

国内外输电线路元件的安全度设置

李峰, 程永锋, 夏开全

(中国电力科学研究院, 北京市 宣武区 100055)

Security Level Settings of Conductors, Ground Wires, Insulators and Fittings for Transmission Lines Designed by Related Codes in China and Other Countries

LI Feng, CHENG Yong-feng, XIA Kai-quan

(China Electric Power Research Institute, Xuanwu District, Beijing 100055, China)

ABSTRACT: The design principles and safety coefficients of design for conductors, ground wires, insulators and fittings in the codes issued in China and other countries are compared, the concept of safety level is led in and the computing formula for safety level is deduced. The values of load to effect ratios of above-mentioned components are computed. Based on the value of loading ratio given by the codes home and abroad, the safety levels of conductors, ground wires, insulators and fittings designed according to these codes are obtained. Calculation results show that as for above-mentioned components, the safety levels of those components designed by domestic codes are higher than those of them designed according to the codes of other countries.

KEY WORDS: transmission line; insulator; fittings; safety level

摘要: 对比了国内外导线、地线、绝缘子、金具的设计原则及设计安全系数, 引入了安全度的概念, 并推导出安全度计算公式, 计算了上述元件的荷载效应比值, 结合国内外标准的荷载比值, 计算得到各标准导线、地线、绝缘子、金具的安全度, 结果表明: 对于上述元件, 我国标准的设计安全度要高于国外标准, 文中所用方法可为研究我国输电线路元件的安全设置水平提供参考。

关键词: 输电线路; 绝缘子; 金具; 安全度

0 引言

2008年, 我国南方的冰灾导致输电线路大面积倒塔、断线^[1-4], 由现场踏勘及调查得知, 破坏的主要类型是杆塔首先损坏, 导致其他元件(导线、地线、绝缘子、金具)相继损坏, 杆塔倒塌后不易修复, 造成的损失很大。造成这种破坏现象的原因是我国输电线路元件强度的设计理念为: 直线塔的安全度最弱, 其次为导线、地线, 然后是绝缘子和金具, 最强的是基础。从这次冰灾的破坏现象来看, 这种单

一的设计理念不适用于所有的线路, 所以, 针对不同环境下的线路需要不同的设计理念, 这就需要对输电线路元件的强度匹配关系进行研究, 而元件安全度的研究是本项研究工作的前提。

研究输电线路运行可靠性和结构可靠性的文献较多^[5-14], 但是研究导线、地线、绝缘子、金具可靠性的文献很少。安全度是考虑了荷载系数和抗力安全系数的综合安全系数, 是描述元件设计可靠性水平的重要参量。文献^[15-17]提出了安全度的概念, 用来计算和度量相关结构的可靠性。本文对导线、地线、绝缘子、金具的安全度进行计算分析, 并结合国外相关标准进行对比研究, 其结果可为研究、设计元件的强度匹配关系提供参考。

1 安全度的计算方法

安全度也称为综合安全系数、相当安全系数, 也可理解为安全裕度, 是将荷载系数与抗力折减系数进行综合考虑后得到的安全系数, 可以综合反映元件的设计安全水平^[15-18]。

参考文献^[19], 极限状态方程建立为

$$Z = \gamma_M R - K \sqrt{g_1^2 + \dots + g_5^2} = \gamma_M R - K \sqrt{g_1^2 + \dots + (\rho_5 g_1)^2} \quad (1)$$

式中: γ_M 为构件抗力的折减系数; R 为抗力标准值; K 为设计安全系数; g_1 为重力荷载; g_2 为冰重力荷载; g_3 为自重加冰重力荷载; g_4 为无冰时风荷载; g_5 为覆冰时风荷载; ρ_2 为冰荷载与重力荷载的效应比值; ρ_3 为自重加冰荷载与重力荷载的效应比值; ρ_4 为风荷载与重力荷载的效应比值; ρ_5 为覆冰时风荷载与重力荷载的效应比值。

