

⑤:
21-23

输电线路的自然功率原理

哈尔滨工业大学 刘润 张彤 TM726

【摘要】 应用自然功率的概念, 从理论上讨论了提高架空线输电能力的问题, 证明了负荷获得最大功率的条件, 分析了自然功率与线路结构参数的关系, 论证了相间紧凑型分裂导线是提高输电能力的基本方向。

【关键词】 输电能力, 自然功率, 负载, 紧凑型分裂导线, 输电线路

迄今, 提高架空线路输电能力的措施主要基于补偿理论, 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电容器来保证在负荷增长时, 使无功功率达到平衡。然而, 这些技术并不能使线路输电能力得到显著提高。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于解决的障碍。

80年代起, 世界上一些国家(如前苏联、美国、日本、加拿大、芬兰)对如何提高线路输电能力问题, 从理论和技术方面进行了研究, 认为应以提高线路自然功率作为提高其输电能力的基本方向。本文则应用自然功率的概念, 从理论上对线路输电能力进行分析和论证。

1 负荷与自然功率的关系

设一相输电线路的分布参数长线模型如图1所示, Z_L 为负载复阻抗。现分析其平均负荷与自然功率的关系及其获得最大功率的条件。

复阻抗 Z_L 所吸收的平均功率为,

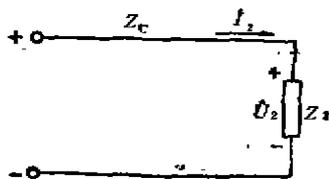


图1 一相输电线路的长线模型

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

式中 U_2 —— 负载电压有效值

$$U_2 = |\dot{U}_2| = |\dot{U}_{2\lambda} + k\dot{U}_{1\lambda}|$$

$$\dot{U}_{1\lambda} \text{ —— 终端入射波电压相量}$$

k —— 输电线路终端反射系数;
 I_2 —— 负载电流有效值;
 φ_2 —— 负载复阻抗幅角。

所以

$$P_2 = \frac{|\dot{U}_{2\lambda} + k\dot{U}_{1\lambda}|^2}{|Z_L|} \cos \varphi_2$$

$$= \frac{|\dot{U}_{2\lambda}|^2 \cdot |1+k|^2}{|Z_L|} \cos \varphi_2$$

$$= \frac{|\dot{U}_{2\lambda}|^2}{|Z_c|} \cdot \frac{|Z_c|}{|Z_L|} \cdot |1+k|^2 \cos \varphi_2$$

式中 $Z_L = |Z_L| e^{j\varphi}$

Z_c —— 输电线路复波阻抗

$$Z_c = |Z_c| e^{j\theta}$$

令

$$\frac{|\dot{U}_{2\lambda}|^2}{|Z_c|} = P$$

$$k = \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c}$$

$$\frac{Z_c}{Z_L} = \frac{|Z_c|}{|Z_L|} e^{j(\theta - \varphi)} = me^{j\psi}$$

则有

$$P_2 = P \cdot \left| \frac{1-k}{1+k} \right| \cdot |1+k|^2 \cos \varphi_2$$

$$= P \cdot |1-k| \cdot |1+k| \cos \varphi_2$$

$$= P \cdot \left| 1 - \frac{1-me^{j\psi}}{1+me^{j\psi}} \right| \cdot \left| 1 + \frac{1-me^{j\psi}}{1+me^{j\psi}} \right| \cos \varphi_2$$

$$= P \cdot \left| \frac{2m}{e^{-j\psi} + m} \right| \cdot \left| \frac{2e^{-j\psi}}{e^{-j\psi} + m} \right| \cos \varphi_2$$

