

架空线路导线间电动力的计算、混线及其预防措施

The Calculation of Electrodynamic Force between Overhead Line Conductors, Conductor Mixing and Prevention

李如虎

Li Ruhu

(广西电力工业局 南宁市民主路6号 530023)

(Guangxi Electric Power Bureau, 6 Minzhu Road, Nanning, 530023)

摘要 对各导线排列形式下三相交流线路短路电动力的计算和分析, 提出预防电动力造成碰线的措施。绘出诺谟图, 以便很快地查出电动力的大小, 和在电动力作用下导线的偏角、偏距, 以用来校核导线间距离。

关键词 架空线 电动力 混线 预防

Abstract By the calculation and analysis about the electrodynamic force in short-circuit cases on 3-phase a-c overhead lines with various conductor arrangements, this paper acknowledges the effective factors on the electrodynamic forces, recommends useful measures to reduce the influence by them. The paper also provides Normed figures in order to easily find out the magnitude of the electrodynamic force, and the deflection of conductors under the force, thus the clearances between overhead lines can be checked.

Key words overhead line, electrodynamic force, conductor mixing, prevention

1 问题的提出

部颁《架空配电线路设计技术规程》(SDJ206-87) (以下简称《规程》) 第5.0.6条规定: 配电线路导线的线间距离, 应结合运行经验确定。如无可靠资料, 导线的线间距离不宜小于表1所列数值。

表1 配电线路导线最小线间距离

Table 1 Minimum clearances between conductors on distribution Lines

档距 Span (m)	≤40	50	60	70	80	90	100
最小线间距离 Minimum clearance (m)	0.6	0.65	0.7	0.75	0.85	0.9	1.0

该《规程》的修订说明指出: 本条所列数值是根据各地供电局(电业局)的运行资料(列表举出了10个地区采用的线间距离, 此处略), 并参考1963年“全国线路电气专业座谈会”确定的导线间水平距离公式, 进行分析比较而得出的。这个距离, 对一般中小容量的配电系统来说, 电动力的影响是能够满足要求的。以广西南宁为例, 10 kV 线路线间距离一般采

用0.75 m, 在70年代以前并未出现电动力混线问题。但随着系统容量不断增大, 80年代后曾多次发生短路电流电动力造成混线事故。例如1981年7月19日, 由于用户高压配电室中的老鼠引起母线三相短路, 造成西部变出线的963、965双回共杆10 kV线路, 在13#~14#杆间导线混线。说明大容量配电系统, 导线间电动力应该值得考虑。诚然, 正如《规程》条文解释所说“在考虑了短路混线因素后, 线间距离要求明显增大。……要以加大线间距离来满足防止短路混线是困难的, 各地只能根据运行经验, 经过技术经济比较, 确定适当的线间距离。”但是, 在确定了线间距离之后, 再校核一下短路电流电动力是否会造成混线, 是很必要的。本文对电动力进行分析、计算, 并绘出诺谟图, 以便很快地查出电动力的大小, 和在电动力作用下导线的偏角、偏距。以用来校核导线间距离。最后还提出了预防电动力造成混线的措施。

2 各种导线排列形式下三相交流线路短路电动力的计算

用比奥—沙瓦定律推导出的电动力计算公式是

$$F = CI_1I_2 \times 10^{-7} \quad (N) \quad (1)$$

式中C称为回路系数, 是一个无量纲系数。它与所研

究的导电系统的几何尺寸、形状有关。对两个无限长平行导体

$$C = \frac{2L}{a}$$

代入式(1)得两平行导体间的电动力计算公式

$$F = \pm 2I_1 I_2 \frac{L}{a} \times 10^{-7} \quad (2)$$

式中 I_1, I_2 ——分别为两导体中流过的电流(A)。当两导体电流方向相同时,表现为吸力(式中用“+”表示);反之表现为斥力(式中用“-”表示)。

表2 水平排列时三相导线的电动力变化曲线及峰值

Table 2 Characteristics and peak of electrodynamic forces on 3-phase conductors when horizontally arranged