则荷载的综合系数可按下式计算

$$K_K = K_S / K_R \quad (2)$$

$$K_S = K \sqrt{1 + (\psi_2 \rho_2)^2 + \dots + (\psi_5 \rho_5)^2} / \sqrt{1 + \rho_2^2 + \dots + \rho_5^2} \quad (3)$$

$$K_R = \gamma_M \tag{4}$$

式中： K_K 为安全度； K_S 为荷载系数； K_R 为抗力折减系数； $\psi_2 \sim \psi_5$ 分别为国外标准与我国标准的荷载比值。

由式(2)可知，计算元件安全度，需要元件的荷载系数、抗力折减系数、荷载效应比值以及国内外标准的荷载比值等相关参数，其中，荷载系数和抗力折减系数统称为设计系数。

2 国内外输电线路元件的设计系数

2.1 DL/T 5092-1999 规定的设计系数

1) 导线、地线的设计系数。文献[18]规定：导线、地线的安全系数不应小于 2.5。地线的安全系数宜大于导线的安全系数，导线悬挂点的安全系数不应小于 2.25。参考文献[19]，对于文献[20]中的钢芯铝线，导线上的接续管、耐张管、补修管会使导线的断力降低，故设计使用的导线保证拉断力应为计算拉断力的 95%，这样导线、地线的荷载系数可以取 2.5，导线的抗力折减系数取 0.95，地线的抗力折减系数取 1。

2) 绝缘子、金具的设计系数。文献[18]规定：盘型绝缘子机械强度的安全系数不小于表 1 所列的数值；双联及多联绝缘子串应验算断一联后的机械强度，其荷载及安全系数按断联情况考虑。金具强度的安全系数最大使用荷载情况下不应小于 2.5，断线、断联情况下不应小于 1.5，故绝缘子的荷载系数取 2.7，抗力折减系数取 1；金具的荷载系数取 2.5，抗力折减系数取 1。

表 1 盘型绝缘子机械强度安全系数
Tab. 1 The safety factor of insulator

情况	安全系数
最大使用荷载	2.7
断线	1.8
断联	1.5

2.2 国外标准规定的输电线路元件的设计系数

国外标准主要参考了文献[21-22]，具体的情况如下：

1) 文献[21]的相关规定。

文献[21]中，规定按照荷载 Q_T 与强度 R 的设计要求，设计原则为

$$Q_T < R \tag{5}$$

式中： Q_T 为设计最大荷载； R 为设计强度。

对于线路元件的设计，式(5)可表示为

$$Q_T < \phi_N \phi_S \phi_Q \phi_c R_c \tag{6}$$

式中： Q_T 为荷载重现内的最大荷载； ϕ_N 为与承载单元个数有关的强度系数； ϕ_S 为与强度匹配有关的

强度系数； ϕ_Q 为与质量有关的强度系数； ϕ_c 为与材料强度有关的强度系数，或称为强度变异系数，如果强度变异系数低于 10%， $\phi_c = 1$ ； R_c 为材料强度。

① 导线、地线的设计系数。

导线、地线抗力的几个系数取值为： $\phi_N = \phi_S = \phi_Q = 1.0$ ， R_c 按照表 2 进行设计，则导线、地线的荷载系数取 1，抗力折减系数取 0.75。

表 2 导线、地线损伤和失效极限

Tab. 2 The damage and failure limit for conductor and ground wire

损伤极限	失效极限
最低极限大小为元件材料强度的 75%； 比例拉伸极限大小为材料强度的 70%~80%	材料强度

② 绝缘子串及金具的安全系数。

ϕ_N 的取值如表 3 所示，承载单元个数 N 的取值如表 4 所示。

表 3 强度系数 ϕ_N 的取值

Tab. 3 The values of ϕ_N

N	ϕ_N						
	$v_R=0.05$	$v_R=0.075$	$v_R=0.10$	$v_R=0.15$	$v_R=0.20$	$v_R=0.25$	$v_R=0.30$
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	0.98	0.98	0.97	0.94	0.91	0.87	0.84
5	0.96	0.94	0.92	0.85	0.80	0.79	0.64
						(0.84)	(0.84)
10	0.94	0.92	0.89	0.81	0.72	0.72	0.79
					(0.82)	(0.83)	(0.80)
20	0.93	0.90	0.85	0.77	0.66	0.62	0.51
				(0.83)	(0.77)	(0.77)	(0.73)
40	0.92	0.87	0.83	0.72	0.59	0.53	0.26
				(0.80)	(0.74)	(0.73)	(0.64)
80	0.91	0.86	0.79	0.68	0.53	0.44	0.16
			(0.84)	(0.77)	(0.71)	(0.69)	(0.60)
160	0.90	0.85	0.79	0.67	0.52	0.34	0.13
			(0.83)	(0.76)	(0.69)	(0.62)	(0.57)

