

高自然功率紧凑型输电线路电容效应探讨

李 雄刚, 李 日 隆

(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510090)

摘要: 紧凑型线路是当前输电线路发展的一个新趋势。本文针对高自然功率紧凑型的特点, 结合电工理论分析高自然功率紧凑型线路能提高输电传输容量的机理, 探讨了导线电容的数学模型, 通过提高导线的对地电容, 减少导线的波阻抗, 为提高输电线的传输功率提供理论基础。

关键词: 紧凑型线路; 高自然功率; 传输功率; 电容

中图分类号: TM726. 1; TM722

文献标识码: A

文章编号: 1007-7162(2004)01-0017-05

世界各国的电网发展趋势是: 网容(装机容量)和网距(供电面积)越来越大, 因此交流输电线路的传输容量也越来越大, 传输的距离也越来越远。迄今为止, 提高线路的输电能力的措施主要是采用补偿理论。如应用串联电容补偿线路电抗, 设置同步调相机或静止补偿器来保证在负荷增加时, 使功率达到平衡。然而, 这些技术并不能使线路传输能力得到明显的提高。各国实际上都是采用多回线路来提高输电能力。但是线路造价昂贵, 且由于空间越来越密集, 线路架设往往遇到难以解决的障碍。随着电力生产发展, 世界各国正在研究更有效地利用线路走廊面积, 提高线路的输电能力。普遍认为, 如果能提高线路的自然功率, 相应的线路传输容量就会得到提高。为此提高线路的相间电容和相对地电容是关键。就这个理论问题, 我们从自然功率的基本概念进行有益的探讨。

1 自然功率与线路的输电容量

三相输电线路, 设其一相输电线路的分布参数如图 1 所示。 Z_e 和 Z_2 分别为线路和负荷的复阻抗, 负荷吸收的平均功率为

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \phi_2, \quad (1)$$

式中, I_2 为负荷电流有效值; ϕ_2 为负荷复阻抗幅角; U_2 为负荷电压有效值, $U_2 = |U_2| = |U_{2\lambda} + KU_{2\lambda}|$, 其中 K 为输电线终端反射系数, $K = \frac{Z_2 - Z_e}{Z_2 + Z_e}$ 。所以

$$P_2 = \frac{|U_{2\lambda} + KU_{2\lambda}|^2}{|Z_2|} \cos \phi_2 = \frac{|U_{2\lambda}|^2 |1 + K|^2}{|Z_2|} \cos \phi_2 = \frac{|U_{2\lambda}|^2}{|Z_e|} \cdot \frac{|Z_e|^2}{|Z_2|} \cdot |1 + K|^2 \cos \phi_2,$$

式中 $Z_2 = |Z_2| e^{j\phi_2}$; $Z_e = |Z_e| e^{j0}$ 。令 $\frac{|U_{2\lambda}|^2}{|Z_e|} = P_s$; $\frac{Z_e}{Z_2} = \frac{|Z_e|}{|Z_2|} e^{j(\theta - \phi_2)} = m e^{j\phi}$, 则

$$P_2 = P_s \left| \frac{1 - K}{1 + K} \right| \cdot |1 + K|^2 \cos \phi_2 = P_s |1 - K| \cdot |1 + K| \cos \phi_2 =$$

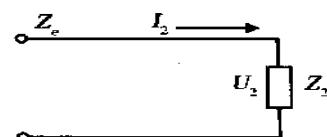


图 1 一相输电线路长线模型

收稿日期: 2002-12-27

作者简介: 李雄刚(1973), 男, 硕士研究生, 工程师, 在省电力调度中心从事电力调度工作, 主要研究方向为电力系统分析及安全控制。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. [http://www.](http://www)

$$P_s \left| 1 - \frac{1 - me^{j\phi}}{1 + me^{j\phi}} \right| \cdot \left| 1 + \frac{1 - me^{j\phi}}{1 + me^{j\phi}} \right| \cos \phi_2 = P_s \frac{4}{m + \frac{1}{m} + 2 \cos \phi} \cos \phi_2. \quad (2)$$

上式表明输电线路所传输的平均功率, 其大小与负荷的阻抗参数有关. 当 $m = 1$ 时, ($m + \frac{1}{m}$) 有最小值, 则

$$P_{2\max} = P_s \frac{2}{1 + \cos \phi} \cos \phi_2. \quad (3)$$

$m = 1$ 的条件表明, 负荷阻抗角 ϕ_2 为常量, 阻抗模 $|Z_2|$ 与线路波阻抗模 $|Z_c|$ 相等, 叫做共模匹配.

将式(3)写成 $P_{2\max} = N \cdot P_s$, 式中

$$N = \frac{2}{1 + \cos \phi} \cos \phi_2. \quad (4)$$

考虑 ϕ_2 的改变, 对 N 求极大值

$$N = \frac{2 \cos \phi_2}{1 + \cos(\theta - \phi_2)} = \frac{2}{\frac{1}{\cos \phi_2} + \cos \theta + \sin \theta \cdot \operatorname{tg} \phi_2},$$

令分母对 ϕ_2 的系数等于 0, 得 $\frac{\sin \phi_2}{\cos^2 \phi_2} + \frac{\sin \theta}{\cos^2 \phi_2} = 0$.

