

过电流脱扣器用双金属元件的选择和设计

连理枝

杭州之江开关有限公司 (311234)

摘 要 文章介绍了各种双金属材料性能、参数以及不同使用条件下双金属元件的设计和材料的选择,可供断路器热动脱扣的设计人员参考。

关键词 双金属性能 选择 设计 脱扣 短路

The Material Selection and Design of Bimetal Elements Used in Over Current Tripper

Lian Lizhi

Hangzhou Zhijiang Switchgear Co.,Ltd (311234)

Abstract: The article introduces the properties, data and under different use conditions, the design and material selection for bimetal elements, which can be as references for circuit breaker thermo-actuated tripper designers.

Key words: bimetal property; selection; design; trip; short circuit

在各种测试、调节机构,特别是断路器的过电流脱扣器(热动脱扣器)中,双金属的应用是十分广泛普遍的。在设计断路器过电流脱扣器时,如何选择双金属材料是一个关键问题。设计中一般需要考虑:双金属元件工作的最高和最低温度,工作温度的范围,元件受热的位移和形式与大小,力或力矩的大小等。本文对以上问题谈点粗浅看法,供热动脱扣器的设计人员参考。

1 双金属元件设计时材料的选择

1.1 根据元件的使用温度来选择双金属材料

热双金属元件是利用双金属(两种金属)不同的热膨胀系数的特性,在受热时的变形、弯曲来工作的,因此温度是它的一个很重要的参数。通常,塑料外壳式断路器或热继电器的工作温度在100~130℃(称为双金属元件的工作温度),这样选择的金属材料的“允许使用温度范围”,一定要大于双金属元件在工作中可能达到的最高和最低温度。如果元件的工作温度超过材料允许的使用温度范围,则元件的热敏性(比弯曲)和其他性能就有降低或显著降低的可能。

除了允许使用温度范围之外,还要考虑双金属材料的线性温度范围。所谓线性温度是指它的热敏性与温度之间的关系基本上是直线关系。因此元件的工作温度范围应选在材料的线性温度范围,以便

使双金属元件具有最高的热敏性能,并能最充分、最经济地利用材料的这一重要性能。

如上所述,塑壳式断路器的工作温度在100~130℃,如选用5J20110(5J11)双金属材料,它的“允许使用温度范围”是-70~+250℃,“线性温度范围”是-20~+150℃;如选用5J1480(5J18)其“允许使用温度范围”是-70~+350℃,“线性温度范围”是-20~+180℃,都能适应要求。

1.2 根据热双金属元件的加热方式来选择材料

1.2.1 直接加热

热双金属元件通电流而发热。这种加热方式通常用于额定电流在63A及以下,它们选用的材料多数为电阻型双金属,也有选用通用型(如5J1480)和高灵敏型(如5J20110)等。

1.2.2 傍热式加热

热双金属元件所承受的热源是来自于它边傍的电阻合金(发热)材料通电发热,通过传导、对流和幅射传于双金属元件。它适用的是小于63A的电流规格。所使用的电阻合金有镍铬、镍铬铝和镍铜(低电阻率适用于较大额定电流)等。而双金属元件多数采用5J1480和5J20110等。

1.2.3 复合加热式

热双金属元件的热源一部分是双金属元件直接通电,另一部分是依靠电阻合金的发热传导等。

1.2.4 CT式加热

利用串接的CT(电流互感器)副边电流直接加热或傍热传导给双金属元件,这种方式大多用于额定电流在630A及以上的规格的断路器。

1.3 考虑双金属材料的机械性能

1.3.1 双金属材料的拉伸弹性性能

一般供作元件的双金属材料,大多数是在20%~30%冷变形状态时供货的,它们有足够的塑性。在机械性能中占主要的是材料的拉伸弹性模量 E 。在多数塑壳式断路器使用的悬臂梁(直条式)元件的设计时,应按下式计算 E 值,然后比较 E 值是否超过材料所具有的 E 值:

$$E = \frac{4PL^3}{\Delta f b \delta^3} \quad (1)$$

式中: P —元件的负载, N ;

L —元件的长度, mm ;

Δf —元件的位移量(挠度变量), mm ;

b —元件的宽度, mm ;