注： v_R 为元件抗力的变异系数；表中的值是根据正态分布得出的，括号中的值是按对数正态分布得出的。

表 4 承载的单元数量

Tab. 4 The numbers of bearing load members

荷载	平原至丘陵地区	山地
最大阵风	1(1~5)	1(1~2)
最大覆冰	20(10~50)	2(1~10)
最大冰、风组合	1(1~5)	1(1~5)

注：括号中的数字范围代表 400m 档距的承载单元

对于所有的绝缘子串 $\phi_S = 0.9$ ，变异系数一般保持在 7% 以下，所以 $\phi_c = 1.0$ ， $\phi_Q = 1.0$ (材料质量比较差的除外)。连接部件的损伤与破坏极限如表 5 所示。

按照表 3 与表 4，取 $\phi_N = 1.0$ ，且 $\phi_c = 1.0$ ， $\phi_Q = 1.0$ ， $\phi_S = 0.9$ ，则 $\phi_N \times \phi_S \times \phi_Q \times \phi_c = 0.9$ 。这样，绝缘子的荷载系数取 1，抗力折减系数为 $0.9 \times 0.7 = 0.63$ 。

该标准中规定金具的安全度要高于绝缘子。

2) 文献[22]的相关规定。

表 5 连接部件的损伤与破坏极限
Tab. 5 The damage and failure limit for fittings

连接部件种类		损伤极限	破坏极限
导线端部	耐张金具	永久变形(包括滑移)	破坏
	悬垂金具		
绝缘子(瓷和玻璃)		70%的额定强度或者破裂脱落(仅限玻璃绝缘子)	销钉、帽、水泥的破坏和脱落
金具		永久变形	金具破坏或螺栓剪断

文献[22]的设计原则为极限状态理论和经验安全系数法相结合。荷载和材料的设计安全系数与荷载的不定性、抗力、几何尺寸、模型设计、结构类型以及线路元件的强度配合关系等因素有关。有 2 种方法来确定荷载参数和设计安全系数的值：1) 依据气象参数、经验数值和地形参数的统计估计值来确定荷载参数；2) 在历史数据的基础上对线路元件设计参数进行修正，2 种方法可以一起使用。

文献[22]中规定：对于导线，最小的抗力折减系数 $\gamma_M=0.8$ ；对于绝缘子，最小的抗力折减系数 $\gamma_M=0.5$ ；对于金具，最小的抗力折减系数 $\gamma_M=0.625$ 。上述元件的荷载系数都取 1。

2.3 国内外标准规定的荷载系数与抗力折减系数的取值

由上述内容可以得到国内外标准规定的荷载系数与抗力折减系数的取值，具体如表 6 所示。

表 6 国内外标准规定的荷载系数与抗力折减系数
Tab. 6 The factors of load and strength

元件及参数	文献[18]	文献[21]	文献[22]
	导线	荷载系数	2.5
抗力折合系数		0.95	0.75
地线	荷载系数	2.5	1
	抗力折合系数	1	0.75
绝缘子	荷载系数	2.7	1
	抗力折合系数	1	0.63
金具	荷载系数	2.5	—
	抗力折合系数	1	0.625

本文也经过大量的计算，得到国外标准与我国标准的荷载比值如表 7 所示。

表 7 国外标准与我国标准在导线风荷载和覆冰荷载的比值

Tab. 7 The ratio values of conductor wind load and ice load between home and abroad codes

参数	文献[21]/文献[18]	文献[22]/文献[18]
导线风载比值	1.793	1.923
覆冰荷载比值	1.104	1.104

3 荷载效应比值的计算

由于绝缘子、金具与导线的挂点相连，所以假设绝缘子、金具的荷载效应比值与导线相同。在进行效应比值计算时，假设导线两端的挂点无高差，

考虑 2 种工况：工况 1——大风工况、工况 2——覆冰工况。

参考文献[19]进行效应比值计算。工况 1 荷载效应比值的计算条件为：取最常用的导线 LGJ 300/40、地线 GJ-80 为计算对象，取 30、25 m/s 2 种风速；工况 2 荷载效应比值的计算条件为：取最常用的导线 LGJ 300/40、地线 GJ-80 为计算对象，取 30、25 m/s 2 种风速，中冰区取 15 mm 覆冰、风速 10 m/s；重冰区取 20、30、40、50 mm 覆冰，风速取 15 m/s。

