

# 国内外输电线路铁塔设计标准对比研究

于学玉

(四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610031)

**摘要:**基于国内外常用输电铁塔设计标准,美国标准、欧洲标准、IEC 标准及中国标准,对铁塔荷载计算和构件计算进行了对比,得出了一些重要结论。

**关键词:**输电铁塔;美国标准;欧洲标准;IEC 标准

**中图分类号:** TN823

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2014)S2-192-6

随着中国在国外承建输电线路工程的增多,国外输电线路标准的研究越来越有必要性和紧迫性。铁塔作为输电线路的一个重要组成部分,造价约占本体投资的 35%。国内外铁塔设计标准差距较大,目前该方面差异的对比研究较少且不成熟。

本文选用 4 种主要输电线路设计标准,中国标准、美国标准、欧洲标准和 IEC 标准,对铁塔荷载计算和构件计算进行了对比研究。

中国标准包括《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》(GB 50545-2010)、《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》(DL/T 5154-2012)。美国标准包括《美国输电线路荷载导则》(ASCE 74-2009)、《格构式输电铁塔设计导则》(ASCE 10-97)、《美国钢结构设计规范》(ANSI/AISC 360-05)。欧洲标准包括《45kV 以上架空输电线路标准 第一部分》(EN 50341-1:2001)、《45kV 以上架空输电线路标准 第三部分》(EN 50341-3:2001)、《钢结构设计规范》(DD ENV 1993-1-1:1992)。IEC 标准包括《架空输电线路设计标准》(IEC 60826:2003)。

## 1 荷载

### 1.1 荷载分类

关于输电线路铁塔荷载分类,国内外标准比较统一,可分为 3 类。

- 1) 与气候相关的荷载,主要是风荷载和冰荷载。
- 2) 事故荷载,主要是断线荷载和防止串倒荷载(domino effect,多米诺骨牌效应)。
- 3) 施工和维护荷载。

### 1.2 与气候相关的荷载

目前中国承建的国外输电线路工程,基本都处于无覆冰区域,因此本节重点讨论风荷载。

#### 1.2.1 风荷载重现期

输电线路风荷载重现期,中国标准规定与电压等级有关,对于 110~330 kV 输电线路及其大跨越,重现期取 30;对于 500、750 kV 输电线路及其大跨越,重现期取 50 a。IEC 标准也规定与电压等级有关,230 kV 以下取 50 a,230 kV 以上一般取 150 a,对于主干电网或供给特殊负荷的唯一电源线路取 500 a。欧洲标准根据线路的可靠等级将风荷载重现期分为 50、150、500 a。美国标准根据线路的可靠等级将重现期分为 50、100、200、400 a,线路长度是决定其可靠等级的重要因素。输电线路风荷载重现期方面,中国标准明显低于其它标准。

#### 1.2.2 风荷载基本参数

在确定设计风速时,中国标准和 IEC 标准采用的是 10 min 时距平均风速;而美国标准采用 3 s 时距平均风速;欧洲标准采用的是 10 min 时距或 2 s 时距平均风速,本文计算时采用的是 10 min 时距风速。相同重现期下,3 s 时距平均风速是 10 min 时距平均风速的 1.43 倍。

国内外标准均对地面粗糙类别均进行了分类,中国标准和 IEC 标准将地面粗糙类别划分为 A、B、C、D4 类;欧洲标准划分为 I、II、III、IV 4 类,美国标准划分为 B、C、D3 类。

四种标准下风荷载基本参数对比详见表 1。

表1 风荷载基本参数对比表

Table with 4 columns: 标准类别, 基准高度 /m, 风速 时距, 常用地面 粗糙类别. Rows include 中国标准, IEC 标准, 美国标准, 欧洲标准.

1.2.3 导线及地线风荷载计算

输电线路导线风荷载计算, 4种标准给出的公式有较大差异, 详见表2。

表2 导线风荷载计算公式对比表

Table with 2 columns: 规范类别, 导线风荷载计算公式. Rows include 中国标准, IEC 标准, 美国标准, 欧洲标准, each with a formula and descriptive text.

采用典型案例, 对4种标准下的导线风荷载进行了对比计算, 详见表3和图1。

典型案例: 线路电压等级 220 kV, 50 a 重现期 10 m 高 10 min 时距风速 27 m/s(对应 3 s 时距风速 38.61 m/s), 覆冰厚度 0 mm, 地面粗糙类别对应中国标准 B 类, 平地, 水平档距 400 m, 导线直径 31.1 mm。

表3 导线风荷载计算表/N

Table with 5 columns: 设计高度/m, 中国标准, IEC 标准, 美国标准, 欧洲标准. Rows show values for heights 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40.

注: 仅中国标准导线风荷载乘了 1.4 的荷载分项系数。

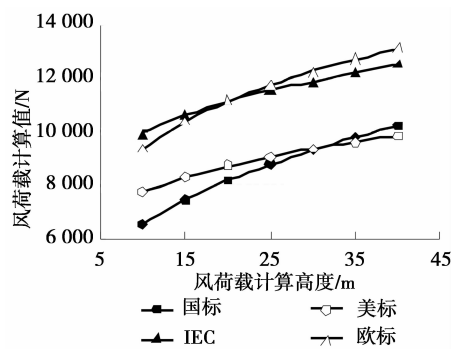


图1 4种标准导线风荷载比较

从图1可以看出, 导线风荷载计算值中国标准与美国标准比较接近, IEC与欧洲标准比较接近, 且前2个标准明显低于后2个标准。导线风荷载计算, 中国标准、欧洲标准、IEC标准均采用10 min时距平均风速, 只有中国标准没有考虑阵风影响系数, 导致中国标准明显低于欧洲标准和IEC标准; 美国标准采用3 s时距平均风速, 但考虑了一个0.6左右的阵风反应系数, 所以美国标准与中国标准相近。

1.2.4 塔身风荷载计算

输电线路铁塔风荷载计算, 四种标准给出的公式差异较大, 详见表4。

表4 塔身风荷载计算公式对比表

Table with 2 columns: 规范类别, 导线风荷载计算公式. Rows include 中国标准, IEC 标准, each with a formula and descriptive text.