δ —元件的厚度, mm 。

1.3.2 双金属元件的最大负荷应力

双金属元件的最大负荷应力 σ 按下式计算

$$\sigma = \frac{6PL}{b\delta^2} \quad (2)$$

经计算得出的值应与材料本身的抗拉强度进行比较, σ 只能是小于材料的最大允许负荷应力。

例:用5J1578(5J16)制成悬臂梁双金属元件长度为60mm,已知 P 为1.5N(元件自由端加力1.5N的负荷举高2mm),已计算出的元件宽度 b 为13mm,厚度 $\delta=0.7mm$,则按上式计算:

$$\sigma = \frac{6PL}{b\delta^2} = \frac{6 \times 1.5 \times 60}{13 \times 0.7^2} = 84.77N/mm^2$$

查5J1578最大允许负荷为200N/mm², σ 没有超过允许值。但是如果超过,此时可以改变宽度 b 、厚度 δ 等值。

双金属元件在温度变化和受到外力(如断路器的脱扣杆的阻力)作用时,其应力由热弯曲、机械负载及元件制造中产生的内应力这三方面组成。前二者可以通过计算得到,而内应力只能估算,所以总的最大负荷应力,还需要通过必要的试验来验证。

2 双金属材料的分类

因为加热方式(法)不同和使用场所的差别,设计人员应按需要选材。为方便参考,现叙述不同类

型的材料和它的用途。

2.1 通用型—这是一个适用多种用途的品种,要求有较高的灵敏度和机械强度,中等的温度范围。典型的牌号有国产的5J1578(5J16)、5J1416(5J17)、5J1480(5J18),日本的BL—2、CIY,德国的TB155/78,法国的AS等。

2.2 高灵敏型—具有高灵敏性(即比弯曲 K 值),在同样的元件几何尺寸和温差下,它的位移较大,因此热推力也大,在塑壳式断路器(悬臂梁式)较大电流的傍热式中用得最多,典型材料有5J20110(5J11),国外同类型的有BR—1(日本住友金属公司),M(德国GRAU公司),TB208/1109(德国德镍公司),108(法国Imphy公司)等。这些材料的主动层是Mn75Ni.5Cu10,因此抗腐蚀性较差,易锈。

2.3 高温型—适用于300℃及以下的温度场所工作。要求有较高的机械强度和良好的抗氧化性能,但灵敏度较低。典型的材料有国产的5J1070(5J23)、5J0756(5J25),它们的工作温度范围分别是20~350℃和0~400℃,国外的有德国的TB1075,法国Imphy公司的IN546等。

2.4 低温型—适用于0℃及以下的低温环境中工作。性能要求与通用型材料相当。典型材料有国产的5J1478(5J19),其允许使用温度范围-80~+350℃,线性温度范围-50~+200℃。

2.5 耐腐蚀型—有良好的耐腐蚀性能,适合于化工等有腐蚀性介质场所使用。性能要求与通用型相近。通常它们的表面涂漆或镀以防蚀性良好的金属。

2.6 特殊型—具有各种特殊性能,能适应特殊场所使用的类型,典型材料有国产的5J1017(5J24)。国外的有法国Imphy的R15,日本的TM3、BL3(日本住友金属)、LIY(日本东芝)、TM22(美国)等。

2.7 电阻型—电阻率从最小的3 $\mu\Omega$ cm起,到5.1、8.3、11.9、14.8、33、43……141到最大的162 $\mu\Omega$ cm,主要用于额定电流 $I_n \leq 63A$ 的断路器或热继电器的直热式过电流脱扣器保护。电阻型双金属材料多数是三层金属组成,即主动层、被动层和中间层。中间层的材料有铜合金,镍(Ni)和Zr—Cu(锆—铜)。中间层是用作调节电阻率的,中间层厚度的微小变化,将使它的电阻率有较大的变化。国产型号有5J1306A、5J306B、5J1411A、5J1417、5J1455A、5J1455B以及新型的R70、R80、R90、R112、R141和R161等。国外同类型的有TRC—5(日本.住友)、

TB128/05(德. 德镍)、CuGe1(德 GRAN)、TB150/19(德)、TRC—15(日本. 住友)、TB138/15(德)、R16(法. Imphy)、TR—25(日本. 住友)、R25(法. Imphy)、TR—30(日本. 住友)、TB134/33(德)、TR—50(日本. 住友)、CNL—50(日本. 东芝)、TB139/50(德)、BR—2(日本. 住友)、R140(法. Imphy)、TB140/140(德)等等。