分别对每种工况下各种型号导线、地线的荷载效应比值进行平均后，便得到了各种工况的荷载效应比值，结果如表 8~9 所示。

表 8 工况 1 荷载效应比值
Tab. 8 Load effect ratio for case 1

元件	风速/(m/s)	安全系数	g_4/g_1
导线	30	2.5	1.037 371
地线	30	2.5	1.143 772
绝缘子	30	2.7	1.037 371
金具	30	2.5	1.037 371

注：1) 工况 1 的极限状态方程为 $Z = R - K\sqrt{g_1^2 + g_4^2}$ ，其中， R 为抗力， K 为安全系数， g_1 为重力荷载， g_4 为风荷载。2) 由于绝缘子和金具的荷载是由导线挂点处产生的，所以可以假设金具、绝缘子的极限状态方程与导线一致。

表 9 工况 2 荷载效应比值
Tab. 9 Load effect ratio for case 2

元件	工况组合		安全系数	g_2/g_1	g_5/g_1
	覆冰/mm	风速/(m/s)			
导线	15	10	2.5	1.287 262	0.316 325
地线	15	10	2.5	3.715 646	0.797 536
绝缘子	15	10	2.7	1.287 262	0.316 325
金具	15	10	2.5	1.287 262	0.316 325

注：工况 2 的极限状态方程为 $Z = R - K\sqrt{(g_1 + g_2)^2 + g_5^2}$ ，其中， R 为抗力， K 为安全系数， g_1 为重力荷载， g_2 为冰重力荷载， g_5 为覆冰时风荷载。

4 安全度的计算

依据国内外标准的荷载系数与抗力折减系数取值、荷载效应比值、荷载比值，利用式(2)分别对导线、地线、绝缘子、金具的安全度进行了计算，得到国内外标准的安全度计算结果如表 10~11 所示。

表 10 国内外标准的导线、地线、绝缘子、金具的安全度(工况 1)

Tab. 10 The safety level of conductor, ground wire, insulator, fittings for home and abroad codes (case 1)

元件	文献[18]	文献[21]	文献[22]
导线	2.631 579	1.954 158	1.935 86
地线	2.5	2.002 353	1.987 889
绝缘子	2.7	2.326 378	3.097 377
金具	2.5	—	2.477 901

表 11 国内外标准的导线、地线、绝缘子、金具的安全度(工况 2)

Tab. 11 The safety level of conductor, ground wire, insulator, fittings for home and abroad codes (case 2)

元件	文献[18]	文献[21]	文献[22]
导线	2.631 579	1.467 813	1.385 993
地线	2.5	1.512 533	1.428 921
绝缘子	2.7	1.747 396	2.217 588
金具	2.5	—	1.774 07

