 kV为例,3 000 kV冲击电压发生器装置15级开关触发导通瞬间,电路变为30个电容值为2 μF 的电容串联,等效电容 C_i 为66.67 nF; L_{s1} 为发生器本体电感,来源于脉冲电容器、火花开关电弧、本体结构电感等, L_{s2} 为波前电阻和高压引线电感,可取10 μH ,取 $L_{s1}+L_{s2}=110\ \mu\text{H}$ 或25 μH ;S为火花开关; R_f 为波尾电阻,设定波尾时间50 μs ,则取 $R_f=1\ \text{k}\Omega$; R_i 为波前电阻,通过调节 R_i 的阻值实现对电压波前时间和相对过冲幅值的调节; C_L 为负载电容,以特高压GIS单间隔为例,负载电容取5 000 pF。

不同发生器本体电感 L_{s1} 下,GIS负载电压波形随波前电阻的变化规律见图10。从图10可以看出,当 R_i 取值满足临界阻尼条件时,负载电压波形为双指数冲击,波形无过冲。随 R_i 减小,波前时间减小,但波形过冲增大。当回路电感由110 μH 减小至25 μH 时,临界阻尼电阻由300 Ω 减小至150 Ω ,其对应的波前时间也相应减小,回路电感对负载电压波形参数影响较大。

IEC 60060-1—2010与GB/T 16927.1—2011规定,标准LI冲击电压的波前时间允许取值范围为 $1.2\ \mu\text{s}\pm 30\%$,相对过冲幅值的最大允许值为10%。两种回路电感下,波前时间 t_f 与相对过冲幅值 β' 随波前电阻 R_i 的变化规律见图11。从图11中可以看出,波前时间 t_f 与波前电阻 R_i 正相关,相对过冲幅值 β' 与波前电阻 R_i 负相关,通过调节 R_i 的阻值可使波形满足标

表 1 振荡型冲击波形参数(145 kV)

Table 1 Oscillating impulse waveform parameters when docking with 145 kV GIS

R_f/Ω	负载情况	U_p 峰值/kV	30% U_p /kV	90% U_p /kV	$t_{30\%}$ /ns	$t_{90\%}$ /ns	t_f /ns
5	Case ₁	-700	-210.0	-630.0	5.40	57	86
	Case ₂	-700	-210.0	-630.0	4.40	85	134
	Case ₃	-700	-210.0	-630.0	4.40	114	183
10	Case ₁	-674	-202.2	-606.6	1.40	54	88
	Case ₂	-674	-202.2	-606.6	1.42	89	146
	Case ₃	-674	-202.2	-606.6	1.51	125	206

表2 非振荡双指数冲击波形参数(145 kV)

Table 2 Non-oscillating double exponential impulse waveform parameters when docking with 145 kV GIS							
R_f/Ω	负载情况	U_p 峰值/kV	30% U_p /kV	90% U_p /kV	$t_{30\%}/\mu s$	$t_{90\%}/\mu s$	$t_f/\mu s$
500	Case ₁	-500	-150	-450	-0.10	0.29	0.65
	Case ₂	-500	-150	-450	-0.09	0.50	0.99
	Case ₃	-500	-150	-450	-0.08	0.70	1.30
2 000	Case ₁	-460	-138	-414	0.13	1.34	2.02
	Case ₂	-460	-138	-414	0.19	2.16	3.28
	Case ₃	-460	-138	-414	0.25	2.79	4.23