如上所说,电阻型双金属材料,适用直热式(双金属元件直接通电发热)计算时可参考以下公式:

$$T-T_0 = \frac{I^2 R t}{GC} \quad (3)$$

式中:

I —电流, A;

R —双金属元件的电阻, Ω ;

t —时间, s;

G —双金属元件的质量, g;

C —双金属元件的比热 卡, $g/^{\circ}C$;

$T-T_0$ —温度的变化, $^{\circ}C$;

将 $R = \rho \frac{L}{S}$ $G = b \delta l \gamma$ 代入上式, 得

$$T-T_0 = \frac{I^2 \rho \frac{L}{S} t}{b \delta l \gamma C} = \frac{I^2 \rho \frac{L}{b \delta} t}{b \delta l \gamma C} = \frac{I^2 \rho t}{b^2 \delta^2 \gamma C} \quad (4)$$

式中:

ρ —双金属元件的电阻率, $\mu \Omega \text{ cm}$;

b —双金属元件的宽度, mm;

δ —双金属元件的厚度, mm;

σ —双金属元件的密度(比重), g/cm^3 ;

以上公式没有考虑热双金属元件与周围环境热交换的影响,因此 $T-T_0$ 不能超过 $100^{\circ}C$, 加热时间必须在 60s 之内才能适应,从式(4)可见,如果 b 、 δ 不变(ρ 、 γ 和 C 变化不多),通过选用不同的 I , 达到不同的 $T-T_0$, 设计就简化了(得出 $T-T_0$ 可求得位移量 Δf 和热推力等)。

3 元件设计时,必须考虑选用材料的允许 $\int I^2 dt$ 和导致元件变形和熔断的 $I^2 t$ 值

塑料外壳式断路器的双金属元件是作过电流时保护的。但它与断路器的短路保护机构—电磁铁系统是串联的。这样就面临一个问题,就是断路器开断线路的短路电流(短路电流可达几万安培)时,双金属元件是否经受得住,即双金属元件本身允许的 $\int I^2 dt$ 是不是等于或大于线路发生短路电流流过此

元件的 $\int I^2 dt$? 这是世界各国的电器制造工程师和用户普遍关注的问题。

短路电流有两种性质,一种是电动机保护型电器要考虑的,一种是配电保护型电器要考虑的。

对于电动机保护电器而言,德国专家提出:双金属元件或电阻合金(发热元件)对短路稳定性的最低要求是:耐受12倍额定电流(但真正的短路电流是远远超过 $12I_n$),这就要求短路保护用的电磁脱扣器的动作时间尽可能短,并采用电阻型双金属材料(双金属元件是直热式)。

表1是德国有关标准提出的双金属材料(用于直热式元件)所能耐受的短路电流值

表1 耐受短路电流值

热双金属 牌号(德 Din1715)	相当于中 国的双金 属牌号	比弯曲 ($10^{-6}/K$)	电阻率 $\rho(\mu \Omega \text{ cm})$ ($20^{\circ}C$ 时)	比电流 $\left(\frac{A}{\text{mm}^2 \cdot s \cdot ^{\circ}C}\right)$	不同切断时间的允 许短路电流(A/ mm^2)		
					1s	0.1s	0.01s
TB1555	5J1555	15.0	55	2.44	52	164	518
TB1550	5J1550	15.0	50	2.52	53	169	535
TB1440	5J1440A	14.9	40	2.73	58	183	579
TB1430	5J1430B	14.0	30	3.04	65	204	645
TB1515	5J1515	14.9	15	4.39	88	278	878
TB1306	5J1306A	14.0	6	7.03	141	445	1406
TB1577A	5J1578	15.5	77	2.19	47	147	465
TB20110	5J20110	20.8	108	1.85	35	109	364
TB1906	5J1906	18.6	6	9.0	168	532	1684

注:比电流是指双金属在1秒钟加热至 $1^{\circ}C$ 时,所需通过的 1mm^2 截面积的电流。

从表1可见5J1306A、5J1906、5J1515、5J1430B等电阻型双金属材料,无论是1s、0.1s和0.01s内的允许通过短路电流(A/ mm^2)要比其它材料大。

如果双金属元件的截面积是 20mm^2 , 则对5J1555材料来论,1s时间内可通过的电流是3280A,而对5J1906的材料,则可通过33600A,而不造成元件变形等后果。