续表

	$F = QK_z K_{zt} V_{RP} G_t C_{ft} A_{mt} \cos\theta$
美国标准	Q 无量纲常数, 0.613; $K_z$ 是风压高度变化系数; $K_{zt}$ 是地形系数; $G_t$ 是阵风反应系数; $C_{ft}$ 是阻尼系数; $A_{mt}$ 是构件投影面积。
欧洲标准	$Q_{Wt} = q_h G_q G_t (1 + 0.2 \sin^2 2\theta) \times (A_{t1} C_{t1} \cos^2 \theta + A_{t2} C_{t2} \sin^2 \theta)$ $G_q$ 是阵风系数; $G_t$ 是结构反应系数; $q_h$ 是风压; $C_{t1}, C_{t2}$ 是塔身正侧面阻尼系数; $A_{t1}, A_{t2}$ 塔身正侧面投影面积。

采用 2 个案例,对 4 种标准下的塔身风荷载进行了对比计算,计算仅中国标准乘了 1.4 的荷载分项系数。

案例 1:线路电压等级 220 kV,50 年重现期 10 m 高 10 min 时距风速 27 m/s(对应 3 s 时距风速 38.61 m/s),覆冰厚度 0 mm,地面粗糙类别对应中国标准 B 类,平地,铁塔高度 60 m,铁塔构件填充率为 0.2。对比结果详见表 5 和图 2。

表 5 塔身单位面积风荷载 N/m<sup>2</sup>

设计高度/m	中国标准	IEC 标准	美国标准	欧洲标准
10	2.45	2.51	2.48	2.43
20	3.06	2.91	2.75	2.77
30	3.49	3.04	2.92	2.96
40	3.82	3.17	3.05	3.08
50	4.11	3.30	3.16	3.18
60	4.35	3.44	3.25	3.28

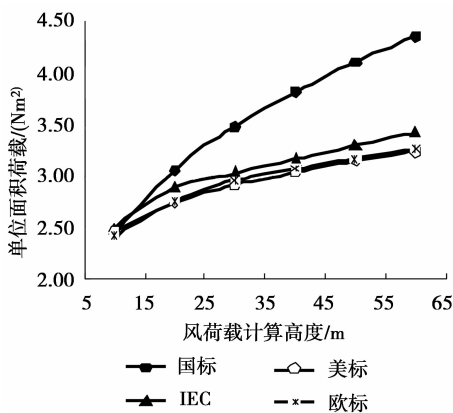


图 2 四种标准塔身单位面积风荷载比较 1

案例 2:线路电压等级 220 kV,50 年重现期 10 m 高 10 min 时距风速 27 m/s(对应 3 s 时距风速 38.61 m/s),覆冰厚度 0 mm,地面粗糙类别对应国标 B 类,平地,铁塔高度 30 m,铁塔构件填充率为 0.2。

对比结果详见表 6 和图 3。

表 6 塔身单位面积风荷载 N/m<sup>2</sup>

设计高度/m	中国标准	IEC 标准	美国标准	欧洲标准
10	1.99	2.51	2.55	2.55
120	2.49	2.91	2.83	2.91
130	2.83	3.04	3.00	3.11

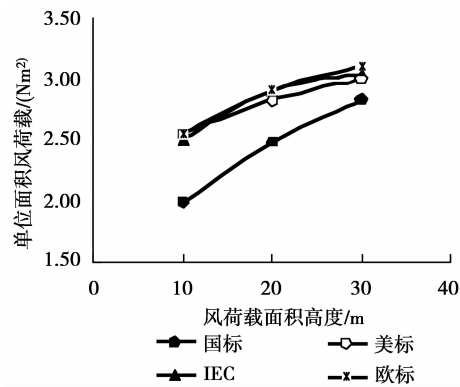


图 3 四种标准塔身单位面积风荷载比较 2

由上面图表可以看出,塔身单位面积风荷载计算值,IEC 标准、美国标准、欧洲标准非常接近,中国标准与之相差较大。当杆塔高度为 60 m 时,中国标准高于其它 3 个标准;当杆塔高度为 30 m 时,中国标准低于其它 3 个标准,中国标准对铁塔高度特别敏感。这是因为中国标准中考虑阵风影响的杆塔风荷载调整系数,当塔高由 10 m 增加到 60 m 时,其值由 1.0 增加到 1.6;其它 3 个标准中考虑阵风影响的系数则随铁塔高度增加而有所减小。

### 1.3 事故荷载

#### 1.3.1 中国标准

##### 1) 直线塔断线荷载

单回路杆塔:单导线断任意一相导线(分裂导线任意一相导线有纵向不平衡张力),地线未断;断任意一相地线,导线未断。

双回路杆塔:同一档内,单导线断任意两相导线(分裂导线任意两相导线有纵向不平衡张力),地线未断;同一档内,断一根地线,单导线断任意一相导线(分裂导线任意一相导线有纵向不平衡张力)。

##### 2) 耐张塔断线荷载

单回路和双回路杆塔:同一档内,单导线断任意两相导线(分裂导线任意两相导线有纵向不平衡张力),地线未断;同一档内,断一根地线,单导线断任意一相导线(分裂导线任意一相导线有纵向不平衡张力)。

##### 3) 防串倒塔

防串倒的加强型直线塔,应考虑所有导地线有断线张力(分裂导线有纵向不平衡张力)。

### 1.3.2 IEC 标准

#### 1) 扭转荷载

任意一根地线或导线支撑点上施加残余静荷载(RSL),RSL 计算无需考虑任何风荷载或冰荷载。

#### 2) 纵向荷载

所有导地线同时施加纵向荷载。

#### 3) 额外安全措施

对于很重要的线路,根据当地惯例或以往经验可采用额外的安全措施。

表 7 IEC 额外安全措施

额外安全措施描述	注释
采用 1.5 倍 RSL	较高安全等级的线路
增加 RSL 加载点,两地线或两导线	建议用于双回路和多回路线路
考虑风荷载或冰荷载计算 RSL	建议用于气候条件恶劣的线路或转角塔
每 10 基塔设置一基防串倒	考虑适用于结冰状况比较严重的重要线路