相别 Phase	A 相导线 Phase A conductor	B 相导线 Phase B conductor	C 相导线 Phase C conductor
电动力变化曲线 Characteristics of electrodynamic force			
峰值 Peak (▲为最大值 maximum value) (N/m)	▲ $f_{Am1} = -1.616 \times 10^{-7} \times \frac{I_m^2}{a}$ $f_{Am2} = 0.116 \times 10^{-7} \times \frac{I_m^2}{a}$	▲ $f_{Bm1} = -1.732 \times 10^{-7} \times \frac{I_m^2}{a}$ ▲ $f_{Bm2} = 1.732 \times 10^{-7} \times \frac{I_m^2}{a}$	▲ $f_{Cm1} = -1.616 \times 10^{-7} \times \frac{I_m^2}{a}$ ▲ $f_{Cm2} = 0.116 \times 10^{-7} \times \frac{I_m^2}{a}$

“-”表示斥力 Means repulsive; “+”表示引力 Means attractive

结论:对于在同一平面上平行布置的三相导线:

(1)按同一时间轴,三相电流电动力变化曲线如图1所示。该图能更清晰地看出力的相互关系。

(2)两边相导线电动力的最大值相同;而中间相导线的最大电动力比两边相的大,相差的倍数是

$$\frac{1.732}{1.616} = 1.07 \text{ 倍。}$$

2.2 当三相导线三角形排列时,作用在每相导线上

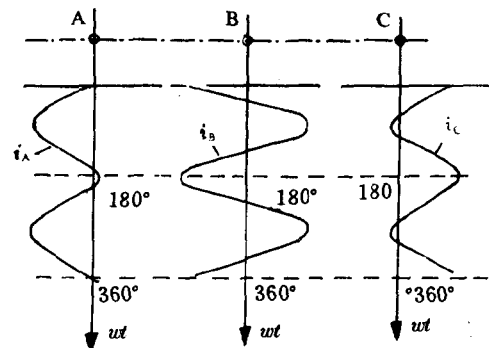


图1 导线水平排列时各相电动力的变化曲线

Fig. 1 Characteristics of electrodynamic forces on respective

phase conductors when horizontally arranged

a —两导体间的距离 (m)

L —受电动力作用的导体长度 (m)

在三相交流系统中,在不同瞬间,三相导线电流的大小和方向是各不相同的。而且导线的排列方式对电动力造成导线的运动会产生重要的影响,所以在三相交流系统中不能用上面简单公式计算。

2.1 经推导,当导线水平排列时,作用在各相导线单位长度上的电动力变化曲线、峰值(峰值中大者为电动力的最大值)列于表2。

的电动力情况都相同,是该相导线与另两相导线间电动力的矢量和。分析指出,其最大值 f_m 与表2中 f_{nm} 的计算相同,但它既是时间的函数又是空间的函数,如图2所示。矢量端点的轨迹是一个圆,即某相电动

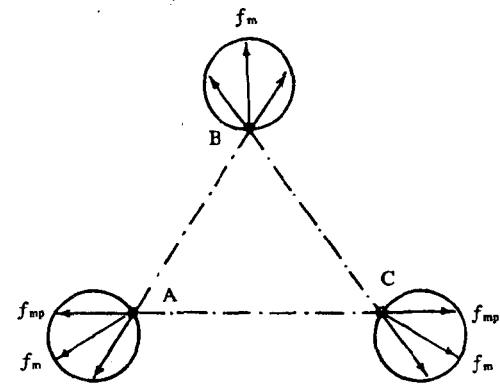


图2 导线三角排列时各相电动力的变化曲线

Fig. 2 Characteristics of electrodynamic forces on respective phase conductors when triangularly arranged