对配电型断路器来说,双金属元件可能承受的短路电流很大,它必须考虑双金属可能产生变形或熔断的 $\int I^2 dt$ 或以 $\frac{\int I^2 dt}{S^2}$ 的值来表示,其单位是 ($\times 10^3 \text{ A}^2 \text{ Sec}/\text{mm}^4$)。

表2是不同双金属元件在通过短路电流时的变形、熔断特性。

表2 变形与熔断特性

双金属材料牌 号	材 料 厚 度 mm	电阻率 ρ ($\mu\Omega\text{cm}$) (20℃时)	比弯曲 ($10^{-6}/\text{oK}$)	变形时的 $(\frac{i}{s})^2 t$ ($\times 10^3 \text{A}^2\text{Sec}/\text{mm}^4$)	熔断时的 $(\frac{i}{s})^2 t$ ($\times 10^3 \text{A}^2\text{Sec}/\text{mm}^4$)
R141	1.25~1.27	140 ± 7	14.3 ± 0.7	3.56	4.41
5J20110	1.0~1.27	110 ± 6	20	4.11	5.10
5J1578	1.27~1.8	81 ± 4	15 ± 0.7	8.4	9
5J1480	0.8、1.14、1.4	80 ± 0.05	14.2 ± 0.7	8.4	9
5J1455A	1.4	50 ± 2.5	14.5 ± 0.7	7.96	8.5
5J1325B	1.4	25 ± 1.3	13.5 ± 0.7	5.92	6.5
R15	0.8、1.14、1.4	15 ± 0.8	13.8 ± 0.7	16.4	18.5

作为傍热式的发热电阻合金材料的变形熔断的 $(\frac{i}{s})^2 t$ 值见表3。

表3 变形熔断值

电阻合金材料牌 号	材 料 厚 度 mm	电阻率 ρ ($\mu\Omega\text{cm}$) (20℃时)	极限使用 温度 ℃	变形时的 $(\frac{i}{s})^2 t$ ($\times 10^3 \text{A}^2\text{Sec}/\text{mm}^4$)	熔断时的 $(\frac{i}{s})^2 t$ ($\times 10^3 \text{A}^2\text{Sec}/\text{mm}^4$)
NC-005	1.2	5	200	33.4	42
NC-010	1.2	10	200	19.5	28.2
NC-015	1.2	15	300	14	20.7
NC-030	1.2	30	350	7.74	15.9
NC-050	1.2	50	400	4.26	10.2
Ni80Cr20	1	108	1150	2.17	4.49
1Cr18Ni9	1	70-82	1010	2.17	4.49
铜板(1/4硬)	各种	1.72	1083	84	90

当双金属元件(直热式)或是电阻合金材料(傍热式),在通过短路电流时,要求断路器在约0.02s内动作,因此尽管双金属元件或电阻合金元件通过极大短路电流,可使其温度大大升高,但因为时间很短,可看成是一种绝热条件,它们的 $\int i^2 dt$ 值可以下面的公式计算:

$$\int i^2 dt = \frac{J\gamma c S^2}{\alpha \rho} \ln \frac{T + \frac{1}{\alpha}}{T_0 + \frac{1}{\alpha}} \quad (5)$$

式中:

J —热功当量,等于4.186焦耳/卡;

γ —材料的比重, g/cm^3 ;

c —材料的比热卡, $\text{g}/\text{℃}$;

α —材料的电阻温度系数, $1/\text{℃}$;

ρ —20℃时材料的电阻率, $\mu\Omega\text{cm}$;

将各种材料的 γ 、 c 、 α 、 ρ 代入5式,并以 T_0 为20℃, T 为材料的最高使用温度进行计算,就可得表4 各种双金属材料 and 电阻合金材料允许的