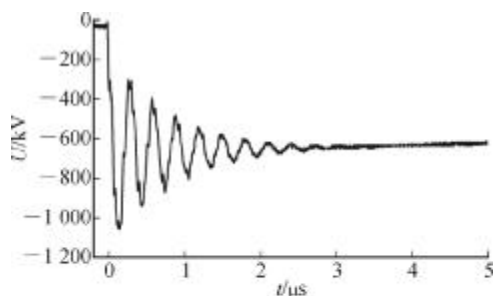
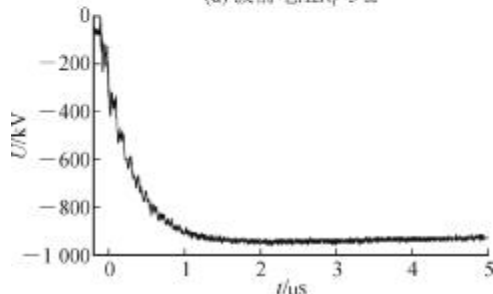
(a) 波前电阻 $R_f=5\ \Omega$ (b) 波前电阻 $R_f=500\ \Omega$

图 8 不同回路参数下输出冲击电压波形(252 kV)

Fig. 8 The impulse waveforms under different circuit parameters when docking with 252 kV GIS

表3 非振荡双指数冲击波形参数(252 kV)

Table 3 Impulse waveform parameters when docking with 252 kV GIS							
R_f/Ω	负载情况	U_p 峰值/kV	30% U_p /kV	90% U_p /kV	$t_{30\%}/\mu s$	$t_{90\%}/\mu s$	$t_f/\mu s$
5	Case ₃	-1 050	-315	-945	0.00	0.096	0.16
500	Case ₃	-950	-285	-855	-0.02	0.810	1.38

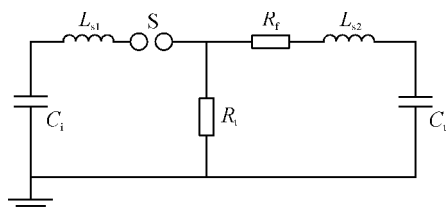


图 9 冲击电压发生器放电等效电路图

Fig. 9 The discharge equivalent circuit diagram of impulse voltage generator

GIS对接冲击试验,验证了该方法实际应用的可能性。分析大容量负载下回路电感对试验电压波形波前时间和相对过冲幅值的影响,表明缩小回路电感是解决大容量设备标准LI试验的关键。

准要求。但当回路电感较大时,即使 $\beta'=10\%$,仍不能获得 $t_f \leq 1.56\ \mu s$ 的冲击电压,见图11(a),当 $R_f=190\ \Omega$ 时, $\beta'=10\%$, $t_f=1.92\ \mu s$ 。发生器本体电感由 $100\ \mu H$ 减小至 $15\ \mu H$ 时,当 $R_f=90\ \Omega$ 时, $\beta'=10\%$, $t_f=0.98\ \mu s$,当 $R_f=152\ \Omega$ 时, $\beta'=0\%$, $t_f=1.56\ \mu s$,即 $90\ \Omega \leq R_f \leq 150\ \Omega$ 时,可满足标准LI冲击耐压试验的需求。

上述分析充分说明当负载容量较大时,回路电感对冲击电压波形参数以及开展标准LI冲击试验的影响。因此,文中提出的对接冲击试验方法对减小回路高压引线电感具有重要的意义。

4 结语

文中基于研制的2 000 kV紧凑型冲击电压发生装置,提出了GIS对接冲击试验方法。通过变阻抗转接段和液压升降装置的配合,可将冲击电压发生器电压输出端与不同电压等级GIS预留对接口相连。该方法从优化电压引发方式方面减小了高压导线引入回路的电感量。成功开展了145 kV和252 kV

参考文献:

- [1] 陈维江,颜湘莲,王绍武,等. 气体绝缘开关设备中特快速瞬态过电压研究的新进展[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 1-11.
CHEN Weijiang, YAN Xianglian, WANG Shaowu, et al. Recent progress in investigations on very fast transient over-voltage in gas insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 1-11.
- [2] SRIVASTAVA K, MORCOS M. A review of some critical aspects of insulation design of GIS/GIL systems[C]//IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition. [S.l.]: IEEE, 2001: 787-792.
- [3] OKUBO H, BEROUAL A. Recent trend and future per-