### 1.3.3 美国标准

#### 1) 纵向荷载

单回路杆塔:任意一根地线或导线支撑点上施加残余静荷载(RSL)。

双回路杆塔:任意两根地线,任意两根导线或一根地线和一根导线支撑点上施加残余静荷载。

#### 2) 增加防串倒塔

最低要求是每隔 10 英里(约 16 km)设置一基防串倒塔,该距离随线路长度、线路重要性增加而减小。

### 1.3.4 欧洲标准

#### 1) 扭转荷载

任意一根地线或导线上施加残余静荷载 RSL,RSL 计算无需考虑任何风荷载或冰荷载,更严厉的要求可在工程中规定。

#### 2) 纵向荷载

所有导地线同时施加纵向荷载,导地线张力计算无需考虑任何风荷载或冰荷载,更严厉的要求可在工程中规定。

## 1.4 安装维护荷载

### 1.4.1 中国标准

#### 1) 直线塔

安装(含检修情况)导、地线取 2.0 倍导、地线重量,动力系数取 1.1,同时考虑导线 3.5 kN、地线

2.0 kN 的附加荷重。

直线杆塔考虑锚线作业,单回路直线杆塔按同时锚住三相导线或两根地线情况,双回路直线杆塔按同时锚住六相导线或两根地线情况,但只考虑一相导线或一根地线正在进行锚线作业。锚线对地夹角要求不大于 20°。

#### 2) 耐张塔

按锚线塔、紧线杆塔或二者兼之。同时计入临时拉线的作用,临时拉线平衡导线及地线张力的 30%;临时拉线对地夹角不大于 45°紧线牵引绳对地夹角不大于 20°,其方向与导地线方向一致。

考虑临时拉线及牵引绳作用在塔上的垂直分量,并考虑一侧导、地线线条重量及施工人员、工具的附加荷载。附加荷载导线取 4.5 kN,地线取 2.0 kN,动力系数取 1.1。

### 1.4.2 IEC 标准:

1) 安装(含检修情况)导、地线取 2.0 倍导、地线重量。如果整个操作可以小心控制,可采用 1.5 倍。

2) 对于可能会移动的导线,所采用的导线张力至少是弧垂张力的两倍,其它的则至少是 1.5 倍的弧垂张力。

3) 对于支撑维护人员的所有结构组件,必须能支撑 1 500 N 的荷载,且是垂直加在正中央。

#### 美国标准

1) 施工方法描述较粗略,提到了类似中国标准的锚牵线和打临时拉线。

2) 对于水平或接近水平的杆件,应考虑 1.1 kN 的竖向荷载,同时考虑 1.5 的安全系数。

3) 施工安全系数建议取 1.5。

### 1.4.4 欧洲标准

1) 结构应能承受安装和维护荷载,荷载的计算要考虑施工程序、临时拉线、起吊顺序等。

2) 水平夹角小于 30°的杆件应能承受 1 kN 的竖向荷载。

## 2 构件计算

IEC 标准中无铁塔构件计算相关规定,本文构件计算方面的比较在美国标准、欧洲标准和中国标准之间进行。

### 2.1 受压构件

关于受压构件的稳定系数,美国、欧洲和中国的钢结构规范取值差距很小,在 2% 左右。但对于输电线路格构式铁塔,美国有专门的设计标准《格构式输电铁塔设计标准》(ASCE 10-97),受压稳定系数与其本国钢结构规范差距较大;欧洲《45 kV 以上架

空输电线路标准 第一部分》(EN 50341-1:2001)针对需要真型试验验证的铁塔,也对钢结构规范中受压稳定系数做了修正。中国《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》(DL/T 5154-2012)直接沿用钢结构规范数值。下面详细介绍下美国标准《ASCE 10-97》、欧洲标准《EN 50341-1:2001》和中国标准的计算差异。

2.1.1 美国标准

对于受压构件,《ASCE 10-97》计算公式如下。

$$F_u = [1 - \frac{1}{2}(\frac{KL/r}{C_c})^2] F_y, \frac{KL}{r} \leq C_c \quad (1)$$

$$F_u = \frac{\pi^2 E}{(\frac{KL}{r})^2}, \frac{KL}{r} > C_c \quad (2)$$

$$C_c = \pi \sqrt{\frac{2E}{F_y}} \quad (3)$$

式中,  $F_u$  为设计压应力,  $F_y$  为材料屈服强度,  $K$  为有效长度系数。

对于主材,  $K=1$ 。

对于斜材,  $K$  值分 6 种情况计算。

1)长细比小于 120,两端无偏心。

$$KL/r = L/r \quad (4)$$

2)长细比小于 120,一端偏心。

$$KL/r = 30 + 0.75L/r \quad (5)$$

3)长细比小于 120,两端偏心。

$$KL/r = 60 + 0.50L/r \quad (6)$$

4)长细比大于 120,两端无转动约束。

$$KL/r = L/r \quad (7)$$

5)长细比大于 120,一端有转动约束。

$$KL/r = 28.6 + 0.762L/r \quad (8)$$

6)长细比大于 120,两端有转动约束。

$$KL/r = 46.2 + 0.615L/r \quad (9)$$

2.1.2 欧洲标准

对于不需要真型试验验证的铁塔,《EN 50341-1:2001》中规定,压杆稳定折减系数按其钢结构规范公式计算。

$$\chi = \frac{1}{\varphi + [\varphi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0.5}} \quad (10)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_y A_{eff}}{EA}} \quad (11)$$

$$\varphi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] \quad (12)$$

$\lambda$  为长细比,  $\alpha=0.49$

对于需要真型试验验证的铁塔,  $\bar{\lambda}$  要替换为  $\bar{\lambda}_{eff}$ 。  
 $\bar{\lambda}_{eff}$  按照表 8 可分为 6 种情况来计算