$$= P_s \frac{4m}{(m + \cos\varphi)^2 + \sin^2\varphi} \cos\varphi_2$$

$$= P_s \frac{4}{m + \frac{1}{m} + 2\cos\varphi} \cos\varphi_2 \quad (1)$$

式中 P_s ——视在自然功率，

$$m = |Z_c| / |Z_s|;$$

$$\varphi = (\theta - \varphi_2);$$

θ ——复波阻抗 Z_c 的幅角。

上式即为输电线路所传输的平均功率，其大小与负载的阻抗参数有关。当 $m=1$ 时，

$(m + \frac{1}{m})$ 有最小值，将此条件代入式 (1) 可

以得到 P_2 的最大值如下：

$$P_{2max} = P_s |_{m=1}$$

$$= P_s \frac{2}{1 + \cos\varphi} \cos\varphi_2 \quad (2)$$

$m=1$ 的条件表明，负载阻抗角 φ_2 为常量，只是令阻抗模 $|Z_s|$ 与线路波阻抗模 $|Z_c|$ 相等，此条件叫做共模匹配。在式 (1)、(2) 中， P_s 体现了线路对传输功率的影响。

根据分布参数电路理论，在负载端接处的电压和电流与入射波、反射波有如下关系，

$$Z_c \dot{I}_s = \dot{U}_{s,\lambda} - \dot{U}_{s,r}$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_{s,\lambda} + \dot{U}_{s,r}$$

$$\therefore \dot{U}_2 + Z_c \dot{I}_s = 2\dot{U}_{s,\lambda} \quad (3)$$

式中 $\dot{U}_{s,r}$ ——终端反射波电压相量。

根据式 (3)，在负载端接处可将输电线路用集总参数电路等效，如图 2 所示。此等效电路说明输电线路对负载的作用相当于电源，电源电压为入射波 $\dot{U}_{s,\lambda}$ 电压的两倍，线路的波阻抗 Z_c 相当于电源的内阻抗。

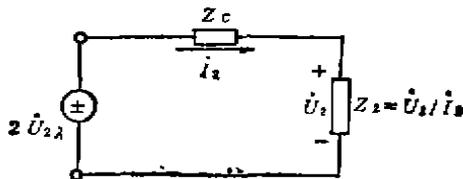


图 2 负载端接处集总参数等效电路

因此，负载 Z_2 所吸收的平均功率为

$$P_2 = |Z_2| \cos\varphi_2 |\dot{I}_2|^2$$

$$= (|Z_2| \cos\varphi_2) \cdot (4|\dot{U}_{s,\lambda}|^2) / (|Z_c|^2)$$

$$+ |Z_s|^2 + 2|Z_c| \cdot |Z_2| \cos\varphi)$$

$$= \frac{4|\dot{U}_{s,\lambda}|^2}{\frac{|Z_c|^2}{|Z_2|} + |Z_s|^2 + 2|Z_c| \cos\varphi} \cos\varphi_2$$

对 $|Z_2|$ 求导，得到 P_2 获极大值的条件为

$$|Z_s| = |Z_2|$$

也即 $m=1$

则有

$$P_2 |_{m=1} = P_s \frac{2}{1 + \cos\varphi} \cos\varphi_2 \quad (4)$$

得到与式 (2) 完全相同的结果。

现将式 (2) 写成如下形式

$$P_2 |_{m=1} = K P_s \quad (5)$$

式中 $K = \frac{2}{1 + \cos\varphi} \cos\varphi_2$

考虑 φ 改变，对 K 求极大值

$$K = \frac{2\cos\varphi_2}{1 + \cos(\theta - \varphi_2)}$$

$$= \frac{2}{\frac{1}{\cos\varphi_2} + \cos\theta + \sin\theta \cdot \text{tg}\varphi_2}$$

令分母对 φ_2 的导数等于零，得

$$\frac{\sin\varphi_2}{\cos^2\varphi_2} + \frac{\sin\theta}{\cos^2\varphi_2} = 0$$

根据上式得出 K 等于极大值的条件是：负载阻抗角的大小等于波阻抗幅角 θ ，但符号相反，即 $\varphi_2 = -\theta$ 。 K 的极大值为

$$K_{max} = K |_{\varphi_2 = -\theta} = \frac{1}{\cos\theta} \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (5) 得到

$$P_2 = K_{max} \cdot P_s = \frac{P_s}{\cos\theta} = \frac{|\dot{U}_{s,\lambda}|^2}{|Z_c| \cos\theta} \quad (7)$$

