

— 1000kV 交流架空线路
— 1000kV 交流架空线路

交流架空线路

新型输电技术



● 国家电网公司武汉高压研究所 易 辉
● 山西省电力公司 纪建民

编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn



第一章 概 论

在超特高压输电领域,采用交流或直流的传输方式,到底谁更经济、安全、可靠,世界各国电力工作者一直存有不同的观点,也是不同学派长期争论的焦点之一。但是从世界各国电力传输网络的基本情况来看,当前以及今后,三相交流输电仍将是输电和联网的主要方式。

仅根据功率的计算公式 $P = UI = U^2/Z$ 看,为增加线路输送能力,通常采用的方法不外乎是提高线路的输电电压或者输电电流。

20 世纪 70 年代以前,主要靠提高输电电压来增加线路的传输能力。到目前为止,全世界已经有 12 个国家建成了 800kV 等级的交流输电系统。前苏联、日本、美国、意大利、瑞典等国都曾执行过特高压(1000kV 及以上)输电计划,我国国家电网公司也已将特高压输电提上了议事日程。虽然提高输电电压能大幅度地提高线路传输的功率、减少系统的短路容量并且能改善线路的静态稳定性,但是,随着输电电压的提高,牵涉到绝缘尺寸的增加以及相应输变电设备制造等一系列的问题,且在负荷尚不是足够大的地区,可能不会考虑采用特高压输电。所以,目前交流输电发展的一个重要分支是考虑采用其他新技术提高线路输送能力、提高线路的使用效率和线路走廊利用率等。另外,随着各国对环保的要求越来越严格及线路走廊的征地费用的增加等问题的突出,如何使电网更加有效、如何提高输电线路的使用效率已成为世界各国研究的重要课题。

本书所分析介绍的四种新型交流架空输电技术中,采用大截面导线和耐热导线的输电线路是从提高线路的输电电流考虑,紧凑型线路是从提高线路的自然功率考虑,同塔多回输电线路是从



提高单位走廊输送容量考虑。

紧凑型输电技术是通过导线的优化排列，将三相导线置于同一塔窗内，三相导线间无接地构件，达到提高自然输送功率，减少线路走廊宽度，大大提高单位走廊输电容量的新型架空送电技术。与常规线路相比，紧凑型输电线路具有高自然传输功率、低不平衡度的优点，能较好地解决线路走廊紧张，传输容量需求大的矛盾。

大截面导线输电技术是指超过经济电流密度所控制的常规的最小截面导线，而采用较大截面的导线，以成倍提高线路输送能力的新型输电技术。采用大截面导线不仅能大大提高线路的输送功率，减少线路走廊数；而且由于减小了导线的电阻，线路损耗大大降低，而且由于导线表面电场强度降低，电晕损失也相应减小。另外，对于超高压和特高压，还能大大减小其无线电干扰和噪声污染。

耐热导线输电技术是指采用耐热导线，提高导线允许温度，增加导线输送电流，从而提高线路输送容量的新型输电技术。耐热导线输电技术的优势在于对输电线路的各个环节并没有太大影响。既没有增加杆塔、绝缘子及金具所承受的荷载，也没有影响线路绝缘与无功补偿。与常规型线路相比，只是将普通导线换为耐热型导线，除线路导线电阻略有增大，弧垂有所增加外，对输电线路基本没有任何不良影响。

同塔多回输电技术是指在同一杆塔上并架多回输电线路，从而压缩线路走廊占地并提高其单位走廊输电能力的新型输电技术。同塔双回代替2个单回，走廊宽度可缩小一半，这对于土地昂贵、走廊紧缺的地区，具有明显的经济效益和社会效益。

第一节 交流输电线路的输电能力

架空输电线路可视为一个伸长的三相载流导体，它产生的电场与磁场对其本身及周围发生效应。一般情况下，输电线路的电



压变化有限，线路的静电场也随之变化不大。但随线路中电流的变化，导线周围的磁场会在很大的范围内变化。这一情况就决定了交流输电的工作特点及其相应的调控线路工作状况的措施。