$\int i^2 dt$ 值。

表4 材料允许的 $\int i^2 dt$ 值

	材料牌号	允许的 $\int i^2 dt$ (A^2s)
双金属材料	R141	$6.11 \times S^2 \times 10^3 \ln \frac{2252+200}{2272}$
	5J20110	$3.90 \times S^2 \times 10^3 \ln \frac{1091+200}{1111}$
	5J1480	$4.13 \times S^2 \times 10^3 \ln \frac{793+350}{813}$
	5J1580	$4.13 \times S^2 \times 10^3 \ln \frac{813+350}{833}$
	R15	$5.08 \times S^2 \times 10^3 \ln \frac{180+250}{200}$
	R25	$3.87 \times S^2 \times 10^3 \ln \frac{213+350}{233}$
	R30	$3.59 \times S^2 \times 10^3 \ln \frac{230+350}{250}$
	R50	$3.10 \times S^2 \times 10^3 \ln \frac{365+350}{385}$
电阻合金材料	NC-005	$5.72 \times S^2 \times 10^3 \ln \frac{749+200}{769}$
	NC-010	$5.31 \times S^2 \times 10^3 \ln \frac{1409+200}{1429}$
	NC-015	$4.96 \times S^2 \times 10^3 \ln \frac{1980+300}{2000}$
	NC-030	$6.20 \times S^2 \times 10^3 \ln \frac{4980+350}{5000}$
	NC-050	$7.59 \times S^2 \times 10^3 \ln \frac{9980+400}{10000}$
	Ni80Cr20	$2.49 \times S^2 \times 10^3 \ln \frac{7123+1150}{7143}$
	1Cr18Ni9	$5.52 \times S^2 \times 10^3 \ln \frac{9980+1010}{10000}$
	T2Y2(紫铜板)	$5.05 \times S^2 \times 10^3 \ln \frac{234+1080}{254}$

当短路电流的 $\int i^2 dt$ (设 t 为0.02s)超过双金属或电阻合金材料允许的 $\int i^2 dt$,将引起双金属元件或发热元件变形甚至熔断,此时应采用分流的办法。图1是一种常见的分流方案。

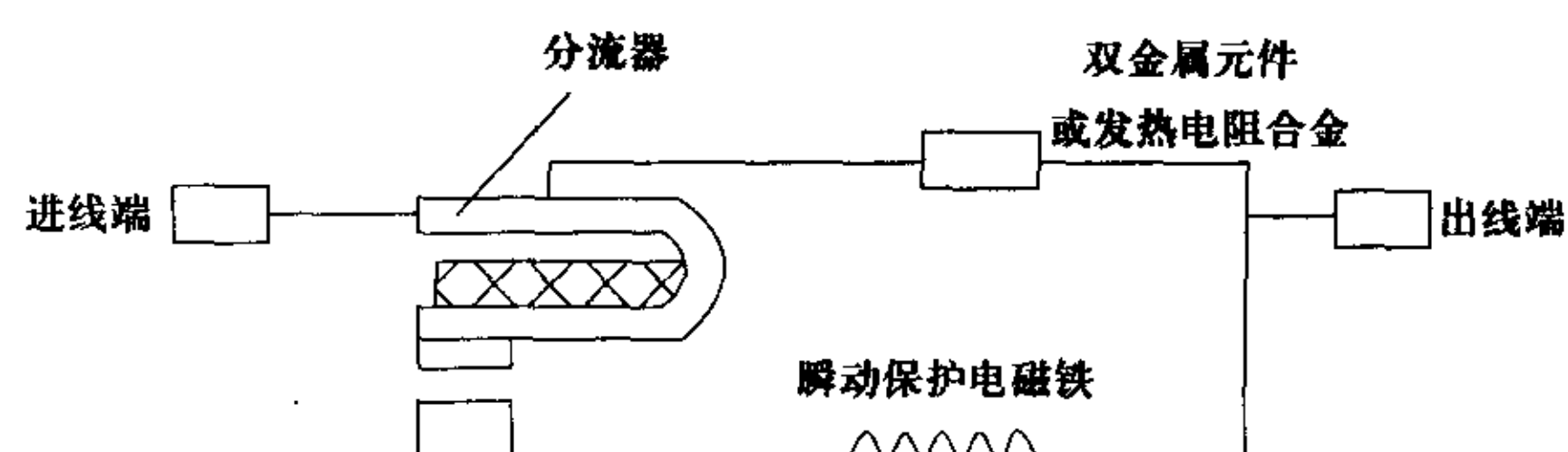


图1 分流方案

图1中,未发生短路(一般为 $10I_n$ 或更大)时,电流经进线端进入分流器的一部分,再经双金属元件或发热电阻合金元件到出线端(此时瞬动因无电流流过而未工作);当发生线路短路,短路达到 $10I_n$ 时,倒U形的分流器产生很大的电动斥力,使其下部向下运动,分流器(导体)与瞬动保护电磁铁的线圈有了通路,短路电流通过电磁铁,而不通过双金属元件或发热元件(它们的阻抗大于电磁铁线圈),这样就避免了双金属或发热元件遭遇短路电流而受损。

