

一种新型的输电线路——高自然功率紧凑型线路

刘金铭 陈少华 李日隆

广东工业大学电气工程及自动化系, 广州, 510090

摘要 分析紧凑型输电线路能提高输电能力的机理, 论述紧凑型输电线路上的电场强度、分裂导线的结构、自然功率之间的关系, 提出有待进一步深入研究的有关问题。

关键词 紧凑型线路; 电场强度; 自然功率; 分裂导线结构

中图资料法分类号 TM726.1; TM722

交流输电方式经历了长期的发展阶段, 其输电线路结构型式到今天已定型和标准化, 形成了所谓常规的输电线路。但是随着电力工业的发展, 要求输送容量的增加, 输电电压又相应提高。在输电线路的建设中, 线路的走廊所需的费用越来越高。如何减少占地面积, 降低单位容量的线路造价, 将常规输电线路提高其传输能力, 是摆在输电线路建设中一个重要课题, 也是输电线路建设面临的挑战。

在 70 年代以后, 在美国、加拿大、法国、日本、俄罗斯等国家, 出现结构紧凑化型的输电线路。它是将常规线路尺寸缩小而又使线路的输送容量提高的一种新型结构的输电线路。例如美国在 70 年代采用了相间绝缘间隔棒, 138kV 线路相间距离只有 1.5m。前苏联的 110kV 线路亦采用相间间隔棒, 相间距离从 4~4.5m 缩减为 1.5m。随后, 这种紧凑型线路又应用到更高电压和超高压线路上。当前, 输电技术的一种新的发展趋势是在线路紧凑化的基础上, 增加每相导线的分裂数, 并且实行优化排列, 以便大幅度降低导线波阻抗和提高线路的传输功率, 即演变成高自然功率紧凑型线路, 从而带来巨大的社会效益。与常规线路相比, 提高输送功率 60%~70%。因此高自然功率紧凑型线路被认为是输电线路的发展方向, 世界各国都在积极开展这方面的研究和试验工作。

1 紧凑型线路提高输电容量的机理

对于超高压远距离输电线路, 最适宜的传输功率应接近线路的自然功率。线路的相间距离从常规尺寸缩减后, 不但使杆塔轻型化和节省走廊, 同时会增大相间电容和相应的导线电容 C , 而电容 C 是与线路的自然功率 P 联系在一起的。令每千米导线长度的正序电感为 L , 波阻抗为 Z , 相电压为 U 。已知正序波速接近于光速 $V = (LC)^{-1/2}$, 则有:

$$Z = (L/C)^{1/2} = (LC)^{1/2} / C = 1 / CV, \quad (1)$$

$$P = 3 U^2 / Z = 3 CV U^2. \quad (2)$$

由此可知, Z 与 C 成反比。在既定额定电压 U 下, P 与 C 成正比。所以 C 的增加, 同样可以使 P 值按照相应的倍数增大。而三相输电线路电容的大小与相间距离、导线截面、杆塔结构尺寸等因素有关。对于三相导线对称布置时, 每相导线对地电容为:

$$C = \frac{0.024}{\lg(D/r_o)} \quad \mu\text{F/km}, \quad (3)$$

式中 D 为相间距离, r_o 为导线半径.

上式可见,减小相间距离或增大导线半径都会使导体的对地电容增大.但常规线路在改变这 2 个参数时,导线对地电容的增加不大,最多增大 15%~25%.要进一步增加电容 C ,必须采取适当排列的多分裂导线.但目前常规的做法是,220kV 导线每相为 1 根,330kV 为 2 根,500kV 为 4 根.如果能突破这传统的设计原则,采用加大分裂间距和增加分裂数目,改造分裂结构,优化导线排列,则导线的对地电容就会增大,从而获得大幅度提高输电的传输能力.高自然功率紧凑型线路就是依据这一原理而发展起来的一种崭新结构形式的线路.