表 8 情况分类表

构件类型	屈曲轴	$\bar{\lambda}$	荷载偏心	杆件连续	非连续端螺栓	情况
		$>\sqrt{2}$	1 端			3
		$>\sqrt{2}$	2 端			4
		$>\sqrt{2}$		2 端		1
	最小	$>\sqrt{2}$	1 端		2 颗	4
		$>\sqrt{2}$	1 端		1 颗	1
		$>\sqrt{2}$		0 端	2 颗	4
		$>\sqrt{2}$		0 端	1 颗	1
斜材		$>\sqrt{2}$	1 端			4
		$>\sqrt{2}$	2 端			5
		$>\sqrt{2}$		2 端		1
平行		$>\sqrt{2}$	1 端		2 颗	4
		$>\sqrt{2}$	1 端		1 颗	1
		$>\sqrt{2}$		0 端	2 颗	5
		$>\sqrt{2}$		0 端	1 颗	6
	最小					1
主材				交错支撑		2
	平行			其他类型		1

情况 1:  $\bar{\lambda}_{eff} = e^{(1.747\bar{\lambda}-1.98)}, 0.2 < \bar{\lambda} < 1.035 \quad (13)$

$\bar{\lambda}_{eff} = 1.091\bar{\lambda} - 0.287, \bar{\lambda} > 1.035 \quad (14)$

情况 2:  $\bar{\lambda}$  乘 1.2, 公式同情况 1。

情况 3:  $\bar{\lambda}_{eff} = 0.02 + 0.88\bar{\lambda} \quad (15)$

情况 4:  $\bar{\lambda}_{eff} = 0.30 + 0.68\bar{\lambda} \quad (16)$

情况 5:  $\bar{\lambda}_{eff} = 0.52 + 0.68\bar{\lambda} \quad (17)$

情况 6:  $\bar{\lambda}_{eff} = 0.16 + 0.94\bar{\lambda} \quad (18)$

2.1.3 中国标准

轴心受压构件的稳定计算:

$$N/(\varphi A) \leq m_N f \quad (19)$$

根据  $K\lambda$  查表确定,  $K$  值计算完全同美国标准。

$m_N$  是压杆稳定强度折减系数, 根据翼缘板自由外伸宽度  $b$  与厚度  $t$  之比计算确定。

$$m_N = 1.667 - 0.667 \frac{b/t}{(b/t)_{lim}} \quad (20)$$

2.1.4 标准对比

铁塔中最常用的 2 种受压构件, 主材和交叉斜材, 对比 3 种标准的计算差异。详见图 4、5。从图中可以看出, 无论主材还是交叉斜材受压构件稳定折减系数, 中国标准计算值最低, 美国标准最高, 欧洲标准介于两者中间。美国标准的稳定折减系数是中国标准的 1~1.35 倍之间。

中国标准和欧洲标准受压构件计算时, 材料强度采用的是设计值, 即屈服强度除一个材料分项系

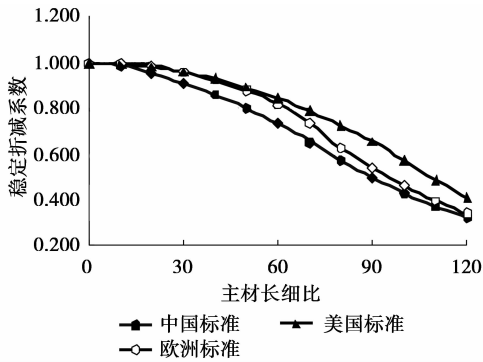


图4 主材稳定折减系数比较

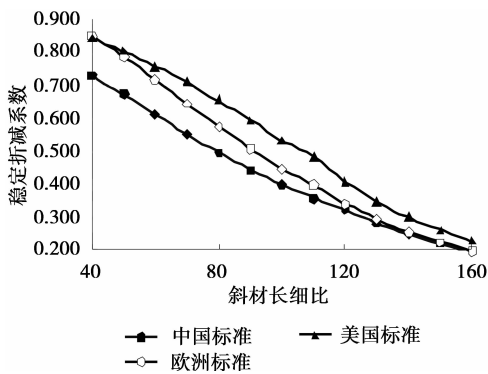


图5 斜材稳定折减系数比较

数,在 1.1 左右;而美国标准计算时材料强度直接采用屈服强度。

此外,中国标准受压构件的有效长度系数,对于腿部斜材取 1.2,再分式交叉斜材取 1.1,美国和欧洲标准均无此项考虑。

### 2.2 受拉构件

#### 2.2.1 美国标准

美国标准《ASCE 10-97》中规定,双肢连接的受拉构件。

$$F_t = F_y A_n \tag{21}$$

单肢连接的受拉构件。

$$F_t = 0.9 F_y A_n \tag{22}$$

#### 2.2.2 欧洲标准

欧洲标准《EN 50341-1:2001》中规定,双肢连接的受拉构件。

$$F_t = 0.9 F_u A_n / \gamma_{M2} \tag{23}$$

单肢连接的受拉构件,连接螺栓为 1 颗时,  $F_t = (b_1 - d_0) t f_u / \gamma_{M2}$

$$\tag{24}$$

连接螺栓不少于 2 颗时,  $F_t = (b_1 - d_0 + b_2/2) t f_u / \gamma_{M2}$

#### 2.2.3 中国标准

中国标准(DL/T 5154-2012),对双肢连接的受拉构件。

$$F_t = A_n f \tag{26}$$

对单肢连接的受拉构件,当肢宽 > 40 mm 时,折减系数取 0.7;当肢宽 ≤ 40 mm 时,折减系数取 0.55。

#### 2.2.4 标准对比

选择角钢规格 Q355 L63X5,分双肢连接和单肢连接两种方式,对比 3 种标准的计算差异。

对于双肢连接方式,欧洲标准计算值较中国标准高 15%,美国标准计算值较中国标准高 11%。

对于单肢连接方式,欧洲标准计算值较中国标准高 18%,美国标准计算值较中国标准高 42%。

## 3 结论

1)输电线路风荷载重现期,中国标准明显低于其它 3 个标准。

2)输电线路导线风荷载计算值中国标准与美国标准比较接近,IEC 与欧洲标准比较接近,且前 2 个标准明显低于后 2 个标准。

3)输电铁塔塔身单位面积风荷载计算值,IEC 标准、美国标准、欧洲标准非常接近,中国标准与他们相差较大。中国标准风荷载计算值对铁塔高度特别敏感,随塔高增加基本呈线性增加,其它 3 个标准风荷载计算值则随铁塔高度增加而有所减小。