式中 P_s ——输电线路的自然功率。

式 (7) 成立的条件为

$$\begin{cases} |Z_2| = |Z_c| \\ \varphi_2 = -\theta \end{cases} \quad (8)$$

此条件叫做共轭匹配。

如果考虑高压架空线路近似于无损线，波阻抗幅角 $\theta = 0^\circ$ ，则

$$P_2 = P_s = \frac{|\dot{U}_{s,\lambda}|^2}{|Z_c|} = U_s I_s = U_2 I_2 \quad (9)$$

式中 U_0 ——负载相电压，
 I_0 ——负载相电流。

式(9)说明，提高输电线路的自然功率对提高传输功率有重要意义。

2 自然功率与线路结构参数关系

设输电线为分裂导线结构，每相分裂导线由 n 根子导线组成，每根子导线的半径为 r_0 ，线路的自然功率为：

$$P_n = U_0 I_0$$

$$\begin{aligned} \text{而 } I_0 &= \frac{U_0}{\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}} = \frac{U_0}{U_0 C_0} = U_0 C_0 U_0 \\ &= q_0 U_0 = n q_0 U_0 \\ &= n \cdot 2\pi r_0 \varepsilon_0 E_0 U_0 \end{aligned}$$

式中 L_0 ——线路单位长度电感；
 C_0 ——线路单位长度电容；
 U_0 ——相位速度， $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ；
 n ——导线的分裂根数；
 q_0 ——单位长度导线表面电荷；
 r_0 ——子导线半径；
 ε_0 ——空气介电常数， $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ；
 E_0 ——导体表面的平均电场强度。

$$\therefore I_0 = \frac{n r_0 E_0}{60} \quad (10)$$

$$\text{而 } I_0 = \pi r_0 j n$$

式中 j ——导体经济电流密度， $1 \sim 2 \text{ A/mm}^2$

$$\text{则 } n \pi r_0 j = \frac{n r_0 E_0}{60}$$

$$\therefore j = 0.00531 \frac{E_0}{r_0} \quad (11)$$

当 r_0 减小时 E_0 增大，受电晕的限制。由式(11)知， E_0 和 r_0 的比值取决于电晕密度 j ，所以相电流 I_0 依式(10)随 n 的增加而增加。因此，提高自然功率可以通过增加导线的分裂根数 n 实现，即

$$P_n = U_0 I_0 = \frac{n r_0 E_0 U_0}{60} \quad (12)$$

3 相间紧凑型分裂导线

由于式(12)没有考虑导体间的静电感应作用，所以实际上自然功率不是随 n 而成比例增加。根据多导体间的电磁作用，分裂导线的每单位长度电容可依下式考虑：

$$C_0 = \frac{0.02413}{\lg \frac{D}{r_0}} \mu\text{F/km} \quad (13)$$

每单位长度电感为：

$$L_0 = 0.4605 \lg \frac{D}{r_0} \text{ mH/km} \quad (14)$$

式中 D ——分裂导线相间中心距离；
 r_0 ——分裂导线的等效半径。

式(10)的实质是当电压一定时，降低波阻抗，电流 I_0 增加，从而使自然功率 P_n 提高。式(13)、(14)说明，减小相间距离 D ，增加分裂半径 r_0 ，波阻抗 Z_0 可以降低。具有这种特点的分裂导线叫做相间紧凑型分裂导线。

按照电气法规，相间气隙距离按 1.8 倍过电压设计已达到要求^[1]。风力引起的导线摆
(下转第 61 页)

现行结构和相间紧凑型结构线路的波阻抗和自然功率比较表

电压(kV)	35				110				220			
	3		0.5		4		1.4		5		2.5	
$D(m)$	Z_0	P_n										
n	(Ω)	(MW)										
1	400	3.1	290	4.3	390	31	350	35	390	125		
4	130	9.2	80	15	150	79	100	120	160	300	130	370