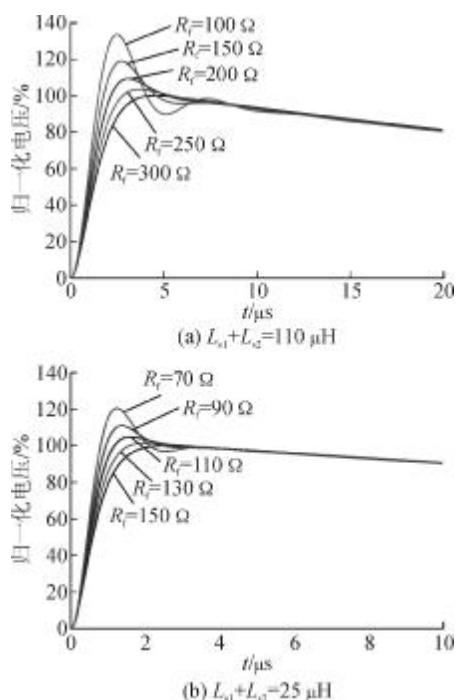


图 10 不同波前电阻下的负载电压波形

Fig. 10 Output impulse waveforms under different wavefront resistances

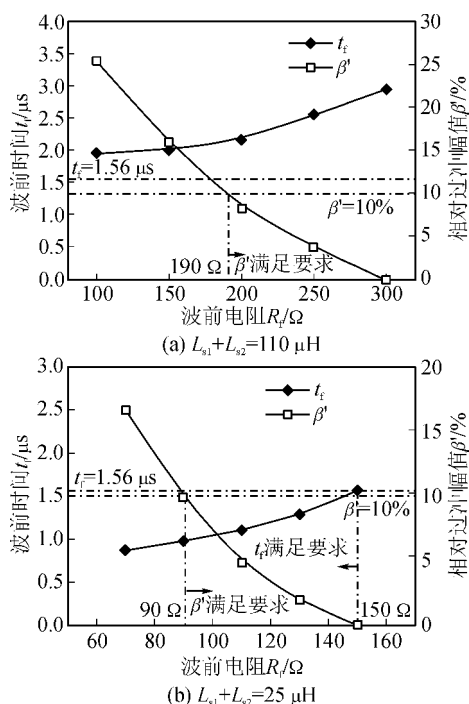


图 11 波前时间和相对过冲幅值随波前电阻变化曲线

Fig. 11 T_f and β' vs. R_f curves

spectives in electrical insulation techniques in relation to sulfur hexafluoride (SF_6) substitutes for high voltage electric power equipment[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(2): 34-42.

- [4] RIECHERT U, HOLAUS W. Ultra high-voltage gas-insulated switchgear-a technology milestone[J]. European Transactions on Electrical Power, 2012, 22(1): 60-82.

- [5] TEKLETSADIK K, CAMPBELL L. SF_6 breakdown in GIS[J]. IEEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, 1996, 143(5): 270-276.

- [6] 王浩洋, 孙伟, 傅正财, 等. 负荷对冲击电压发生器输出能力的影响研究[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 92-95.

WANG Haoyang, SUN Wei, FU Zhengcai, et al. Investigation of load impact on output capability of impulse voltage generators[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 92-95.

- [7] 臧绪运, 赵刚, 孙伟, 等. 3 600 kV 冲击电压发生器大负载输出特性[J]. 高电压技术, 2002, 28(8): 14-16.

ZANG Xuyun, ZHAO Gang, SUN Wei, et al. Analysis of capacitive load ability of 3 600 kV serial impulse generator [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(8): 14-16.

- [8] 张仁豫, 陈昌渔, 王昌长. 高电压试验技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

ZHANG Renyu, CHEN Changyu, WANG Changchang. Highvoltage testing technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

- [9] IEC Standard 62271-203—2003 High voltage switchgear and control-gear-gas-insulated metal enclosed switch-gear [S]. 2003.