力永远是离开另两相的斥力。圆的直径为其最大值。但是使两线运动的力是水平分力 f_{mp} ;

$$f_{mp} = f_m \cos 30^\circ = 0.866 f_m = 0.866 \times 1.732$$

$$\times 10^{-7} \times \frac{I_m}{a} = 1.5 \times 10^{-7} \times \frac{I_m}{a} \text{ (N/m)}$$

所以导线三角形排列时,使其运动的电动力的水平分

力为相同情况下水平排列时力的 86.6%。简言之,没有水平排列时严重。

2.3 当三相导线垂直排列时,电动力的推导过程与水平排列时完全一样,但是向上的电动力必须克服导线的重力,才能往上运动;向下的电动力不能使导线向下运动,因为导线两端已固定。所以垂直排列的导线一般不会混线。

以上分析的是三相稳态电流(即负荷电流)的情况。负荷电流大到能造成混线的情况几乎是没的,我们的目的是研究短路电流(暂态电流)的电动力。由于短路电流是暂态过程,电动力也是由大到小,由暂态到稳态的过程(图3、图4)。而造成导线摆动最

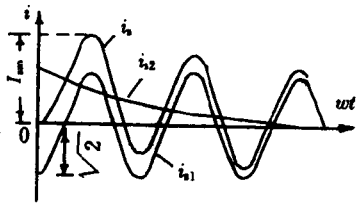


图3 短路电流波形

Fig. 3 Wave form of short-circuit current

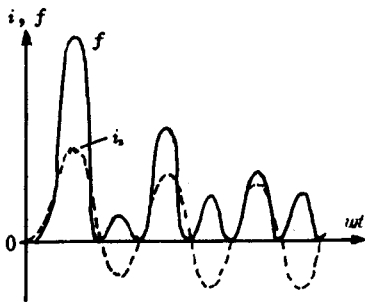


图4 两相短路时的电动力波形图

Fig. 4 Wave form of electrodynamic force under biphas short circuit

大的是短路电流第一个周期内的最大值的电动力,因此只要把三相短路或两相短路电流的最大值(指有效值,在短路计算中通常称为起始次暂态电流)代入电动力计算式中,就是三相短路或两相短路电动力的计算公式(因为短路电流习惯用 kA 为单位,所以式中系数 $\times 10^{-1}$,而不是 $\times 10^{-7}$),即

$$f_m^{(3)} = 1.732 \times 10^{-1} \times \frac{I_m^{(3)2}}{a} \quad (\text{N/m}) \quad (3)$$

$$f_m^{(2)} = 1.732 \times 10^{-1} \times \frac{I_m^{(2)2}}{a} \quad (\text{N/m}) \quad (4)$$

式中 $I_m^{(3)}$ 、 $I_m^{(2)}$ 分别为三相或两相短路电流最大值。

由于 $I_m^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m^{(3)} = 0.866 I_m^{(3)}$,所以在相同情况下两相短路时的电动力为三相短路电动力的 86.6%。下面我们将以三相短路电动力(式 3*) 为依据,计算导线水平排列时(也可推广到三角排列)

导线偏移和两导线的接近距离。

3 导线偏移的分析

3.1 水平排列(水平排列时导线发生混线的危险最大)

当两导线相吸时,它们的接近距离 S (图5),

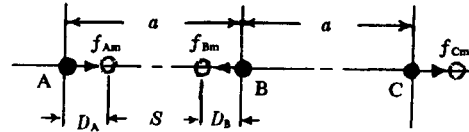


图5 Fig. 5

$$s = a - (D_A + D_B)$$

式中 D_A —导线 A 的电动力 f_{Am} 使其向导线 B 的偏移距离(m);

式中 D_B —导线 B 的电动力 f_{Bm} 使其向导线 A 的偏移距离(m);

由于 f_{Am} 很小,为简单计,假设 A 相导线不偏移,把力 f_{Am} 加到 B 相导线上,B 线的总电动力:

$$f_m = f_{Am} + f_{Bm} = (0.116 + 1.732) \times 10^{-7} \times \frac{I_m^2}{a} = 1.848 \times 10^{-7} \times \frac{I_m^2}{a} = 1.067 f_{Bm}$$

