



中华人民共和国国家标准

GB/T 311.4—2010

绝缘配合 第4部分：电网绝缘配合及其 模拟的计算导则

Insulation co-ordination—
Part 4: Computational guide to insulation co-ordination
and modeling of electrical networks

(IEC 60071-4:2004, MOD)

2010-11-10 发布

2011-05-01 实施

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 发布

目 次

前言	VII
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号和缩写	3
5 过电压的类型	4
6 研究类型	5
6.1 暂时过电压(TOV)	6
6.2 缓波前过电压(SFO)	6
6.3 快波前过电压(FFO)	6
6.4 特快波前过电压(VFFO)	6
7 网络元件的表示和数值处理	6
7.1 概述	6
7.2 数值处理	6
7.3 架空线路和地下电缆的表示	8
7.4 计算暂时过电压时电网元件的表示	8
7.5 计算缓波前过电压时的电网元件的表示	12
7.6 计算快波前瞬态时电网元件的表示	15
7.7 计算特快波前过电压时网络元件的表示	23
8 暂时过电压分析	25
8.1 概述	25
8.2 暂时过电压的快速估算	25
8.3 暂时过电压的详细计算	25
9 缓波前过电压分析	27
9.1 概述	27
9.2 SFO 研究的快速方法	28
9.3 采用的方法	28
9.4 统计法导则	29
10 快波前过电压(FFO)分析	30
10.1 概述	30
10.2 统计法和半统计法的应用导则	31
11 特快波前过电压(VFFO)的分析	34
11.1 概述	34
11.2 研究的目的	34
11.3 VFFO 的产生和类型	34

11.4	研究用导则	35
12	模拟计算示例	35
12.1	概述	35
12.2	示例 1:包括长线在内的大型输电系统的 TOV	36
12.3	示例 2(SFO)——500 kV 线路充电(合闸)	38
12.4	示例 3(FFO)——500 kV GIS 变电站的雷电防护	41
12.5	工况 4(VFFO)——765 kV GIS 中瞬态的模拟	45
附录 A	(资料性附录) 架空线路和地下电缆的表示	65
A.1	单导体线路的精确 Π 模型	65
A.2	常规 Π 回路	65
A.3	行波法:常电感的单相无损线	66
A.4	与频率相关的单导线线路模型	66
A.5	多导体线路的模型	66
A.5.1	模型参数	66
A.5.2	转换矩阵的近似	67
附录 B	(资料性附录) 断路器电弧模型	68
B.1	开断步骤	68
B.2	电弧的数学模型	68
B.3	回路断开的特殊情况	69
B.3.1	开断线路故障	69
B.3.2	开断小电感电流	69
附录 C	(资料性附录) 计算电力系统设备雷害故障率的概率法	70
C.1	简介	70
C.2	概率模式的确定	70
C.2.1	雷击点	70
C.3	强度函数的计算和故障域的确定(见图 C.1)	71
C.4	故障率的积分计算	72
C.5	预期的年故障次数	73
附录 D	(资料性附录) 计算示例 5(TOV)——400 kV/200 kV 输电系统中线路和电抗器间的谐振	74
D.1	输入参数和模拟	74
D.1.1	线路图	74
D.1.2	线路参数	74
D.1.3	发电机	74
D.1.4	变压器	74
D.1.5	电抗器	75
D.2	方法	76
D.3	结果和解释	76
附录 E	(资料性附录) 计算示例 6(SFO)——因 SFO 引起的气体绝缘线路故障率的计算	79
E.1	输入的数据和模型	79
E.1.1	线路图(图 E.1)	79