所谓输电系统的输电能力，是指线路在连续运行的情况下其限制条件不变时的送端允许通过的有功功率值。而最大传输功率则随线路传输功率的不同状态有着较大差异。

一、常规线路的输送容量和输送距离

一般而言，对于输送距离较短的线路，其输电容量由导线允许发热条件确定，对长距离、重负荷线路，则由安全稳定条件确定。对于向某一负荷点供电的线路，常按允许电压降来确定其输电容量。目前，500~750kV线路的输送能力决定于稳定条件；110kV线路决定于导线的允许发热；220~330kV线路既受控于稳定，也应考虑导线的发热。对于现有的长距离满负荷的线路，限制通流容量的条件是受端变电所母线允许的电压降。但是安装补偿设备就可以不再受限制，因此此种情况不具有代表性。

任何线路的长期允许发热电流由导线的型号和截面（或者是接入线路断开处的设备元件）决定，而实际上既与送电线路的具体特点无关，又与其在网络接线中所处位置无关。与此不同，按稳定条件决定的输送容量极限本质上与线路自身的参数和其他许多条件，如所研究的网络段接线、与其连接网的接线和状态、发电厂间重新分配容量措施等有关，具有相同参数的两条线路稳定极限可能完全不同。

现代电力系统的特点是网络结构复杂及各枢纽间有多条联络线（通常情况下额定电压不同），而各条线路独自运行稳定极限不足以说明整个网络的输送能力。电网的输送能力是指所研究断面处联系两部分系统的全部线路的稳定极限，即所有线路在稳定极限状态下潮流的总和。电网的稳定极限总是小于各条线路极限（决定某条线时假定其他联络线断开）的总和，其差别可能会很大，甚至达到50%。

考虑上述特点，表1-1列出了超、特高压输电按静稳定条件



的输送能力。表 1-1 中给出的不是极限值, 而仅作为代表超、特高压远距离送电线路与较低网络并联运行的主要段 (如电压 330kV 长为 200~300km, 电压 500 长为 300~400km, 750~1150kV 长为 400~500km) 的例子。

表 1-1 超、特高压输电按静稳定条件的输送能力

额定电压 (kV)	长度 (km)	导线根数 和截面 (mm ²)	自然功率 P_H (MW)	输送能力			
				按发热 ^①		按稳定	
				功率 (MW)	为 P_H 倍数	功率 (MW)	为 P_H 倍数
330	200~300	2×300	350	760	2.2	800	2.3
500	300~400	4×300	900	1740	1.9	1350	1.5
750	400~500	5×300	2100	4600	2.1	2500	1.2
1150	400~500	8×300	5300	11000	2.1	4500	0.85

① 按发热所允许的输送功率相应于最小导线截面。

由上述可知, 决定各电压等级输电线路的输电容量是极其困难的, 即没有一一对应的关系。但是在制定电力传输线路规划时, 又必须有输电容量的指标。

根据电路和电力系统方面的知识, 在设计 35~500kV 的高压线路时, 作为原始数据, 常有负载功率、用户离电源的距离、电网额定电压以及经济电流密度等。假设线路首端的电压等于电网最高运行电压 $U_1 = U_{ph,m}$, 而末端线路的负载具有给定的功率 $S = 3U_{ph,H}I = 3U_{ph,H}FJ$, 线路等值接线图中的电阻为单位长度的电阻与线路长度的乘积 (线路长度小于 300km 时, 与精确值的偏差为 3%~5%), 可得出以下公式

$$I = \frac{U_{ph,N}}{U_2} FJ \cos\varphi (1 - j \tan\varphi_0) \quad (1-1)$$

$$\frac{U_2}{U_{ph,m}} = \left[0.5 - \frac{U_{ph,N}}{U_{ph,m}} g \frac{J \cos\varphi}{U_{ph,m}} \left(\rho + \frac{\omega}{v_B} Z_B F \tan\varphi_0 \right) + \sqrt{0.25 - \frac{U_{ph,N}}{U_{ph,m}} g \frac{J \cos\varphi}{U_{ph,m}} \left(\rho + \frac{\omega}{v_B} Z_B F \tan\varphi_0 \right) - \left(\frac{U_{ph,N}}{U_{ph,m}} \cdot \frac{J \cos\varphi}{U_{ph,m}} \left(\frac{\omega}{v_B} Z_B F - \tan\varphi_0 \right)^2 \right)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-2)$$