2 紧凑型线路的电场强度

2.1 紧凑型线路电容与电场强度的关系

高自然功率紧凑型线路采用压缩相间距离加大分裂导线间间距和增加导线分裂数来增大导线对地电容,但必须满足其表面电场强度不超过容许的电场强度 E_{per} 为条件,而 E_{per} 也必须低于导线表面的电晕起始电场强度 E_{cor} . 子导线的各种排列都是力求电荷在子导线间能均匀分布,使每根子导线表面的最大电场强度 E_{max} 接近导线的允许场强 E_{per} . n 根分裂导线表面各点的场强是不同的,取其平均场强为 E_{ar} , $K = E_{\text{ar}}/E_{\text{per}}$ 称为利用系数.根据高斯定理:

$\oint_s E \cdot ds = q/\epsilon_0$, 导线单位长的电荷量为:

$$\begin{aligned} q &= \oint \epsilon_0 \cdot E \cdot ds = \epsilon_0 \sqrt{2} E_{\text{ar}} \cdot s \\ &= \epsilon_0 \sqrt{2} E_{\text{ar}} \cdot 2\pi r_0 n = 2\sqrt{2} \pi \epsilon_0 r_0 n K E_{\text{per}}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 ds 、 s 分别为导线的元面积和总面积.因此,导线单位长度的工作电容为:

$$\begin{aligned} C &= q/U_m = 2\sqrt{2} \pi \epsilon_0 r_0 n K E_{\text{per}} / \sqrt{2} U \\ &= 2\pi \epsilon_0 r_0 n K E_{\text{per}} / U \end{aligned} \quad (5)$$

式中, U_m 、 U 分别为相电压最大值和有效值; ϵ_0 为真空介电常数; r_0 为导线半径.

上式表明,随着分裂导线 n 数目的增加,电容 C 也随着增加,但要使导线表面场强均匀还得考虑导线的排列方式,使利用系数 K 增大尽可能接近于 1,才能得到导线最大的工作电容.为了增大 K ,每相导线就必须合理布置和进行优化设计.

2.2 分裂子导线的电场强度

分裂导线的结构,对子导线的电场强度影响很大.压缩相间距离,可以改变导线的对地电容,但引起导线表面场强的增加.又当子导线数增加时,导线表面场强可以减少.但子导线的间距增加时,其表面场强也会增加^[1,2].导线表面场强应受到导线表面电晕场强 E_{cor} 的限制.

$$E_{\text{cor}} = m \cdot 3.03 \times 10^2 \cdot \delta [1 + 0.298 / (r_0 \cdot \delta)^{1/2}]. \quad (6)$$

式中, m 为光滑系数,取 0.9; r_0 为导线半径(cm); δ 为空气相对密度, $\delta = 2.89 P / (273 + t)$; P 为大气压力(kPa); t 为空气温度($^{\circ}\text{C}$).

分裂导线的表面场强与单根导线表面场强不同,它不是一个恒定的值,而是一个很大范围内变化着的数值^[2].这是因为导线每一点的场强不仅由本导线电荷而且由其余分裂导线的电荷共同产生之故.在分裂导线束对称中心轴外侧的最远处,分裂导线表面场强最大,而在最靠近分裂导线束对称中心轴内侧附近最小.如果把所有电荷看作集中到导线中心线上,则其电场强度平均值为:

$$E_{ar}=1.47 C U_e/n r_0$$

式中, n 为分裂导线根数; C 为分裂导线工作电容; U_e 为额定电压。
分裂导线最大场强

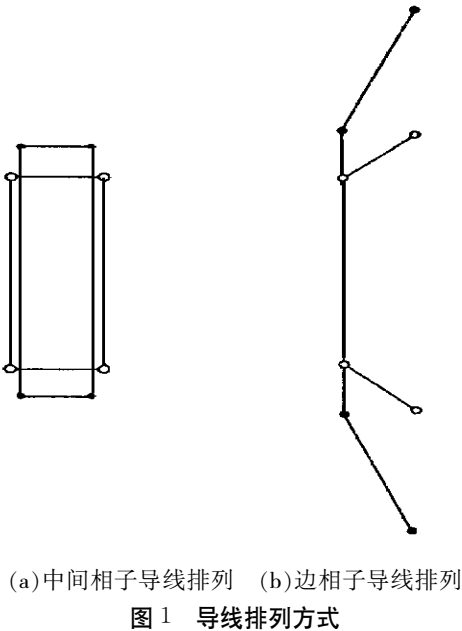
$$E_{max}=k_1 E_{ar}, k_1=1+B/A, A=a/r_0.$$