E. 1.2	电源	79
E. 1.3	避雷器(7.5.11)	79
E. 1.4	断路器	80
E. 1.5	架空线路和气体绝缘线路(GIL)	80
E. 1.6	残余电荷(7.5.2)	80
E. 2	采用的方法	80
E. 3	系统结构	82
E. 4	结果和分析	82
E. 5	故障率计算	83
E. 6	建议	84
附录 F (资料性附录)	计算示例 7(FFO)——开合小电感电流时的高频熄弧	86
F. 1	试验	86
F. 2	模拟的输入数据和模型	86
F. 2.1	电弧模型和电弧参数	86
F. 2.2	模拟电路	87
F. 3	结果和说明	88
参考文献		89
图 1	过电压的类型(特快波前过电压除外)	47
图 2	用于电感的阻尼电阻	47
图 3	用于电容的阻尼电阻	47
图 4	非线性元件稳态计算假定条件的示例	48
图 5	交流电压等效回路	48
图 6	动态电源模型	48
图 7	线性网络的等效表示	49
图 8	[56]中负载的表示	49
图 9	同步电机的表示	49
图 10	统计开关使用的双分布图解	50
图 11	多段输电杆塔[16], $H=l_1+l_2+l_3+l_4$	50
图 12	电晕支路模型的示例	51
图 13	伏秒特性曲线的示例	51
图 14	双斜线波形	52
图 15	CIGRE 的中凹波形	52
图 16	接地电极的简化模型	53
图 17	一个变电站纵深的网络模拟示例	53
图 18	两个变电站纵深的网络模拟示例	53
图 19	统计法和半统计法的应用	53
图 20	电气几何模型的应用	54
图 21	考虑到两个随机变量(雷击电流最大值和破坏性电压)的临界函数	54
图 22	GIS 和空气的界面处:外壳和地之间的耦合(Z_3),架空线路和地之间(Z_2)以及 母线导体和外壳之间(Z_1)[33]	54
图 23	试验系统的单线图	55

图 24	系统暂态稳定计算得到的 CHM7、LVD7 和 CHE7 处的 TOV	56
图 25	系统暂态稳定模拟得到的第 1、第 2 和第 3 电源中心的发电机频率	56
图 26	动态电源模型的方框图[55]	57
图 27	LVD7 处的 TOV——具有 588 kV 和 612 kV 固定连接的避雷器的电磁瞬态模拟	57
图 28	CHM7 处的 TOV——具有 588 kV 和 612 kV 固定连接的避雷器的电磁瞬态模拟	57
图 29	LVD7 处的 TOV——具有 484 kV 自动投切的金属氧化物避雷器的电磁瞬态模拟	58
图 30	CHM7 处的 TOV——具有 484 kV 自动投切的金属氧化物避雷器的电磁瞬态模拟	58
图 31	系统的模拟	58
图 32	辅助触头和主触头	59
图 33	具有残余电荷和合闸电阻的配置中的相对地过电压累积概率函数和绝缘放电概率示例	59
图 34	1 000 次操作的故障次数与设备耐受电压之间的关系	59
图 35	用于雷击研究的 500 kV GIS 变电站的电路图	60
图 36	雷电流的波形	61
图 37	一个 GIS 段(节点)故障和安全状态的界面的近似表示	61
图 38	联合概率密度函数等值曲线	61
图 39	具有合闸隔离开关的 765 kV GIS 的单线图(仅用粗线表示的 GIS 部分对此处模拟的瞬态现象是重要的;图 40 中的某些点也在此处表示出)	62
图 40	研究瞬态现象的 765 kV GIS 部分的模拟图	62
图 41	4 ns 的斜波	63
图 42	开关操作	64
表 1	过电压的类别和形状——标准电压波形和标准耐受试验	4
表 2	最严重的过电压类型和产生它们的工况之间的对应关系	5
表 3	现行的架空线路和地下电缆模型的应用和限制条件	8
表 4	文献[59]建议的对应于不同结构的 k 、 U_0 和 DE 值	18
表 5	摘自文献[44]的变压器对地最小电容	20
表 6	摘自文献[28]的典型变压器类设备对地电容	20
表 7	摘自文献[28]的断路器和隔离开关对地电容	20
表 8	首次负极性下行雷击的表示	21
表 9	首次负极性下行雷击的半峰值时间	22
表 10	负极性下行随后雷击的表示	22
表 11	负极性下行随后雷击的半峰值时间	22
表 12	VFFO 研究中元件的表示	24
表 13	FFO 研究方法的类型	31
表 14	电源侧参数	38
表 15	避雷器的特性	39
表 16	并联电抗器的特性	39
表 17	断路器的电容	40
表 18	残余电荷	40
表 19	系统结构	40
表 20	记录的过电压	41
表 21	1 000 次操作的故障次数	41
表 22	系统的模型	42