$$\frac{U_2}{U_{ph,m}} = \left[0.5 - \frac{U_{ph,N}}{U_{ph,m}} \left(\frac{\rho J}{U_{ph,m}} + \frac{\omega}{v_B} \frac{S}{P_H} \frac{U_{ph,N}}{U_{ph,m}} \tan \varphi_0 \right) \cos \varphi + \sqrt{0.25 - \frac{U_{ph,N}}{U_{ph,m}} \left(\frac{\rho J}{U_{ph,m}} + \frac{\omega}{v_B} \frac{S}{P_H} \frac{U_{ph,N}}{U_{ph,m}} \tan \varphi_0 \right) \cos \varphi - \left(\frac{U_{ph,N}}{U_{ph,m}} \right)^2 \left(\frac{\omega}{v_B} \frac{S}{P_H} \frac{U_{ph,N}}{U_{ph,m}} - \frac{\rho J}{U_{ph,m}} \tan \varphi_0 \right)^2 \rho^2 \cos^2 \varphi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-3)$$

$$\frac{\Delta P}{P} = \left(\frac{U_{ph,m}}{U_2} \right)^2 g \frac{U_{ph,m}}{U_{ph,N}} g \frac{J \rho l}{U_{ph,m}} (1 + \tan^2 \varphi_s) \cos \varphi \quad (1-4)$$

$$l_{np} = \frac{U_{ph,m}}{U_{ph,N}} g \frac{0.2 U_{ph,m}}{J \left(\rho + \frac{\omega}{v_B} Z_B F \tan \varphi_0 \right) \cos \varphi} \quad (1-5)$$

式中 $U_{ph,m}$ ——电网最高运行电压；

$U_{ph,N}$ ——额定相电压；

U_2 ——负载电压；

S ——负载功率；

P_H ——线路自然功率；

P ——负载有功功率；

ΔP ——有功损耗；

J ——电流密度；

ρ ——导线电阻率；

ω ——系统角频率；

v_B ——导线波速；

Z_B ——波阻抗；

F ——每相导线的有效截面积；

φ_0 ——考虑到负载无功功率并经电容补偿后的等效负载角；

$\cos \varphi$ ——负载功率因数；

l_{np} ——线路的极限长度。

根据式 (1-1)，负载电压 U_2 减小时，导线电流增大，以使负载所需的功率 S 保持不变；由式 (1-2)，随着导线长度、电流密度和导线截面的增大，电压损失也增大（比值 $U_2/U_{ph,N}$ 下降）。由式 (1-3) 和式 (1-4)，比值 S/P_H 的增加对线路工况是不利



的：增加电压损失，有功损耗也增大；相对损耗值与导线截面并无直接关系，但是随着截面或者比值 S/P_H 的增大， $U_2/U_{ph,N}$ 的下降导致有功损耗迅速增长。另外，由式 (1-2) 可知，电压损失的有功分量（决定于 $\rho J/U_{ph,m}$ ）随着额定电压的增加而减小，而其无功分量则只与乘积 $(S/P_H)\tan\varphi_0$ 有关。因此，电压等级升高时，无功分量的作用显著增大。这样一来，为了降低沿线的电压损失，应当力求减小比值 S/P_H 。

在导线截面积和电流密度相对较大时，很大的 S/P_H 使得沿线送电线路的电压损失大大增加。为了解决这一问题，常在线路受端采用附加的无功功率补偿装置（同步补偿机，电容器组），但它们的价格十分昂贵。解决这一问题的可供选择的方法为限制比值 $S/P_H \leq 1$ 。在这种情况下，为使沿线传输功率不被限制到低于目前所采用的功率值，需使自然功率与传输功率成正比增加，并且保持乘积 $Z_B F \tan\varphi_0$ 不变。

限制比值 S/P_H 大大地改变了输电线路的运行方式。对于长 100km 的 110kV 线路，在 $S/P_H = 2$ 和 $J = 1.3A/mm^2$ 时，电压损失为 13%；而当 $J = 2A/mm^2$ 时为 16%。如取 $S/P_H = 1$ ，则 $J = 1.3A/mm^2$ 时的电压损失降至 8.2%； $J = 2A/mm^2$ 时降至 11%。

与 $S/P_H \geq 2$ 的情况相比，将比值 S/P_H 降至 1.0 及以下，可在很长的线路中获得可取的技术经济指标。例如，当 $S/P_H = 0.5$ 和 $J = 1.3A/mm^2$ 时，110kV 线路的电压损失只在 200km 长的线路中才达到 11%。