其中, k_1 为平均场强向最大场强的过渡系数; A 为分裂导线之间的相对距离; a 为相分裂线中心线之间距离; B 为对于相分裂导线不同根数有关常数, 如表 1。

表 1 与分裂子导线根数有关的常数

n	2	3	4	5	6	7	8	10
B	2.0	3.48	4.24	4.7	5.0	5.2	5.36	5.58

各场强存在 $E_{ar}<E_{max}<E_{per}\leqslant0.9 E_{cor}$ 的关系。从导线表面利用情况来看, 子导线表面最大场强都尽可能接近允许场强, 优化排列得好时都可达到 90% 以上。考虑杆塔和横担对场强的影响时, 计算将增加复杂性。因为当导线穿越地电位的杆塔和横担时, 将使导线场强发生畸变并使之增大 15%~20%。为使它们恢复到原定的计算数值, 应使杆塔近旁的子导线间距相应缩小, 而挡距中间部分的子导线距离则维持不变。这样每一个挡距之内, 子导线的距离在不断变动, 所以导线的悬挂方式也较为复杂。如图 1 所示的四分裂的一种排列方式。电压在 330kV, 相间距离从常规的 9m 缩减为 5.5m。图 1(a) 为中间相导线, 图 1(b) 为边相导线, 其中白点和黑点分别为靠近杆塔处和挡距中央导线排列方式。可以看出, 靠近杆塔的子导线间距要比挡距中央的明显小。



3 分裂导线的合理结构

以上分析可知, 紧凑型线路的一个主要问题, 就是选择适当的根数 n 和子导线的合理布置。布置方案的确定直接影响到导线表面场强、线路走廊、线路自然功率、无线电干扰强度和地面电场强度等诸多方面。但在初选方案时, 可以先计算在一定的布置方式下, 求得导线表面场强和线路的自然功率, 以此与常规线路作比较, 这两项指标选择合适后再用其它指标校验。从目前国内外研究来看, 已经取得了很多有价值的成果。

3.1 分裂导线的布置方式

分裂导线布置可以有对称式与不对称式。以六分裂为例, 对称式布置如图 2 所示的三角形布置。

这种布置与传统分裂导线差别不大, 国内外已有长期运行和维护经验。子导线的金具和固定方式都容易实现, 但在提高线路的自然功率的幅度受到一定限制。在子导线增加条件下, 若要提高场强的利用系数, 就得将各相子导线排列成不同的形状, 如成平面形、抛物线形或局部椭圆形, 而且相邻子导线的间距并非完全相同, 才能改善电场分布, 这就需要进行优化设计。图 3 为 500kV 六分裂不对称结构的一种布置形式。这种布置考虑到子导线的组合排列, 使每根子导