表 23	应用 EGM 法需要的数据	43
表 24	峰值电流分布	43
表 25	两条架空进线上不同区段的雷击次数	43
表 26	GIS 破坏性放电电压分布和雷电流峰值分布的参数	44
表 27	FORM 的风险估算(杆塔接地电阻=10 Ω)	44
表 28	对于 GIS11 的故障率估算	45
表 29	GIS 元件的模拟;765 kV GIS 的数据	45

前 言

本部分使用重新起草法修改采用 IEC 60071-4:2004《绝缘配合 第 4 部分:绝缘配合和电网模拟的计算导则》(英文版)。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 和 GB/T 20000.2—2009 给出的规则起草。

本部分与 IEC 60071-4:2004 的主要技术性差异及其原因如下:

- 3.17 代表性雷电流中用“雷电流最大值”代替“雷电流最小值”。IEC 60071-4:2004 编辑性错误,故进行了修改;
- 7.6.3.3 感性支路中用“ $0.5 \mu\text{H}/\text{m}$ ”代替“ $1 \mu\text{H}/\text{m}$ ”。根据我国经验, $1 \mu\text{H}/\text{m}$ 数值偏大,故进行了修改;
- 删除了“7.4.3.1 使用 PI 模型的建议”的条标题一行。因 7.4.3 中无 7.4.3.2,不符合 GB/T 1.1—2009 的相关规定。故进行了编辑性修改;
- 在 7.6.5.1.4 中增加“注 2:7.6.5.1.3 和 7.6.5.1.4 介绍的方法是针对标准大气条件的,未考虑海拔高度的影响,不宜直接应用于工程。”。因为 IEC 60071-4 的“7.6.5.1.3 采用面积标准的空气间隙模型”和“7.6.5.1.4 基于表示先导传播的空气间隙模型”介绍的方法均是针对标准大气条件而言的,未考虑海拔高度的影响,不能直接应用于工程。故加注予以说明以提高可操作性。另原 7.6.5.1.4 中的“注”顺延为“注 1”。
- 在 7.6.7 变压器的表 6 中增加电压等级 500 kV 变压器类设备典型对地电容数据。以适应我国的实际需要,提高可操作性。
- 在 7.6.8 断路器和隔离开关的表 7 中增加电压等级 500 kV 断路器和隔离开关类设备典型对地电容数据。以适应我国的实际需要,提高可操作性。
- 7.6.9 雷击
 - 删除“认为雷电统计对全世界是相同的。”一句。此话不严格,因为不同地区、不同国家的雷电流幅值的分布概率有较大的差异。
 - 增加“注:需注意地闪密度监测灵敏度应和雷电流幅值的监测灵敏度一致,否则会带来误差。”。
- 7.6.9.3 表示首次负极性下行雷击的概率分布
 - 删除了“也可以采用某些国家使用的一些已有的经验公式。”一行。不适用故删除。
 - 增加“注:根据我国的实际测量数据,我国大部分地区防雷计算中的雷电流幅值的分布采用 $\lg P(I_t) = -I_t/88$, 陕南以外的西北地区、内蒙古自治区的部分地区(这类地区的年平均雷暴日数一般在 20 及以下)少雷地区的雷电流幅值减半, $\lg P(I_t) = -I_t/44$ ”。因为不同地区、不同国家的雷电流幅值的分布概率有较大的差异,而 IEC 60071-4“7.6.9.3 仅介绍了 IEEE 提出的一个关于电流幅值的分布的简化公式,不完全适用于我国,故增加注释标明我国的实际以提高可操作性。”。
- 10.1.3 确定性法中用“最大雷电流”代替“最小雷电流”。IEC 60071-4:2004 编辑性错误,故进行了修改;
- 在 10.2.2 需要的数据 中增加“——塔头空气间隙的放电特性;”,计算需要。
- 在 12.3.1.4 表 15 避雷器的特性中用持续运行电压 U_c 的数据“324 kV”代替“350 kV”,用操作冲击残压 $U(2 \text{ kA})$ 的数据“907 kV”代替操作冲击残压 $U(1 \text{ kA})$ 的数据“864 kV”。以适应我国的实际需要,即符合 GB 11032 的相关规定。