4)输电线路事故荷载,4 个标准描述大致相同;安装维护荷载系数取值差异较大。

5)输电铁塔受压构件稳定折减系数,中国标准计算值最低,美国标准最高,欧洲标准介于两者中间。

6)输电铁塔受拉构件,无论双肢连接方式还是单肢连接方式,欧洲标准和美国标准计算值均高于中国标准。

### 参考文献:

[1] 中华人民共和国国家能源局. 架空输电线路杆塔结构设计技术规定[S]. 北京:中国计划出版社,2010.

[2] IEC. Design criteria of overhead transmission lines [S]. IEC, 2003.

[3] ASCE. Guidelines for electrical transmission line structural loading [S]. ASCE,2009.

[4] CENELEC. Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV, part 1: general requirements, common specifications [S]. CENELEC,2001.

[5] CENELEC. Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV, Part 3: Set of national normative aspects [S]. CENELEC,2001.

[6] ASCE. Design of latticed steel transmission structures [S]. ASCE,1997.

# 受端侧换流站加装动态无功补偿装置提高 川电东输送电能力分析

陈汉雄

(四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016)

**摘要:**为满足重庆电网和成都电网和不断增长的用电负荷需求和实现接力东送,“十三五”期相继规划建设新疆-重庆和新疆-成都 2 回特高压直流。由于成都、重庆电网亦是川电东送的必经通道;2 回特高压直流馈入川渝负荷中心电网后,川电东输送电能力有所下降,为提高电网稳定水平、满足未来四川更多富余电力东送,本文结合未来川渝交直流规划电网情况,从川渝特高压换流站加装 SVC 的建设条件、可行性以及效果等方面分析研究了川渝两特高压换流站加装静止无功补偿器(SVC)后,对提高电网稳定水平和川电外送能力的积极作用。研究表明:重庆、成都 2 特高压换流站加装一定容量 SVC 后,2020 年整个交流通道的送电能力可提高约 800 MW。

**关键词:**静止无功补偿器 SVC;±800kV 直流;电力系统

**中图分类号:** TM714.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2014)S2-198-5

为满足“十三五”期及以后重庆、成都电网不断增长的用电负荷需求、提高供电可靠性;实现更大范围资源优化配置,满足新疆火电接续东送,“十三五”期相继规划建设新疆-重庆(±800 kV 直流)、新疆-成都(±1 100 kV 直流)2 回特高压直流。

“十二五”中后期及以后川渝电网将规划建设 1 000 kV 交流和 ±800/±1 100 kV 直流的多回交流输电线路<sup>[1-4]</sup>。到“十三五”中后期,川渝电网既作为川电东送的电源送出端侧电网同时又作为 2 回特高压直流馈入的受端侧电网。

川电东送川渝省际间交流通道的送电能力与川西特高压直流以及与新疆火电送入川渝的 2 回特高压直流之间有较强的关联性,川渝间多回特高压直流的送电规模容量直接影响川渝省际间交流线路的送电能力和电网稳定性<sup>[5-6]</sup>。

为提高川渝全网主要交直流输电线路的送电能力,本文从新疆送电川渝的 2 回特高压直流受端侧换流站建设 SVC 条件、可行性及加装 SVC 后提高电网稳定水平效果等,分析研究“十三五”期在川渝电网重庆、成都 2 座特高压直流换流站内加装静止

无功补偿器(SVC)后对改善交直流系统全网稳定水平、提高川电东输送电能力等方面所发挥的积极作用。

## 1 新疆-川渝 2 回特高压直流输变电工程简介

### 1) 新疆-重庆±800kV 直流输电工程简介

为满足“十三五”期及以后重庆电网不断增长的用电负荷需求,“十三五”期国家电网公司规划建设 1 回新疆-重庆±800kV 直流(根据近期电网规划,新疆-重庆特高压直流送电容量考虑为 8 000 MW)。

### 2) 新疆-成都±1 100 kV 直流输电工程简介

为满足“十三五”后期成都电网枯期不断增长的用电负荷需求和实现新疆火电的接续东送,“十三五”后期规划建设 1 回新疆-成都±1 100 kV 直流(新疆-成都特高压直流规划送电容量为 10 000 MW)。