N 等于极大值的条件是: 负荷阻抗角的大小等于波阻抗幅角 θ , 但符号相反. 即 $\phi_2 = -\theta$, N 的极大值为 $N_{\max} = N|_{\phi_2 = -\theta} = \frac{1}{\cos \theta}$, 则 $P_{2\max} = N_{\max} \cdot P_s = \frac{P_s}{\cos \theta}$.

当考虑高压架空线路近似于无损耗线时, 波阻抗角 $\theta = 0$, 则

$$P_{2\max} = P_s = U_2 I_2. \quad (5)$$

上式表示, 当终端负荷阻抗等于线路特征阻抗时, 反射系数 $K = 0$, 线路能量损失小, 由入射波所携带之能量均为负荷所吸收, 因而其传输之功率及输电效率都较大. 这就是常说的自然功率. 也就是说, 若能提高线路的自然功率就能提高线路的输电能力.

2 紧凑型线路的电容计算模型

2.1 传输功率与导体电容的关系

对于高压输电线路, 最适宜的传输功率应接近线路的自然功率. 将线路的相间距离紧凑, 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_s 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 $V = (LC)^{-\frac{1}{2}}$, 则有:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\sqrt{LC}}{C} = \frac{1}{CV} \quad (6)$$

$$P_s = \frac{3U_2}{Z} = 3CVU^2. \quad (7)$$

由此可知, Z 与 C 成反比, 在既定额定电压 U 下, P_s 与 C 成正比, 所以 C 的增大, 同样可以使 P_s 值按相应的倍数增大.

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。三相对称布置时, 每相导线对地电容为

$$C = \frac{0.024}{\lg(D/r_0)} \mu\text{F}/\text{km}. \quad (8)$$

式中, D 为相间距离, r_0 为导线半径。

式(8)可见, 减少相间距离或增大导线半径就会使导线的对地电容增大。但常规线路在改变这两个参数时, 导线对地电容的增加不大, 最多增大 15% ~ 20%。要进一步增加电容, 必须采取适当排列的多分裂导线。但目前常规的做法是: 220 kV 导线为 1 根, 330 kV 为 2 根, 500 kV 为 4 根。如果能突破传统的设计原则, 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能力。这就是目前世界各国都在研究高自然功率的紧凑型线路的原因。

2.2 线路电容计算的数学模型

常规结构的高压输电线路的分裂导线, 基本上是按正多边形排列, 且分裂间距较小。若作适当简化, 可直接用等值半径的方法计算分裂导线中的电容。但对于高自然功率紧凑型线路来说, 情况就有所不同。其分裂子导线排列通常是不规则的, 且分裂间距较大, 若采用等值半径的近似方法来计算, 误差会较大。因此只能用分裂导线逐根合并的方法来进行计算。

对于一多导线系统, 有如下的关系式:

$$\mathbf{U} = \mathbf{PQ}, \quad (9)$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{U} = \mathbf{CU}. \quad (10)$$

其中 \mathbf{Q} 为导线电荷矩阵, \mathbf{P} 为电流系数矩阵, \mathbf{C} 为电容系数矩阵。 \mathbf{P} 和 \mathbf{C} 都是对角矩阵。

设三相水平排列的输电线, 包括地线在内共有 5 条导线组成。已知地线具有地电位。按式(9), 导线和地线的矩阵块为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{LL} \\ \mathbf{U}_{TT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{LL} & \mathbf{P}_{LT} \\ \mathbf{P}_{TL} & \mathbf{P}_{TT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{LL} \\ \mathbf{Q}_{TT} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

已知地线接地, $\mathbf{U}_{TT} = 0$, 且有

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{LL} \\ \mathbf{Q}_{TT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{LL} & \mathbf{C}_{LT} \\ \mathbf{C}_{TL} & \mathbf{C}_{TT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{LL} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

将式(11)展开,

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{LL} = \mathbf{P}_{LL}\mathbf{Q}_{LL} + \mathbf{P}_{LT}\mathbf{Q}_{TT}, \\ 0 = \mathbf{P}_{TL}\mathbf{Q}_{LL} + \mathbf{P}_{TT}\mathbf{Q}_{TT}. \end{cases} \quad (13)$$

于是有 $\mathbf{Q}_{TT} = -\mathbf{P}_{TT}^{-1}\mathbf{P}_{TL}\mathbf{Q}_{LL}$, $\mathbf{U}_{LL} = (\mathbf{P}_{LL} - \mathbf{P}_{LT}\mathbf{P}_{TT}^{-1}\mathbf{P}_{TL})\mathbf{Q}_{LL}$ 。令

$$\mathbf{P}_e = \mathbf{P}_{LL} - \mathbf{P}_{LT}\mathbf{P}_{TT}^{-1}\mathbf{P}_{TL}; \quad \mathbf{U}_{LL} = \mathbf{P}_e\mathbf{Q}_{LL}, \quad (14)$$