—附录 A

- A.3 行波法:常电感的单相无损线中用公式“ $V(x,t) + Z_c I(x,t) = 2 \times Z_c F_1(x-vt)$ ”代替“ $V(t) + Z_c I(t) = 2 \times Z_c F_1(x-vt)$ ”。
- A.4 与频率相关的单导线线路模型中用公式“ $V_1(t) - F^{-1}(Z_c) \times I_1(t) = F^{-1}(e^{-\gamma l}) \times (V_2(t) + F^{-1}(Z_c) \times I_2(t))$ ”代替“ $V_1(t) - F^{-1}(Z_c) \times I_1(t) = F^{-1}(e^{-\gamma l}) \times (V_1(t) + F^{-1}(Z_c) \times I_2(t))$ ”。
- A.5.1 模型参数中用公式“ $-\frac{dV(p,x)}{dx} = Z(p)I(p,x); -\frac{dI(p,x)}{dx} = Y(p)V(p,x)$ ”代替“ $-\frac{dV(p,x)}{dx} = Z(p)I(p); -\frac{dI(p,x)}{dx} = Y(p)V(p)$ ”。

IEC 60071-4:2004 编辑性错误,故进行了修改。

——本部分与 IEC 60071-4:2004 的上述主要差异涉及的条款已通过在其外侧页边空白位置的垂直单线(|)进行了标示。

本部分中的附录 A、附录 B、附录 C、附录 D、附录 E、附录 F 为资料性附录。

本部分由中国电器工业协会提出。

本部分由全国高电压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会(SAC/TC 163)归口。

本部分负责起草单位:国网电力科学研究院、西安高压电器研究院有限责任公司。

本部分参加起草单位:河南平高电气股份有限公司、山东电力研究院、湖南省电力试研院、南方电网技术研究中心、广东省电力设计研究院、江西省电力科学研究院、库柏耐吉(宁波)电气有限公司。

本部分主要起草人:谷定燮、田恩文、周沛洪、王建生、王维洲、严玉林、何慧雯、张小勇。

本部分参加起草人:崔东、陈勇、王亭、曹祥麟、郭志红、李文艺、蒋正龙、蔡汉生、童军心、蒋斌。

绝缘配合

第 4 部分：电网绝缘配合及其 模拟的计算导则

1 范围

GB/T 311 的本部分规定了进行绝缘配合数字化计算的导则,并提出了普遍认可的建议:

- 电力系统的数字模型;
- 实施适用于数值计算的确定性法和统计法。

本部分适用于给出进行绝缘配合的计算方法、建模和示例方面的资料,以便采用 GB/T 311.2—2002 中提出的方法,并按照 GB 311.1—1997 选取设备或装置的绝缘水平。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件;凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB 311.1—1997 高压输变电设备的绝缘配合(neq IEC 60071-1:1993)

GB/T 311.2—2002 绝缘配合 第 2 部分:高压输变电设备的绝缘配合使用导则(eqv IEC 60071-2:1996)

GB/T 311.3 绝缘配合 第 3 部分:高压直流换流站绝缘配合程序(GB/T 311.3—2007, IEC 60071-5:2002,MOD)

GB 1984 高压交流断路器(GB 1984—2003,IEC 62271-100:2001,MOD)

GB 11032 交流无间隙金属氧化物避雷器(GB 11032—2000,eqv IEC 60099-4:1991)

GB/T 13499 电力变压器应用导则(GB/T 13499—2002,idt IEC 60076-8:1997)

GB/T 16927.1 高电压试验技术 第一部分:一般试验要求(GB/T 16927.1—1997,eqv IEC 60060-1:1989)

IEC 62271-110:2005 高压开关设备和控制设备—第 110 部分:感性负载开合(High-voltage switchgear and controlgear—Part 110:Inductive load switching)

3 术语和定义

除 GB 311.1—1997 外,下列术语和定义适用于本文件。

注:某些术语来自 IEC 的多语字典[1]¹。

3.1

反馈 backfeeding

通过变压器由低压侧向高压架空线路或电缆供电的工况。

¹ 方括号中的引用见参考文献。