重庆、成都 2 座换流站接入系统方案如图 1、2 所示。

收稿日期:2014-10-10

作者简介:陈汉雄(1971-),男,硕士,高级工程师,从事电力系统规划设计及直流输电系统控制研究,(E-mail) hanson2000697@163.com。

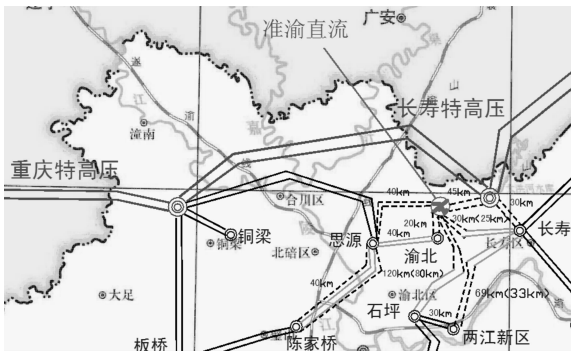


图1 重庆特高压换流站接入系统方案示意图

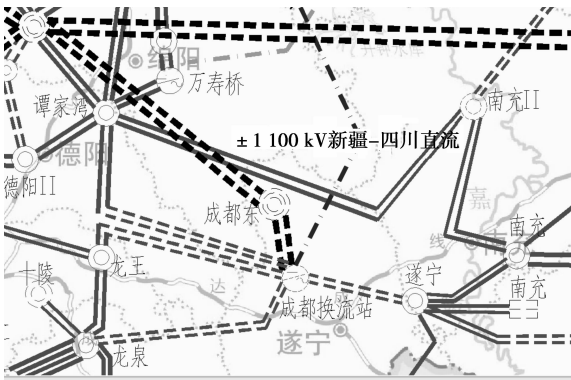


图2 成都特高压换流站接入系统方案示意图

## 2 2020年川电东输交直流输电线路送电能力

### 2.1 “十三五”期川渝交直流特高压电网规划简介

#### 1) 2015年

为满足四川西部大中型水电站更多富余水电外送、实现更大范围的资源优化配置需要,国家电网在2010年及“十二五”期相继建成投运川西3回±800 kV特高压直流输电线路(向家坝-上海/直流送电容量6 400 MW;锦屏-苏南/直流送电容量7 200 MW;溪洛渡左-浙西/直流送电容量8 000 MW);此外,“十二五”末期亦将规划建设南横雅安-乐山-重庆-万县-荆门-武汉-芜湖1 000 kV交流输电线路。

#### 2) 2020年

为满足“十三五”中后期川西更多富余电力东送,川渝电网亦将进一步规划发展建设1 000 kV交流特高压电网,到2020年川渝境内形成1 000 kV交流特高压环网。

“十三五”末期,为满足金沙江二期吴东德、白鹤滩水电站容量送出需要,川西南电网亦将再规划建设金沙江二期2回特高压直流(白鹤滩-华中/直流

送电容量8 000 MW;乌东德-华东/直流送电容量10 000 MW)。

2020年川渝交直流特高压电网规划接线示意图如图3所示。

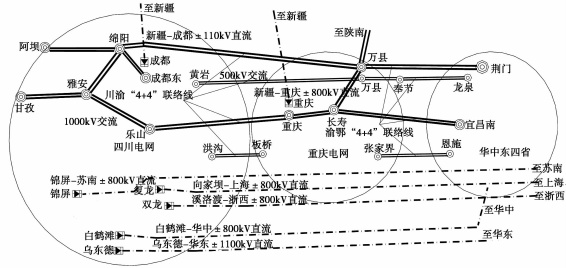


图3 2020年川渝交直流特高压电网规划接线示意图

### 2.2 川电东输交直流线路送电能力

#### 1) 2020年

2020年四川电源装机在满足本省用电负荷需求后丰水期通过交流通道可实现的外送富余电力容量约11 000 MW,再考虑转送新疆-成都1 100 kV级特高压直流5 000~9 000 MW容量,通过川渝断面交流通道接力东送的容量将达到16 000~20 000 MW。

四川电网为满足2020年更多富余电力东送需要,2020年川渝省级交流断面规划电网维持“4+4”联网方案(如图3)所示。同时,为进一步提高川电东输电网送电能力,考虑在绵阳-万县(双回)交流特高压线路加装50%串补、乐山-重庆(双回)、万县-荆门(双回)特高压线路均加装40%串补,长寿-宜昌南双回特高压线路加装40%串补。在此条件下,2020年川电东输交直流线路的总送电能力(稳定极限)以及稳定计算的系统研究结果如表1所示。

表1 2020年川电东输交直流线路稳定计算

项目	线路名称	故障类型	稳定极限/ 稳定情况
1. 川电东输交直流	交直流总送电能力	交流线路三相短路/直流单极闭锁	约52 100 MW
	“4+4”送电能力	三相短路	约16 500 MW (暂稳极限)
	2)向家坝-上海	单极闭锁 (容量3 200 MW)	稳定
	3)锦屏-苏南	单极闭锁 (容量3 600 MW)	稳定
	4)溪洛渡-浙西	单极闭锁 (容量4 000 MW)	稳定
	5)乌东德-华东	单极闭锁 (容量5 000 MW)	稳定
	6)白鹤滩-华中	单极闭锁 (容量4 000 MW)	稳定



续表

2. 疆电入川、渝直流	新疆—重庆	单极闭锁 (容量 4 000 MW)	稳定
	新疆—成都	单极闭锁 (容量 5 000 MW)	稳定

1)2020 年川电交流通道“4+4”省际联络线联网方案的送电能力约为 16 500 MW(暂稳极限)。

2)2020 年国网 5 回特高压直流,送端系统直流故障单极闭锁时,系统稳定无需切机,国网 5 回特高压直流总送电容量为 35 600 MW;2020 年川电东输交直流线路总送电能力约为 52 100 MW。

### 2.3 影响川电东输送电能力的主要因素

结合“十二五”“十三五”期川渝电网交直流电网规划,总结归纳影响川电东输交直流线路送电能力的因素主要包括如下 4 个方面:

1)川渝、渝鄂省际交流联络线建设方案。

2)川渝电网本身的结构特点。作为川渝电网的重要负荷中心和川西水电东送通道的成都、重庆 500 kV 动态无功支撑不足问题较为突出。

3)“十二五”期及以后国网川西多回特高压直流建成投运后,降低了交流通道输电线路的送电能力。

4)此外,“十三五”期相继规划建设的新疆—重庆、新疆—成都 2 回特高压直流对川电东输交直流线路的送电能力有显著影响,疆电入川、渝的 2 回特高压直流使得川电东输交直流线路的送电能力降低。

为兼顾本地用电负荷需求和实现丰期电力接济东送,疆电入川、渝的 2 回特高压直流的重庆、成都两换流站落点选择较靠近川电东输交流外送通道上。为满足直流换流站无功需求,重庆、成都两换流站站均装设有大量容性无功(含滤波器)。实际电网运行中,换流站内容性无功补偿的实际出力与交流系统端侧母线电压水平直接关联( $Q_c = \psi_c U_2$ )。