由于力使物体摆动的距离基本上与力的大小成正比,所以 $1.067 f_{Bm}$ 力使 B 线偏移 $1.067 D_B$,所以上式又可变为

$$S = a - 1.067 D_B \quad (5)$$

当两导线相斥时,理论上说好像两导线不会发生混线。但实际情况并不是这样:两导线相斥后,又恢复原位置时,一定会向反方向摆动同样大小的距离(忽略阻力的影响,见图6),这时两导线之间的接近距离

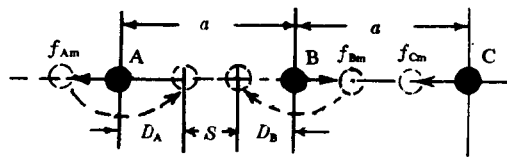


图6 Fig. 6

仍然是 $S = a - (D_A + D_B)$ 。同样假设 f_{Am} 力加到 B 线上,B 线受到的总电动力(取绝对值)为

$$f_m = f_{Am} + f_{Bm} = (1.616 + 1.732) \times 10^{-7} \times \frac{I_m^2}{a} = 3.348 \times 10^{-7} \times \frac{I_m^2}{a} = 1.933 f_{Bm}$$

同理,两导线之间的接近距离则为

$$S = a - 1.933 D_B \quad (6)$$

为了与下面三角形排列时计算一致(式 7),(6)式近似写成

* 为简单计,下面将 $I_m^{(3)}$ 的角标去掉,记为 I_m

$$S = a - 2D_n \quad (6)'$$

比较式(5)、(6)可知,最严重的情况是出现在两导线互相排斥后摆动时。下面将以这种情况来校核导线间的距离。

3.2 三角形排列(三角形排列时两边线发生混线的危险最大)

前面已经提到,使两边线互相排斥的电动力是最大电动力 f_m 的水平分力 f_{mp} , $f_{mp} = 0.866f_m$ 。我们以力 f_m (等于 f_{1m}) 所造成的偏移 D_n 为比较值,则力 f_{mp} 所造成的偏移显然为 $D_\lambda = D_c = 0.866D_n$ 。也就是说,导线三角形排列时边线的偏移是水平排列时中线偏移的 86.6%,所以计算前者的偏移可以按后者的计算结果乘 0.866 即可。但是因为 $D_\lambda = D_c$,所以两导线的接近距离 S 则为

$$S = a - 2D_\lambda = a - 2D_c \quad (7)$$

前面已经提到,水平排列时接近距离 S 也可以近似地按线间距离 a 减去 2 倍最大偏移计算(式(6)')。这样,无论是水平排列还是三角形排列,公式就一致了。

4 导线偏移和接近距离的计算·诺谟图解法

上面提到电动力造成的导线偏移 D (应为最大偏移 D_n ,脚标略,下同),但是电动力仅仅是造成导线偏移的力之一,而不是唯一的力。严格地说,导线是在水平力(包括电动力和风力)和垂直力(包括导线自重和冰重)的综合作用下发生偏移的。风力基本是使三相导线同步平移,于混线影响不大;复冰增加了导线垂直向下的力,只能使偏移减小;都忽略不计。

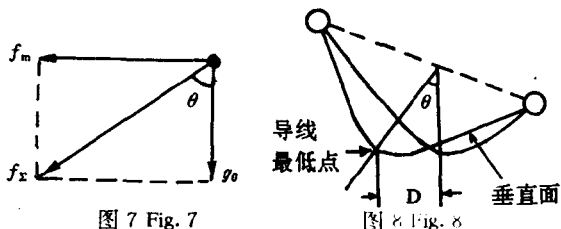


图 7 Fig. 7

图 8 Fig. 8

在水平的电动力 f_m 和垂直向下的导线自重 g_0 的综合作用下(图 7),导线将发生偏移(图 8)。导线悬垂曲线所构成的平面与垂直平面的夹角我们称为偏角 θ ,显然 θ 角就是导线所受水平力与垂直力的正切角,所以