式 (1-5) 表示出了线路的极限长度与其影响因素之间的关系。这个式子本身就是在容许运行情况条件下各方面近似后推导出来的，同时相关不确定因素较多，无法得出线路极限长度的精确值。这里考虑到故障后运行的电流密度 $J = 2A/mm^2$ ，同时 $\cos\varphi = 0.85$ ，经计算后得出 35~220kV 线路的极限长度同比值 S/P_H 的关系如表 1-2 所示。

表 1-2

 S/P_H 不同比值时线路输送的极限长度

U_N (kV)	线路输送功率极限长度 (km)				
	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0
35	103	92	78	66.4	58
110	283	220	151	112	91
220	625	340	197	135	105

在电压等级提高时，由于比值 S/P_H 对沿线电压降落的影响增大，故 S/P_H 对极限长度的影响也显著增大。表 1-2 中的数据说明，对于 35~220kV 的线路，将比值 S/P_H 减小到 0.5~1.0 是适当的。

对于 220kV 及以下输电网络而言，当电压高、距离长、负荷轻时，输电线向电网送出无功；当电压低、距离短、负荷重时，则从电网吸收无功。500kV 输电线由于充电功率很大，且电网正处发展阶段，线路正常输送负荷远远小于线路自然功率，因此其输电线有相当大的无功功率送入电网。这种状态并非由于这些电网的参数有什么原则上的区别，而是由于电网设计的不同处理方式所引起的后果。超高压线路相对很长，在传输功率和自然功率方面总是加以协调控制。而当偏离这种状态时（传输功率超过自然功率），一般需采用补偿装置。

对于超高压远距离输电，若末端电压为额定值，则随末端负荷功率的不同，线路上都有可能出现超过额定值的电压。当输送功率偏离自然功率较大时，这种电压升高可能超出容许的范围。当然，这些是考虑到实际条件（超高压线路中无功补偿的经济性和超高压可控电抗器研制生产等方面的困难），不可能将线路无功补偿到电压处处平衡的理想状态得出的结论。

二、新型输电线路的输送容量和输送距离

由于线路设计中采用的导线型号不同，以及各线路所处网络中具体位置的不同，无法对新型输电线路的输送容量做一个定量的分析。根据国内外实际线路的运行经验，在其他条件基本一致



的情况下，单独采用一种新型技术的输电线路与常规线路的输送容量相比增加的百分比如表 1-3 所示。表中，紧凑型指采用常规紧凑型，大截面导线指截面增加一倍，耐热导线指导线允许温度由 70°C 上升到 110°C ，同塔双回是指相对同电压等级单回路而言。

表 1-3 新型输电技术较常规线路输送容量增加的百分比

新型输电技术	紧凑型	大截面导线	耐热导线	同塔双回
输送容量增加的百分比	约 30%	约 50%	约 25%	约 100%

对于紧凑型输电和同塔双回输电而言，紧凑型线路由于降低了波阻抗，提高了线路的自然传输功率，因此其输送距离较同电压等级的常规线路而言有一定的提高，而同塔双回线路仅仅是将两条输电线路架设在同一杆塔上，对系统运行参数方面影响不大，所以其传输距离与同电压等级的常规线路大致相当。对于大截面导线输电和耐热导线输电两种方式而言，均是超自然功率输送。若保证线路末端负载具有稳定的功率，则较大的过载将引起沿线电压的巨大降落和附加的电能损耗；若保证末端电压为额定值，则随末端负荷功率的不同，线路上有可能出现超过额定值的电压，当输送功率偏离自然功率较大时，这种电压升高可能超出容许的范围。因此，这两种输电方法在实际应用时应应对系统的状况进行仔细校核。

由于以上原因，我国到目前为止大截面导线输电工程中的输电距离一般较短，大部分都是 $10\sim 50\text{km}$ ，有些甚至不足 10km ，最长的也只有 100km 左右；同样，耐热导线也只是运用在较短的线路上。而国外大截面导线输电距离大多在 100km 以上，例如日本就有超过 200km 的大截面导线输电工程。究其原因，是因为国外发达国家在输电线路无功补偿及系统设备的配置较为优良合理，特别是日本，由于土地资源少，地价高，对于单位走廊输电线路的传输能力要求就很高，相对而言，分散化的无功补偿装置的经济性等就处于一个可以接受的水平了。



第二节 输电线路的运行状态及特性

在线路的电场、磁场功率相等的情况下，其无功功率为零。这时线路末端只有有功负载，且其等值电阻与线路的波阻抗相等，这时的线路工作状态称之为自然工作状态，也就是说，此时线路传输的为自然功率。这是一个无功功率的平衡状态，线路既不产生、也不吸收无功功率。