在国网川西多回特高压直流中一回直流单极闭锁故障方式下,随着大容量潮流转移必将使得相关沿线交流特高压站点电压水平持续下降,随之势必重庆、成都两换流站交流系统端侧母线电压亦随之下降;而随着换流站交流母线电压水平下降,两换流站内所装设的容性无功补偿装置的容性无功出力亦随之呈平方关系比例的严重下降,为满足直流换相容性无功要求,换流站必将从交流系统索取可能的更多容性无功,这无疑使得交流系统容性无功不足问题更为严酷而恶化近期电网的稳定水平状况,最终亦可能出现最坏情况:因换流站电压水平持续下降,容性无功严重不足而使得直流换相失败;同时就近相关交流特高压站点电压水平亦持续过低,两者

共同叠加作用导致全网交直流系统失稳。

## 3 SVC 对提高川电东输送电能力稳定计算分析

重庆和成都两电网由于本身兼具满足本区用电负荷且同时作为川电东送必经通道,但两电网均存在如下两方面问题:1)缺乏足够的动态无功支撑能力;2)新疆落点川、渝的 2 回特高压直流,故障方式下换流站对近区交流系统容性无功需求更高从而亦降低川电东输交直流线路的送电能力。

因此为部分解决重庆和成都电网动态无功支撑不足、提高川电东输送电能力、进一步改善全网交直流系统稳定水平,本文考虑“十三五”期,重庆、成都两换流站内 TCR 型加装 SVC。

### 3.1 川渝 1 000 kV 直流特高压站加装 SVC 建设条件分析简介

到 2014 年,四川电网将有 3 座±800 kV 直流换流站投运,分别为复龙(向家坝—上海±800 kV 直流送端侧换流站)、裕隆(锦屏—苏南±800 kV 直流送端侧换流站)、双龙(溪洛渡左—浙西±800 kV 直流送端侧换流站)。为满足电网无功平衡需要,上述建设投运中的裕隆和双龙站均明确在各站用变压器的 35 kV 侧加装置配置低压电抗器,低压电抗器容量为  $2 \times (3 \times 60 \text{ Mvar})$ 。裕隆换流站其中一站用变压器电气接线示意图如图 4 所示。

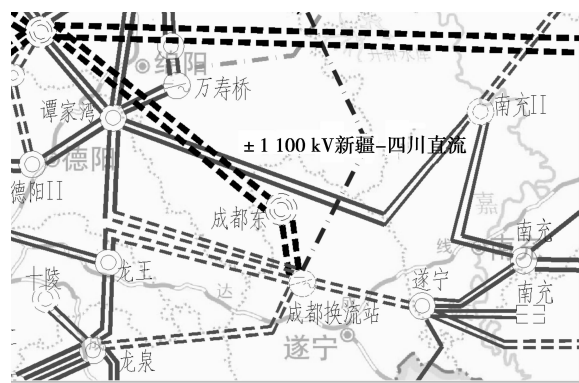


图 4 裕隆换流站站用变压器电气接线示意图

由于国内目前 500 kV 变电站内的 TCR 型 SVC 直挂电压等级多为 35 kV,技术水平已相当成熟,因此若考虑在换流站的站用变压器 35 kV 侧加装 SVC,技术上是完全可行的,具体分析如下:

1)特高压换流站的站用变压器 35 kV 侧考虑加装低压电抗器的目的为:平衡特高压直流在输送较小容量时换流站存在的容性无功过剩问题;在特高压直流多送电或额定容量送电时因较多的无功消

耗,需要换流站投入较多容性无功设备、低压电抗器则完全退出,因此若考虑特高压直流多送电或额定容量送电时,换流站内站用变压器基本为轻载状态仅通过很少容量。

在特高压直流多送电或额定容量送电时,为提高交直流系统暂态稳定水平,而考虑在特高压直流换流站的站用变压器 35 kV 侧加装一定容量的 TCR 型 SVC(SVC 容量配置合适),则在 SVC 容量不超过站用变压器本身额定容量条件下反而充分利用了站用变压器大部分运行状况下的闲置容量部分,站用变压器本身通过的容量亦不会过载。

2)一定容量的 TCR 型 SVC 设备需要占地,因此需要换流站预留或具备加装 TCR 型 SVC 的场地建设条件。

这里暂考虑某一特高压换流站的站用变压器 35 kV 侧加装容量为 180 Mvar 的 TCR 型 SVC,电气主接线示意图如图 5 所示。

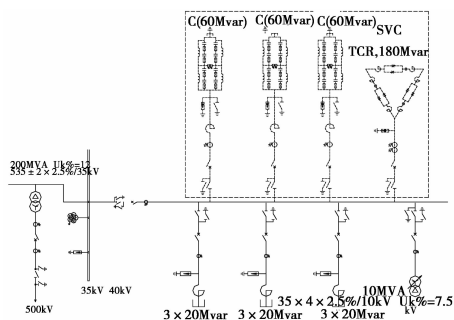


图 5 换流站的站用变 35 kV 侧加装 SVC 电气主接线图

### 3.2 “十三五”期川渝直流换流站内加装 SVC 及提高川渝电网稳定水平研究

作为新疆-重庆、新疆-成都 2 回特高压直流受端侧的重庆、成都两换流站内,为满足换流站本身用电需求均需装设站用变压器(变比为:500/35kV),占用变容量大小主要根据换流站本身用电需求而可灵活选择。

新疆-重庆特高压直流工程目前设计阶段为完成第一版可研但未评审、后续该工程还需重新完成新版的可研;新疆-成都特高压直流工程目前设计完成情况与新疆-重庆特高压直流工程类似。

鉴于上述情况并根据该直流工程规模并参考国网川西 3 回特高压直流工程的实际设计,本文研究中:

1)新疆-重庆、新疆-成都 2 回特高压直流受端侧站用变规模均暂按考虑为  $2 \times 200 \sim 2 \times 400$  MVA 范围(其中对应 35kV 侧感性无功配置容量为  $2 \times$