$$\theta = \text{tg}^{-1} \frac{f_m}{g_0} \quad (8)$$

档距内任一点的偏角 θ 都相同,但每点的偏移距离则不等,与该点的弧垂有关。因为导线最低点的弧垂最大,所以该点的偏移也最大,发生碰线都在档距中间为多,原因就在此。所以我们只计算最低点的偏移:

$$D = f_{\perp} \cdot \sin\theta \quad (\text{m}) \quad (9)$$

式中 f_{\perp} ——导线最低点处的弧垂(m);

至此计算导线偏移 D 和两线接近距离 S 的步骤总结如下:

(1) 根据线距 a 和最大短路电流幅值(kA)由式(3)计算出最大电动力 f_m ;

(2) 根据电动力 f_m 和导线比自重 g_0 由式(8)计算出导线最大偏角 θ ;

(3) 根据偏角 θ 和导线弧垂 f_{\perp} 由式(9)计算出导线最大偏距 D (注意三角形排列时要乘 0.866);

(4) 根据偏距 D 和线间距离 a 由式(7)计算出两导线间的接近距离 S 。当 S 小于放电距离时,两线发生放电;当小于零时将发生碰线或混线。

现以 1981 年 7 月 19 日南宁西郊变 963、965 共杆 10 kV 线路,因用户高压配电室老鼠爬上母线引起三相短路,造成在 13" ~ 14" 档间导线混线为例,计算如下。已知档距 $L = 75$ m,线距 $a = 0.7$ m, $f_{\perp} = 0.88$ m,导线为 LJ-70, $g_0 = 0.19$ kg/m,三角排列, $I_m = 3.5$ kA。

$$f = 1.732 \times 10^{-1} \times \frac{3.5^2}{0.7} = 3.03 \quad (\text{N/m})$$

$$\theta = \text{tg}^{-1} \frac{3.03}{0.19 \times 9.8} = 58.43 \quad (\text{度})$$

$$D = 0.866 \times 0.88 \times \sin 58.43^\circ = 0.65 (\text{m})$$

$$S = 0.7 - 2 \times 0.65 = -0.6 \quad (\text{m})$$

所以导线混线打绞。

根据上述公式我们可以作出三个诺谟图(图 10); A. 计算电动力 f 的诺谟图; B. 计算偏角 θ 的诺谟图; C. 计算偏距 D 的诺谟图。为了使用上的方便,选适当的图尺系数后三个图连为一体,如图 9 所示。

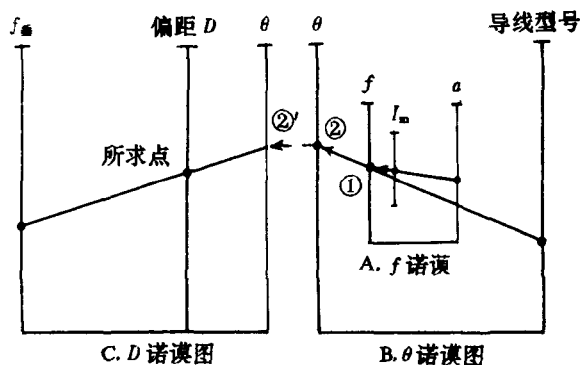


图 9 诺谟示意图

Fig. 9 Nomed sketch

诺谟图的使用

1) 已知 a, I_m , 求偏距 D 。

(1) 根据 a 和 I_m , 在 A 图上找出①点;

(2) 根据①点和导线型号, 在 B 图上找出②点;

(3) 在 C 图上找出与②点等值的点②', 根据②'和导线弧垂在 C 图上就可以求出偏距 D 。注意这是水平排列的偏距; 三角排列应乘 0.866;