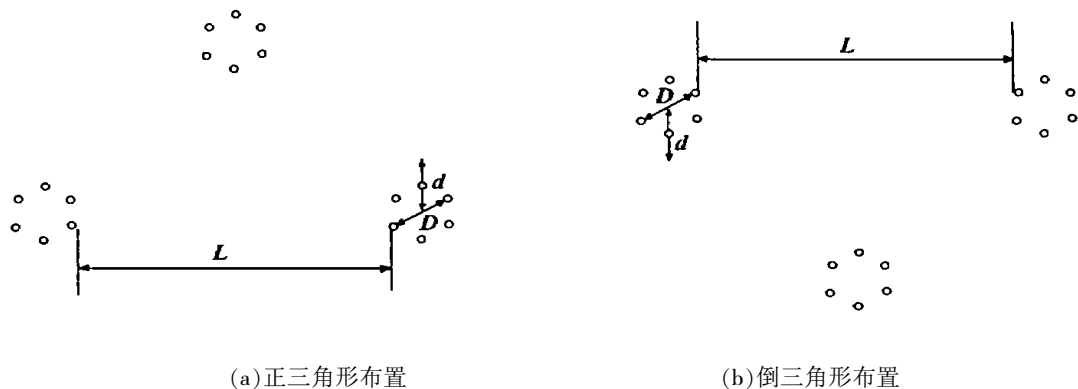


图 2 紧凑型线路对称布置

线表面的场强接近允许场强,使波阻抗成倍下降,从而使自然功率增幅非常显著.根据分裂计算可知,不对称布置排列组合提高输送功率比常规高出 50%~70%,而对称型排列只可能得到 20%~30%.

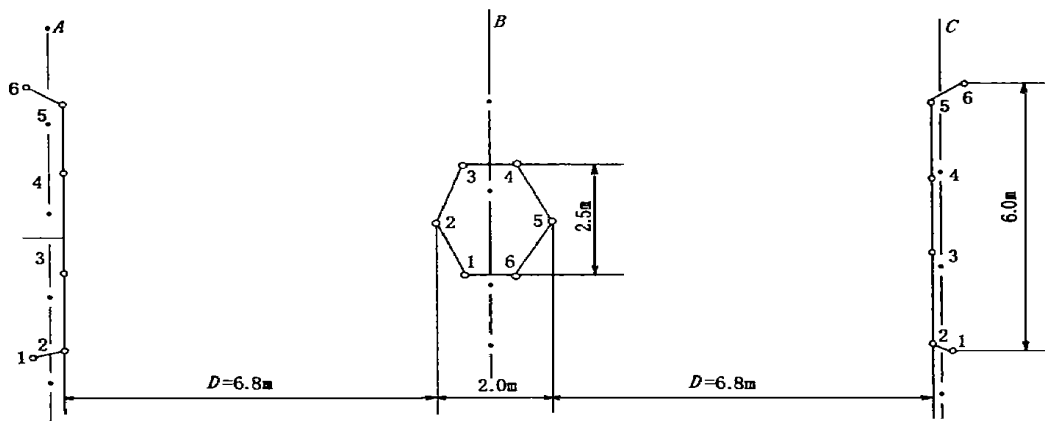


图 3 紧凑型线路不对称布置

3.2 紧凑型分裂子导线数目

从上面式(5)可知,子导线的分裂数目 n 会影响输电线路的工作电容,也即影响波阻抗 Z . 原则上来说,对于任意多根子导线,通过计算,总可寻找出一种排列方案,以使利用系数 $K \rightarrow 1$. 从原理上讲, n 值无限增大时, Z 值按反比无限减小,自然功率则无限增大. 实际上这是不可能的. 因为当 n 值增加太多时,为了满足最佳排列方案,每相子导线所占的尺寸过大,以致大于相间距离,这在结构上是不允许的,也是不合理的. 因此实际选取 n 值不能太多. 尽管进行了优化排列,自然功率上升也是会受到限制^[3]. 例如 500kV 紧凑型线路在不同 n 数目下进行优化排列得到分裂数目与自然功率的关系如表 2.

表 2 紧凑型线路中分裂数和自然功率关系

子分裂数 n	4	5	6	7	8	9
自然功率 $P(\text{MW})$	1533	1663	1760	1810	1840	1870

由此可见,随着子导线根数增加,自然功率随之增加,但在 $n=7$ 之后,增加的幅度就会降低.