5 结论

1) 文献[18]计算得到的导线、地线、绝缘子、金具的安全度大部分高于文献[21-22], 表明我国标准的导线、地线、绝缘子、金具的安全度普遍高于国外标准。

2) 在大风工况下, 文献[18]的安全度与文献[21-22]相差不大; 而在覆冰工况下, 其安全度远大于文献[21-22]。

参考文献

- [1] 蒋兴良. 贵州电网冰灾事故分析及预防措施[J]. 电力建设, 2008, 29(4): 1-4.
Jiang Xingliang. Accident analysis of Guizhou power grid ice hazard and its countermeasures[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(4): 1-4(in Chinese).
- [2] 刘志强, 马兴炼. 贵州电网抗冰抢险施工总结[J]. 电力建设, 2008, 29(6): 43-45.
Liu Zhiqiang, Ma Xinglian. Summarization of Guizhou power grid icing disaster rescue[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(6): 43-45(in Chinese).
- [3] 李强. 2008 年雨雪冰冻灾害分析及对电网的启示[J]. 电力建设, 2008, 29(6): 18-21.
Li Qiang. Analysis of the freezing rain and frost disaster of year 2008 and its significance to power grid[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(6): 18-21(in Chinese).
- [4] 刘长根, 肖江华, 曹刚强. 湖南电网 50 年一遇冰灾的特征、成因及应对措施[J]. 电力建设, 2005, 26(7): 1-3.
Liu Changgen, Xiao Jianghua, Cao Gangqiang. Characteristic, causes and countermeasures for ice disaster once for 50 years in Hunan power grid[J]. Electric Power Construction, 2005, 26(7): 1-3(in Chinese).
- [5] 李茂华, 李正, 任吉华, 等. 500 kV 输电线路杆塔结构的可靠性分析[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 91-94.
Li Maohua, Li Zheng, Ren Jihua, et al. Reliability analysis on tower structure for 500 kV transmission lines[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 91-94(in Chinese).
- [6] 宋云亭, 张东霞, 吴俊玲, 等. 国内外城市配电网供电可靠性对比分析[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 13-18.
Song Yunting, Zhang Dongxia, Wu Junling, et al. Comparison and analysis on power supply reliability of urban power distribution network at home and abroad[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 13-18(in Chinese).
- [7] 宿志一, 范建斌. 复合绝缘子用于高压及特高压直流输电线路的可靠性研究[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 16-23.
Su Zhiyi, Fan Jianbin. Research on reliability of composite insulators used in EHV and UHV DC transmission lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(12): 16-23(in Chinese).
- [8] 王世香, 高仕斌. 蒙特卡罗方法在变电站综合自动化可靠性评估中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 96-100.
Wang Shixiang, Gao Shibin. Application of Monte Carlo method in reliability evaluation of integrated substation automation[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 96-100(in Chinese).
- [9] 吕春泉, 贾伟. 供电可靠性统计向低压网络扩展的研究及其实现[J]. 电网技术, 2000, 24(3): 53-65.
Lü Chunquan, Jia Wei. Extension of power supply reliability statistics through to low voltage networks and its implementation[J]. Power System Technology, 2000, 24(3): 53-65(in Chinese).
- [10] 李峰, 侯建国, 安旭文, 等. 国内外规范中目标可靠指标取值的比较研究[J]. 电力建设, 2009, 30(5): 13-16.
Li Feng, Hou Jianguo, An Xuwen, et al. Comparison of target reliability index selection in domestic and foreign criterions[J]. Electric Power Construction, 2009, 30(5): 13-16(in Chinese).
- [11] 秦力, 张学礼, 陶颐格. 500 kV 输电铁塔结构体系可靠性分析[J]. 中国电力, 2008, 41(12): 64-68.
Qin Li, Zhang Xueli, Tao Yige. Analysis on reliability of 500 kV transmission line tower structure[J]. Electric Power, 2008, 41(12): 64-68(in Chinese).
- [12] 白海峰, 李宏男. 输电线路杆塔疲劳可靠性研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 25-31.
Bai Haifeng, Li Hongnan. Fatigue reliability study on power transmission tower[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 25-31(in Chinese).
- [13] 陈海波, 廖宗高, 肖洪伟. 受风荷载控制的杆塔结构体系可靠度分析[J]. 电力建设, 2007, 28(7): 40-45.
Chen Haibo, Liao Zonggao, Xiao Hongwei. Reliability analysis of tower structure under wind load[J]. Electric Power Construction, 2007, 28(7): 40-45(in Chinese).
- [14] 李黎, 尹鹏. 大跨越输电塔-线体系风振控制研究[J]. 工程力学, 2008, 25(增刊 2): 213-229.
Li Li, Yin Peng. The research on wind-induced vibration control for big-span electrical transmission tower-line system[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(S2): 213-229(in Chinese).
- [15] 侯建国, 夏敏, 李茂华, 等. 中美混凝土结构设计规范综合安全系数的比较[J]. 工程建设标准化, 2001(6): 11-17.
- [16] 李刚, 侯建国. 中美混凝土结构设计规范可靠度设置水平的比较[J]. 四川建筑科学研究, 2003(2): 11-13.
- [17] 侯建国, 张京穗, 吴春秋, 等. 工程结构设计标准的发展动态[J]. 三峡大学学报, 2001(3): 201-204.
- [18] DL/T 5092-1999 110-500 kV 架空送电线路设计技术规程[S].
- [19] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2003: 176-179.
- [20] GB1179-83 铝绞线及钢芯铝绞线[S].
- [21] IEC 60286-2003 Design criteria of overhead transmission lines[S].
- [22] SFS-EN 50341 Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV[S].



李峰

收稿日期: 2009-01-20.

作者简介:

李峰(1978—), 男, 工程师, 主要从事结构分析与计算方面的研究工作, E-mail: lidefeng@epri.sgcc.com.cn;

程永锋(1969—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程方面的研究工作;

夏开全(1969—), 男, 高级工程师, 主要从事工程结构设计与研究、结构评估与改造方面的研究工作。

(编辑 褚晓杰)