(4) 根据公式 (7) 算出两导线接近距离 S 。

仍以南宁“7·19”事故为例, 用图解法求解。 $a = 0.7\text{m}$, $I_m = 3.5\text{kA}$, 从 A 图查得 $f = 30\text{N/m}$ 。又因为导线为 LJ-70, 从 B 图查得 $\theta = 59^\circ$ 。在 C 图上找出 59° 的点, 又已知 $f_{\text{垂}} = 0.88\text{m}$, 从 C 图上查得 $D =$

0.75 m, 乘 0.866 得 0.65 m, 与计算结果一致。

2) 已知导线弧垂和短路电流, 求不发生两导线放电的最小线间距离。这只能用试算的方法推导。先假设一个 a 值, 用上述方法求出 D , 如果接近距离 S 恰好等于线路电压所要求的空气放电距离时, a 就是所要求的最小线间距离。现仍以“7·19”事故为例, 求得为满足两线间在最大电力作用下满足放电距离 0.2m 的最小线间距离是 1.22m。

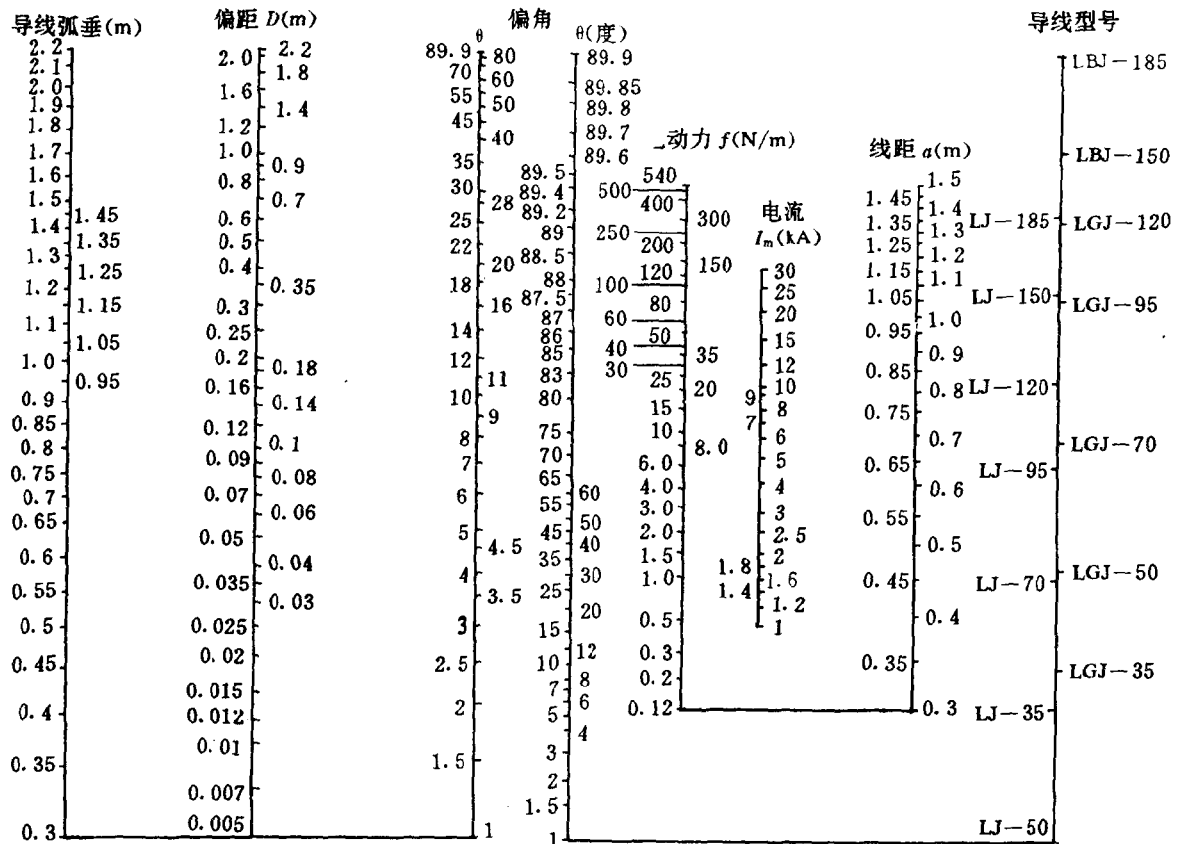


图 10 偏距计算诺谟图 Fig. 10 Nomograph for deflection

- A. 计算电动力诺谟图 Nomograph for electrodynamic;
- B. 计算偏角 θ 诺谟图 Nomograph for deflection angle θ ;
- C. 计算偏距 D 诺谟图 Nomograph for deflection D