- [10] GB/T 7674—2008 额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

GB/T 7674—2008 Gas-insulated metal-enclosed switch-gear for rated voltages of 72.5 kV and above[S]. Beijing: China Standard Press, 2008.

- [11] 胡伟, 陈勇, 万启发, 等. 三峡 550 kV GIS 的雷电冲击耐受试验方法[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 883-887.

HU Wei, CHEN Yong, WAN Qifa, et al. Test on lightning impulse withstand voltage of the three gorges right bank 550 kV GIS substation[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 883-887.

- [12] 刘强, 郭洁, 胡斌, 等. 550 kV GIS 不同冲击波试验电压作用下的电压等价性分析[J]. 高压电器, 2013, 49(10): 114-120.

LIU Qiang, GUO Jie, HU Bin, et al. Voltage equivalent analysis of 550 kV GIS under different impulse testing voltages[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(10): 114-120.

- [13] OKABE S, UETA G, TSUBOI T, et al. Study on switching impulse test waveform for UHV-class electric power equipment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(3): 803-811.

- [14] 张乔根. 陡波前冲击电压下 SF_6 气体间隙及绝缘子沿面放电特性[D]. 西安: 西安交通大学, 1996.

ZHANG Qiaogen. Discharge characteristics of SF_6 gap and with insulator under steep-fronted impulses[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1996.

- [15] LUXA G, KYNAST E. Recent research activity on the dielectric performance of SF_6 with special reference to very fast transients[C]//International Conference on Large High

- Voltage Electric Systems. Paris, France: [s.n.], 1988: 15-20.
- [16] MATSUMOTO S, AOYAGI H, MURASE H, et al. Non-uniform field flashover characteristics in SF₆ gas under very fast transient overvoltages[J]. IEEE Transactions on Power and Energy, 1990, 110(9): 769-777.
- [17] WEN T, ZHANG Q G, YF Q, et al. On-site standard lightning impulse test for 1 100 kV GIS with large capacitance[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2016, 32(6): 36-43.
- [18] WEN Tao, ZHANG Qiaogen, GUO Can, et al. 3 MV compact very fast transient overvoltage generator for testing ultra-high-voltage gas-insulated switchgear[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2014, 30(6): 26-33.
- [19] 张洁, 谭向宇, 朱涛, 等. 便携式快前沿紧凑型现场冲击试验[J]. 云南电力技术, 2015(1): 78-82.
- ZHANG Jie, TAN Xiangyu, ZHU Tao, et al. Research on on-site impulse test device of the portable and compact 2 MV very fast transient overvoltage generator[J]. Yunnan Electric Power, 2015(1): 78-82.
- [20] 殷禹, 刘石, 时卫东, 等. 2.5 MV特快速瞬态过电压发生器[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 48-55.
- YIN Yu, LIU Shi, SHI Weidong, et al. Research and design of the 2.5 MV very fast transient overvoltage generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 48-55.
- 谭向宇(1980—), 男, 博士后, 高工, 主要从事气体绝缘组合电器VFTO试验、局部放电检测和测评的研究工作。

《高压电器》2017 年第 12 期广告单位

彩色广告

封一: 西安高压电器研究院有限责任公司
拉页: 西安高压电器研究院有限责任公司
封二: 莱茵技术(上海)有限公司
封三: 珠海思创电气有限公司
封四: 上海乐研电气有限公司
前插 1: 北京京东方真空电器有限责任公司
前插 2: 前视红外光电科技(上海)有限公司
前插 3: 西安华伟电力电子技术有限责任公司
前插 4: 宁波天安(集团)股份有限公司

前插 5: 陕西龙翔电器有限公司
前插 6: 宁波伟隆电器成套有限公司
前插 7: 陕西斯瑞新材料股份有限公司
前插 8: 常州帕斯菲克自动化技术股份有限公司
前插 9: 浙江雅博自动化设备有限公司
前插 10: 西安高压电器研究院有限责任公司
前插 11: 攀时(上海)高性能材料有限公司
前插 12: 库柏(宁波)电气有限公司