$180 \sim 2 \times 360$  Mvar);2)两换流站的站用变 35 kV 侧均考虑加装容量为  $2 \times 180 \sim 2 \times 360$  MVA 的 SVC (TCR 型)。在此条件下,2020 年川电外送能力(川渝交流断面)电网稳定计算见表 2 所示。在此条件下,2020 年川电外送能力(川渝交流断面)电网稳定计算见表 2 所示。

表 2 2020 年川渝直流换流站加装 SVC 方案暂稳计算

方 案	川渝交流断面 极限/MW
1、川渝两直流换流站无 SVC	约 1 6500
2、重庆或成都换流站内加装 SVC	
重庆换流站 + SVC (2×180 Mvar)	+250
重庆换流站 + SVC (2×240 Mvar)	+320
重庆换流站 + SVC (2×300 Mvar)	+360
重庆换流站 + SVC (2×360 Mvar)	+460
成都换流站 + SVC (2×180 Mvar)	+230
成都换流站 + SVC (2×240 Mvar)	+300
成都换流站 + SVC (2×300 Mvar)	+340
成都换流站 + SVC (2×360 Mvar)	+430
3、重庆、成都 2 座换流站内同时均加装 SVC	
重庆换流站 + SVC (2×180 Mvar) + 成都换流站 + SVC (2×180 Mvar)	+450
重庆换流站 + SVC (2×240 Mvar) + 成都换流站 + SVC (2×240 Mvar)	+600
重庆换流站 + SVC (2×300 Mvar) + 成都换流站 + SVC (2×300 Mvar)	+670
重庆换流站 + SVC (2×360 Mvar) + 成都换流站 + SVC (2×360 Mvar)	+800

注:上述电网稳定极限的计算中,同时亦校核计算了川渝电网的 7 回特高压直流输电线路,故障类型均为直流单极闭锁,计算结果均为稳定。

根据上述计算结果:若重庆、成都 2 座换流站内站用变均考虑加装 SVC 后,2020 年川渝断面交流通道输电能力可提高约 800 MW。

### 3.3 建议

鉴于 2020 年新疆落点川渝两直流换流站加装 SVC 后,可提升和改善川渝电网的送电能力,满足“十三五”期及以后更多川电富余电力外送,因此建议“十三五”中后期重庆、成都 2 座特高压换流站内均加装一定容量的 SVC。

特别说明:关于重庆、成都 2 座直流换流站内 SVC 的具体建设时期及容量,需结合电网规划及实际电网运行情况、站点本体设计等,在后续的电网工程中进行更为详细的相关专题研究。

## 4 结 论

到“十三五”中后期,川渝电网既作为川电东送的电源送出端侧电网同时又作为多回特高压直流馈入的受端侧电网。川电东送川渝省际间交流线路的送电能力本身与川西特高压直流以及与新疆火电送入川渝的 2 回特高压直流之间均有较大的关联性,川渝境内的多回特高压直流的送电规模容量均直接影响川渝省际间交流线路的送电能力和电网稳定性。

本文从重庆、成都 2 座特高压换流站建设 SVC 条件、可行性及加装 SVC 效果后提高电网稳定水平效果等,分析研究“十三五”期在重庆、成都 2 座特高压换流站内加装 SVC 后对提高电网稳定水平所发挥的积极作用;并建议在“十三五”中后期重庆、成都

2 座直流换流站点内加装一定容量的 SVC。

### 参考文献:

- [1] 中国电力工程顾问集团公司,西南电力设计院.金沙江一期送电华中、华东±800kV 直流输电工程可行性研究报告[R].成都:西南电力设计院,2005.
- [2] 中国电力工程顾问集团公司,西南电力设计院.锦屏一、二期水电站送电华东±800kV 直流输电工程可行性研究报告[R].成都:西南电力设计院,2005.
- [3] 南电力设计院、西南电力设计院.华中“十二五”电网规划设计[M].武汉:中南电力设计院,2010.
- [4] 刘振亚.特高压交流输电技术研究成果专辑(2005 年)[M].北京:中国电力出版社,2006.
- [5] 陈汉雄,郑勇.利用特高压直流输电系统提高四川电网的稳定水平[J].电力建设,2012,33(4):6-9.
- [6] 齐旭,曾德文,史大军,等.特高压直流输电对系统安全稳定影响研究[J].电网技术,2006,30(2):1-6.

(编辑 郭 飞)

### (上接第 188 页)

就是说当  $N_0/N < 0.3$  时,旧规范比新规范是偏于安全的,当  $N_0/N \geq 0.3$  时,新规范要求更加严格。

## 2 结 论

通过以上对新旧规定关于杆件承载力计算方法的比较可以得出以下结论:

1) 长细比小于 40 的杆件稳定强度折减系数新规范比旧规范要求严格,长细比大于 40 的杆件则反之。同时,新规范中 Q345 钢材长细比大于 60 后均不需要折减,Q420 钢材长细比大于 70 后均不需要折减。

2) 长细比在 120~200 之间的斜材,对于一端有约束的杆件,新规范计算杆件利用率最大可降低 8.7%;对于两端有约束的杆件,新规范计算杆件利用率最大可降低 16.3%,部分杆件可以降低规格。

3) 对于两根斜材为一拉一压且拉杆内力小于压杆内力的 20% 时,按新规范计算的最大长细比均不大于旧规范中的长细比,旧规范是偏于保守的;对于有辅助材的交叉斜材,新规范中的  $KL_3$  均大于旧规范中的  $1.1L_2$ ,采用新规范后要求更加严格。

4) 对于同时受压斜材,新规范中当  $N_0/N < 0.3$  时,旧规范比新规范是偏于安全的;当  $N_0/N \geq 0.3$  时,新规范要求更加严格。

5) 新规范中对同时受压交叉斜材计算长度进行修正后,对于同时受压斜材,杆件计算长度最大将增加 1.25 倍,根据计算长细比 160 的杆件,计算长度增加 1.25 倍,杆件利用率将增加 50%,而根据杆塔真型试验结果看,同时受压杆件承载力并没有降低这么多,建议后期开展更深入的研究工作。

(编辑 胡 玥)