5 预防电动力造成碰(混)线的措施

在上述例子中, 为了满足电动力作用下不碰线的

要求, 线间距离要求 1.22 m。而例中的短路电流只有 3.5 kA; 如果为 10 kA, 则要求线距为 1.72 m。所以

表 3 相同条件下不同导线的偏距

Table 3 Deflection of various conductors under the same condition

导线型号 Type of conductor	f (N/m)	θ (°)	D (m)	比较 Comparison	说明 Remark
LJ-70	30	59	$0.75 \times 0.866 = 0.65$	作基准值 As reference	弧垂 Sag 0.88m
LJ-95	30	50	$0.6 \times 0.866 = 0.52$	减小 reduced by 20%	弧垂 Sag 0.75m
LGJ-70	30	49	$0.4 \times 0.866 = 0.35$	减小 reduced by 46%	弧垂 Sag 0.55m

靠增大线间距离来解决短路电动力造成碰线不是有效的措施。《规程》第 5.0.6 条文解释, 列举了吉林电业局作的短路混线试验, 也说明了这一点。

笔者认为预防电动力造成碰线的有效措施:

由于三相导线水平排列时, 发生电动力碰线的危险性最大, 三角形排列次之, 垂直排列最好。所以在短路

(下转第 40 页 Continue on page 40)