大多数情况下，输电线路的运行状态很难达到所谓自然工作状态，往往线路中的电流与自然电流不相等。当线路中的电流小于自然电流时，线路上有多余的无功功率，这一多余的无功功率应由电力网来吸收；而当线路中的电流大于自然电流时，线路上将缺少无功功率，所缺的无功功率则由电力网提供。因此，交流输电线路的稳定运行有两个基本要点：其一，在线路所有的工作状态下都必须保证整个输电系统的无功平衡；其二，补偿设备沿线路的分布应该保证输电运行状态参数的变化在规程限定的范围之内。

一、线路波阻抗和自然功率

在恒定的相间距离和分裂间距（40cm）的情况下，导线截面变化使得线路自然功率 P_H 略有变动， P_H 用下式表示

$$P_H = \frac{U_{\text{HOM}}^2}{Z_B} = \frac{3U_{\text{ph,N}}^2}{Z_B} \quad (1-6)$$

$$Z_B = \sqrt{\frac{L}{C}} = v_B L = \frac{1}{v_B C} \quad (1-7)$$

式中 Z_B ——线路波阻抗；

L 、 C ——单位长度线路的电感、（工作）电容；

v_B ——波速。

$$\text{其中} \quad v_B = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1-8)$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{D_{\text{CP,r}}}{r_0} + \frac{\mu}{\mu_0} g \frac{1}{4n} \right) \quad (1-9)$$



$$C \approx \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D_{CP,\Gamma}}{r_a}} \quad (1-10)$$

式中 μ_0 ——真空的导磁系数，取 $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ；

ϵ_0 ——真空的介电系数，取 $1/(4\pi \times 9 \times 10^9) \text{F/m}$ ；

μ ——导线的导磁系数；

$D_{CP,\Gamma}$ ——相间距离的几何均距；

r_a ——导线的等效半径。

r_a 在单导线时等于导线的外部半径，而当分裂导线均匀分布在半径 r_p （分裂半径）的圆周上时， r_a 为

$$r_a = r_p \sqrt[n]{nr_0/r_p} \quad (1-11)$$

如果三相导线的对地高度 H_a 相等（导线水平排列），相电容的平均值 $\bar{C}$ 为

$$\bar{C} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \left\{ \frac{3\sqrt{2} - D_0}{r_a} \left[\left(1 + \left(\frac{D_0}{2H_a} \right)^2 \right) \sqrt{1 + \left(\frac{D_0}{H_a} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \right\}} \quad (1-12)$$

$$H_a = \Gamma + \frac{f}{3} \quad (1-13)$$

式中 D_0 ——相邻导线的中心距离；

Γ ——导线对地的允许距离；

f ——弧垂。

电磁波沿导线传播的速度 v_B 要比光速 v_C 略小些， $v_B < v_C \approx 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。

考虑到式（1-9）和式（1-10），三角形排列或垂直排列（例如布置在单杆塔两侧的双回线路）时的线路波阻抗为

$$Z_B \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{\epsilon_0}} \ln \frac{D_{CP,\Gamma}}{r_a} = 60 \ln \frac{D_{CP,\Gamma}}{r_a} \quad (1-14)$$

当三相导线对地高度相等时，波阻抗为

$$Z_B \approx 60 \sqrt{\ln \frac{3\sqrt{2}D_0}{r_a} \ln \left\{ \frac{3\sqrt{2}D_0}{r_a} \left[\left(1 + \left(\frac{D_0}{2H_a} \right)^2 \right) \sqrt{1 + \left(\frac{D_0}{H_a} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \right\}} \quad (1-15)$$



对于 35kV 线路, 几何均距 $D_{CP, \Gamma}$ 约为 4m, 110kV 时约为 5m, 220kV 时为 8~9m。330kV 的三相对称轴间的距离为 9m, 500kV 时为 12m。

根据这些数据, 波阻抗和相应的自然功率均在窄小的范围内变动, 如表 1-4 所示。

表 1-4 各电压等级一般线路的波阻抗 Z_B 及自然功率 P_H

电压等级 (kV)	35	110	220	330	500
$Z_B (\Omega)$	415~375	405~362	400~375	300~295	284~277
$P_H (MW)$	2.9~3.3	30~33	120~130	363~370	880~903