由式(12)得,

$$\mathbf{Q}_{LL} = \mathbf{C}_{LL}\mathbf{U}_{LL}. \quad (15)$$

比较式(14)和(15), 得

$$\mathbf{C}_{LL} = \mathbf{P}_e^{-1}. \quad (16)$$

\mathbf{C}_{LL} 就是消去地线后求得的线路电容矩阵。

对于每相有分裂的导线, 也可将每相分裂导线合并成为具有等值半径的单根导线, 使之具

有等效的电气性能。通常将每相的每根子导线逐一个合并进而得到一个等效的相参数。以三相四分裂为例。假设属于 A 相的四根子导线 i、j、m、n，根据上述消去架空地线的方法逐一求出 Q_i 、 Q_j 、 Q_m 、 Q_n 。再求 A 的等值电容参数，此时必须满足以下两个条件：(1) 该相等值的导线的电荷应等于各分裂导线的电荷之和，即 $Q_A = Q_i + Q_j + Q_m + Q_n$ ；(2) 该相各分裂子导线具有相同的电位，即 $U_A = U_i = U_j = U_m = U_n$ 。

将 A 相的各子导线通过矩阵变换求得 Q_A 之后，同理也将 B、C 相的分裂子导线合并，最后得到下列矩阵表达式：

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & P_{ac} \\ P_{ba} & P_{bb} & P_{bc} \\ P_{ca} & P_{cb} & P_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_A \\ Q_B \\ Q_C \end{bmatrix}. \quad (17)$$

由以上矩阵，就可以方便求得各相电容参数，取平均值作正序电容：

$$C = 1/3(C_A + C_B + C_C). \quad (18)$$

由式(6)和(7)分别求出波阻抗和自然功率。

2.3 线路电容计算实例

利用以上方法，对以下几种结构方式的 220 kV 线路进行计算，结果如表 1。

3 紧凑型线路的电场强度

高自然功率紧凑型线路是采用压缩相间距离加大分裂导线间间距和增加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} 接近导线的容许场强 E_{per} 。n 根分裂导线表面各点的电场

表 1 线路电容计算实例

导线排列方式	导线结构示意图	导线型号	相间距离 / m	正序电容 / ($\mu\text{F}\cdot\text{km}^{-1}$)	波阻抗 / Ω	自然功率 / MW
二分裂水平		2 × LGJ-300	3.75	0.012	285	170
四分裂倒三角形		4 × LGJ-150	3.0	0.02	168	289
四分裂垂直形		4 × LGJ-150	3.0	0.0202	170	285

强度是不同的, 取其平均场强为 E_{av} , $K = E_{av}/E_{per}$ 称利用系数。根据高斯定理: $\oint_s = E \cdot ds = q/\infty$, 导线单位长度的工作电容为

$$C = q/U_m = 2\sqrt{2}\pi\epsilon_0 r_0 n K E_{per}/\sqrt{2}U = 2\pi\epsilon_0 r_0 K E_{per}/U, \quad (19)$$

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 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 1, 才能得到导线最大的工作电容。

4 结语

从当前我国电力发展的趋势, 大容量电站和高压输电的建设正呈突飞猛进之势。为减少输电线路的占地面积, 降低单位容量的线路造价, 高自然功率紧凑型线路被认为是未来发展的方向。本文从理论上分析提高自然功率就可以提高输电线的输电容量。要减少线路波阻抗关键在于增大导线对地电容。为此, 合理选择导线的结构方式, 导线的分裂根数, 各相子导线的优化排列形状, 就能改善电场分布, 使导线表面场强均匀, 达到提高导线对地电容增大的目的。

参考文献:

- [1] 王先冲. 电磁场理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [2] 格·尼·阿力克山大罗夫. 超高压送电线路设计 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [3] 邵方殷. 500 kV 紧凑型线路导线的选型和有关特性 [J]. 中国电力, 1996, (10): 3-7.
- [4] 傅霞飞. 紧凑型输电线路的理论与实践 [J]. 电力技术, 1992, (2): 43-48.

Technology Research for Large Surge impedance Loading Power Compact Type Transmission with Capacitance Application

LI Xiong-gang, LI Rui-long

(Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)

Abstract: The compact transmission line is a new tendency of the development of power transmission. Based on the electrical theory, this paper introduces the principle of improving the transmission capacity with the compact line of large surge-impedance loading power. The mathematical model of the conductor capacitance is also discussed. By means of raising the capacitance to the ground of the conductors and reducing the wave impedance of the conductors, the basic theory for raising transmission power of the transmission line is proposed.

Key words: compact line; large surge-impedance loading power; transmission power; capacitance