- 5 Critser E S, Leibfried-Rutledge M L, Eyestone W H, et al. Acquisition of developmental competence during maturation in vitro. *Theriogenology*. 1986, 25; 150.
- 6 Saeidi K, Hoshi M, Leibfried-Rutledge M L, et al. In vitro fertilization and development of bovine oocytes matured in serum-free medium. *Biol. Reprod.* 1991, 44; 256~260.
- 7 Eyestone W H, de Boer, H A FSH enhances developmental potential of bovine oocytes matured in chemical defined medium. *Theriogenology*. 1993, 39; 216.
- 8 Harper K M, Bracdet B G. Bovine blastocyst development after in vitro maturation in a defined medium with epidermal growth factor and low concentration of gonadotropins. *Biol. Reprod.* 1993, 48; 409~416.
- 9 Zuelke K A, Brackett B G. Increased glutamine metabolism in bovine cumulus cell-enclosed and denuded oocytes after in vitro maturation with luteinizing hormone. *Biol. Reprod.* 1993, 815~820.
- 10 Iritanin A, Cheng Z S, Utsumi K. Effects of follicular factor on the IVM-IVF bovine oocytes. *Proc. 12th Int. Congr. Anim. Reprod. (The Hague)*, 1992, 342.
- 11 Larcocca C, Kmaid S, Calvo J. Effect of follicular fluid and estrus cow serum on maturation, fertilization and development of the bovine oocyte in vitro. *Theriogenology*. 1993, 39; 253.
- 12 De Azambuja R M, Moreno J F, Kraemer D, et al. Effect of gas atmosphere on in vitro maturation of bovine oocytes. *Theriogenology*. 1993, 39; 184.
- 13 Niwa K, Ohgoda O. Synergistic effect of caffeine and heparin on in vitro fertilization of cattle oocytes matured in culture. *Theriogenology*. 1988, 30; 733.
- 14 Park C K, Ohgoda O, Niwa K. Penetration of bovine follicular oocytes by frozen-thawed spermatozoa in the presence of caffeine and heparin *J. Reprod. Fert.* 1989, 86; 577~582.
- 15 Maquant-Le Guienne B, Thibault C. Fecondation in vitro d'ovocytes bovins matures in vivo ou in vitro. In 25th Coll. Soc. Fr. Et Fertil, pp. 145~150. Masson, Paris, 1987.
- 16 Rehman N, Collins A R, Wright Jr R W. Effect of sperm exposure time on in vitro fertilization and embryo development of bovine oocytes. *Theriogenology*. 1993, 39; 294.
- 17 McCaffrey C, McEvoy T G, Diskin M G, et al. Successful co-culture of 1-4-cell ova to the morula or blastocyst stage. *J. Reprod. Fert.* 1991, 91; 119~124.
- 18 Nagao Y, Saeki K, Kainuma H. Effect of oxygen concentration on the development of in vitro matured and fertilized bovine oocytes cultured in a protein-free medium. *Theriogenology*. 1993, 39; 273.
- 19 Larson R C, Ignatz G G, Currie W B. Development of in vitro fertilized bovine embryos beyond the 8-cell block using completely defined medium containing fibronectin. *Abstract Series No. J. Reprod. Fert.* 1989, 3; 20.
- 20 Larson R C, Ignatz G G, Currie W B. Defined medium containing TGF- β and bFGF permits development of bovine embryos beyond the "8-cell block". *Abstract Series, No. J. Reprod. Fert.* 1990, 5; 22.
- 21 Brackett B G, Zuelke K A. Analysis of factors involved in the in vitro production of bovine embryos. *Theriogenology*, 1993, 39; 43~64.
- 22 Shi D S, Lu K H, Gordon I, et al. Variation in cleavage and embryonic development of bovine oocytes in vitro fertilized with different bull ejaculates. *Theriogenology*. 1993, 35; 271.
- 23 Lu K H, Polge C. A summary of two-year's results in large scale in vitro bovine embryo production. *Proc. 12th Int. Congr. Anim. Reprod. (The Hague)* 1992, 3; 1315~1317.
- 24 石德顺, 凌泽继, 蒋和生等. 国内条件下牛体外受精程序的建立. 863 计划生物技术领域年会论文摘要. 1991~1992.
- 25 Kajihara Y, Kometani N, Shitanaka Y, et al. Pregnancy rates and births after the direct transfer of frozen-thawed bovine IVF embryos. *Theriogenology*. 1992, 37; 233.
- 26 Kruip Th A M, Boni R, Roelofsen M W M, et al. Application of OPU for embryoproduction and breeding in cattle. *Theriogenology*. 1993, 39; 251.
- 27 石德顺, 卢克焕. 卵泡细胞对牛卵母细胞体外成熟的影响. *广西农业大学学报*. 1992, 11 (4); 66~72.

(责任编辑: 蒋汉明)

(上接第 64 页 Continue from page 64)

电流大的系统, 或者变电站引出的主干线, 单回线路建议采用三角形排列; 双回共杆线路建议采用垂直排列。

如果其他条件不变, 将导线换大或者换为钢芯铝绞线, 偏距 D 如表 3 所示。

可见, 将导线换为钢芯铝绞线对减少配电线路由于短路电力造成碰线事故, 效果很好。表 3 钢芯铝

绞线 LGJ-70 比铝绞线 LJ-70 弧垂减小 37.5%。

参考文献

- 1 李如虎. 配电线路导线间电力造成碰线的分析、推导和预防措施. *广西电力技术*. 1983, (2).
- 2 张节容等. 高压电器原理和应用. 北京: 清华大学出版社, 1989.
- 3 水电部. 架空配电线路设计技术规程 (SDJ206-87) 及条文说明. 北京: 水利电力出版社.

(责任编辑: 梁积全)