4 双金属元件的设计

塑壳式断路器或热继电器常用的双金属元件的形状是悬臂梁式(或称直条形),如图2所示。

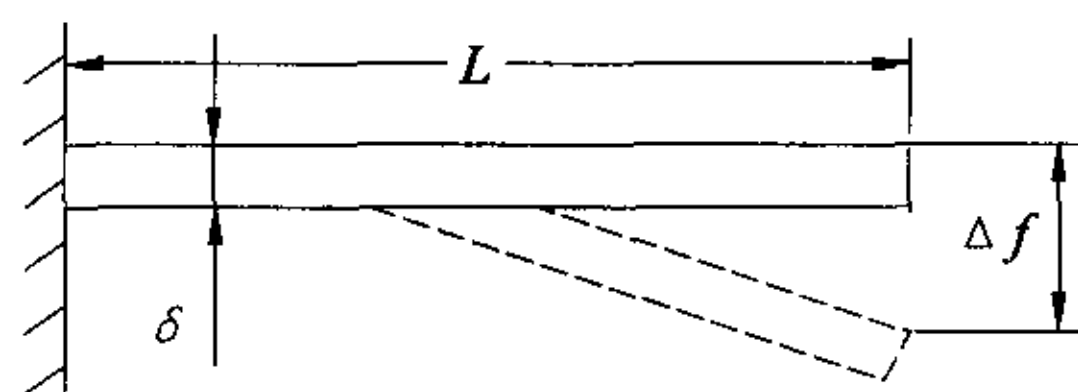


图2 双金属元件示意图

双金属元件的位移量(热推力 $P=0$) Δf

$$\Delta f = \frac{K(T-T_0)L^2}{\delta}$$

式中： K —比弯曲 ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)；

$T-T_0$ —温度的变化， $^\circ\text{C}$ ；

L —元件的长度，mm；

δ —元件的厚度，mm。

机械推力—在恒定温度下原件产生位移的力

$$P = \frac{b\delta^3 E \Delta f}{4L^3}$$

式中： b —元件的宽度，mm；

E —元件材料的拉伸弹性模量；

Δf —元件的位移量，mm。

热推力—元件的位移受到完全限制时，因温度变化产生的弯曲全部变为力。

$$P = \frac{K(T-T_0)b\delta^2 E}{4L}$$

最大负荷(弯曲)应力 σ

$$\sigma = \frac{6PL}{b\delta^2}$$

将以上公式总结如下：

1) 温度变化时的位移量 Δf

a) 与材料的厚度成反比；

b) 与材料长度的平方成正比；

c) 不受材料宽度的影响；

d) 与温度变化值成正比。

2) 温度变化时产生的热推力

a) 与材料的厚度平方成正比；

b) 与材料的宽度成正比；

c) 与材料的长成正比；

d) 与温度变化值成正比。

3) 最大负荷(应力)

a) 与材料的厚度平方成反比；

b) 与材料的长成正比；

c) 与材料的宽度成反比；

d) 与热推力成正比。

(收稿日期：2003-02-19)

三峡输变电工程实施情况

目前正实施第一阶段

至2002年底，交流部分已投入变电站(含开关站)约20余座，所招标变压器达42台，容量约1000万kVA，已占总容量的40%以上；关联电抗器54台，容量约270万kvar；50万V断路器已订货84台；50万V隔离开关近200台。直流部分，宜昌龙泉至江苏常州政平±50万V直流工程线路长890km，龙泉、政平两个换流站容量各300万kW。已于2002年11月第一级投入，具有输送150万kW能力的功能，计划2003年第二级投入，且有输送300万kW能力的功能。两个换流站所采用的设备，于1999年分别与瑞士ABB、德国西门子等签订了引进设备的技术转让的协议，两个换流站的大部分设备是以上两个公

司的设备，国内西变、沈变等也为龙泉、政平两个换流站按合同分包比例分别提供了部分换流变压器，平波电抗器等设备。

据不完全统计，2003年以前已投产或将要投产的交流50万V变电站(含开关站)：

华中地区：宜昌、荆州、孝感、荆门(斗笠)开关站、长沙、益阳、(祥符)、南昌、开封、新乡。

华东地区：宜兴、杭州东、阜阳(阜东)、金华(双龙)、神州。

重庆地区：万县、长寿。

周鹤良 供稿

(收稿日期：2003-06-11)