4 有待深入探讨和解决的问题

高自然紧凑型输电线路的优点是很明显的.但为了更合理推广、采用和发挥这种新型的输电线路的作用,有下列问题有待深入探讨和解决.

a. 紧凑型输电线路是电力系统一个重要组成部分,在大幅度改变线路参数和性能同时,必须涉及到系统各个方面.如系统过电压水平,补偿调压措施,干扰噪声等.又当输送功率大幅增加时,势必减少输电的回路数,直接关系到电网的可靠性和稳定性.因此必须从电网的安全运行,技术经济合理综合考虑.

b. 为了实现导线的优化设置,子导线的排列呈椭圆型、抛物线形等,各个相邻子导线间的距离又有差异,而且沿线子导线间的距离也不相同,这就要求设计和制造多种新的特殊金具结构,必须满足子导线的固定和机械强度要求,而且还要保证金具处的场强不致高于电晕放电电压.

c. 缩小相间距离的重要措施是在挡距中间加绝缘间隔棒.要求间隔棒必须轻巧,固定方式可靠,污闪电压高,能耐受相间电压,并能承受压力、拉力和扭力的作用.因此研制各种材料的间隔棒是很重要的.虽然目前国内已试制了合成绝缘间隔棒,但仍需继续完善.

d. 要设计、制造新型的杆塔.常规线路与高自然功率紧凑型线路的杆塔有很大的区别.紧凑线路杆塔是造成封闭形的,三相导线被环抱在杆塔内部.由于传输功率的增长,子导线数比常规线路成倍增加,杆塔所受的负荷将会增加.因此杆塔设计应打破构架的传统结构形式来满足紧凑线路的电气和机械强度的要求.

e. 研制新型电抗器和限制过电压.高自然功率紧凑型线路导线的电容成倍增加,要求并联电抗器的补偿容量也随之增加.为使线路受端电压不致过高和减少功率损耗,并联电抗器最好做成可控式的.因为在超高压的线路上具有很大的充电电流,在电路自振频率和电源电压频率相近或相等的不利参数组合下,将会引起共振现象.或者同步电机的感抗与对称运行方式下的线路容抗成一定关系时,也会发生自励,其结果将使电网各点的电压升高.电抗器做成自动控制方式,可以更有效地限制过电压.

5 结论

从当前我国电力发展趋势,大容量电站和远距离输电线路的建设正呈突飞猛进之势,推广和采用高自然功率紧凑型线路在技术和经济上都是合适的.在解决上述问题的基础上,选用合适的分裂导线数值,通过组合排列,得到最佳的形状,有效地利用导线表面和导线截面,是改善和提高我国输电系统传输容量一个可行的途径.

参 考 文 献

- 1 邵方殷.500kV 紧凑型线路导线结构的选型和有关特性.中国电力,1996,(10):3~5
- 2 马为民等.500kV 高自然功率紧凑型线路的功率特性.高电压技术.1994,(4):11~14
- 3 叶米里尼科夫.230~500kV 架空输电线路电气部分设计.北京:水利电力出版社,1977.76~78,81~85

A New Type of Transmission Line—Compact Line of High Natural Power

Liu Jinming Chen Shaohua Li Rilong

Dept. of Electric Engineering and Automation, GDUT, Guangzhou, 510090

Abstract This paper introduces the principle of improving transmission capacity with compact transmission line. Relationship among on the field strength on compact transmission line, bundle conductor configuration and natural power is discussed. The related problems are proposed for further discussion.

Key words compact transmission line; field strength; natural power; bundle conductor configuration

(上接第 10 页)

3 Z Lewandowski, S S Miller, E Zlotkiewicz. Generating functions for some classes of univalent functions. Proc. Amer. Math. Soc, 1976, 56: 117~111

4 Yang Diggong. One couex functions wish missing coefficients. 苏州大学学报, 1990, (2): 124~130

One Class Special SPread Regular Univalent Functions

Tian Feng

Dept. of Mathematics and Physics, GDUT, Guangzhou, 510090

Abstract The paper drew up one class special spread ρ level α -convex functions and ρ level θ -spiral functions. Their subordinate relations and other properties are proved.

Key words regular univalent functions; star functions; convex functions; spiral functions; subordinate functions