上述结果可用解析方式表示。任意 n 根分裂导线的每相截面积 F 为

$$F = nF_0 = n\pi r_0^2 \mu_e \quad (1-16)$$

$$\text{则} \quad r_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi \mu_e n}} \quad (1-17)$$

式中 F_0 ——每根导线的有效截面积;

μ_e ——填充系数。

利用以上各式, 并由式 (1-6) 和式 (1-8), 可得单根导线 ($n=1$) 时传输功率与自然功率之比为

$$\begin{aligned} \frac{S}{P_H} &= \frac{3U_{ph,N} FJ Z_B}{3U_{ph,N}^2} = \frac{Z_B FJ}{U_{ph,N}} \\ &\approx 60 \frac{FJ}{U_{ph,N}} \ln D_{CP, \Gamma} \sqrt{\frac{\pi \mu_e}{F}} \end{aligned} \quad (1-18)$$

考虑到式 (1-11) 和式 (1-17), 采用分裂导线时的比值为

$$\frac{S}{P_H} = 60 \frac{FJ}{U_{ph,N}} \ln D_{CP, \Gamma} \sqrt[3]{r_{ph} \sqrt{\frac{\pi \mu_e}{nF}}} \quad (1-19)$$

当三相导线对地高度相等时, 有

$$\frac{S}{P_H} = 60 \frac{FJ}{U_{ph,N}}$$



$$\times \sqrt{\ln \frac{\sqrt[3]{2}D_0}{r_p} \sqrt[n]{r_p \sqrt{\frac{\pi\mu}{nF}}} \ln \frac{\sqrt[3]{2}D_0}{r_p} \sqrt[n]{r_p \sqrt{\frac{\pi\mu}{nF}}}} \sqrt[3]{\left[\left(1 + \left(\frac{D_0}{2H_0} \right)^2 \right) \sqrt{1 + \left(\frac{D_0}{H_0} \right)^2} \right]} \quad (1-20)$$

以上公式表明, 比值 S/P_H 随着导线总截面与电流密度乘积的增加而增大。在单导体线路中, 由于系数 F 的影响很小, 故在乘积 FJ 增大的情况下要保持比值 S/P_H 不变是不可能的。在分裂导线的线路中, 可用增大分裂半径的办法来补偿乘积 FJ 的增大。

式 (1-18) 和式 (1-20) 可用来计算不同导线截面和不同电流密度时常规线路中的比值 S/P_H , 具体数值如表 1-5~表 1-7 所示。

表 1-5 220kV 线路中导线截面与 S/P_H 的关系

J (A/mm ²)	不同导线截面 F (mm ²) 时 220kV 线路中的比值 S/P_H				
	240	300	400	500	600
1.0	0.76	0.92	1.22	1.50	1.77
1.2	0.91	1.10	1.46	1.80	2.13
1.4	1.06	1.28	1.70	2.10	2.48
1.6	1.21	1.46	1.95	2.40	2.84
1.8	1.37	1.67	2.20	2.71	3.20
2.0	1.52	1.84	2.44	3.0	3.54

表 1-6 330kV 线路中导线截面与 S/P_H 的关系

J (A/mm ²)	不同导线截面 F (mm ²) 时 330kV 线路中的比值 S/P_H			
	2×240	2×300	2×400	2×500
1.0	0.76	0.94	1.24	1.54
1.2	0.90	1.12	1.49	1.85
1.4	1.05	1.31	1.74	2.16
1.6	1.20	1.50	1.99	2.47
1.8	1.36	1.68	2.23	2.78
2.0	1.51	1.87	2.48	3.09



表 1-7 500kV 线路中导线截面与 S/P_H 的关系

J (A/mm ²)	不同导线截面 F (mm ²) 时 500kV 线路中的比值 S/P_H		
	3×300	3×400	3×500
1.0	0.88	1.16	1.43
1.2	1.06	1.39	1.72
1.4	1.23	1.62	2.00
1.6	1.41	1.85	2.28
1.8	1.59	2.08	2.57
2.0	1.76	2.31	2.86

表 1-5~表 1-7 中数据表明, 只在较小截面和较小电流密度 ($J \approx 1 \sim 1.2 \text{ A/mm}^2$) 时, 比值 $S/P_H < 1$; 而随着导线截面和电流密度的增大, 所传输的功率与自然功率的差值也越来越大; 但随着电压等级的提高, 这一差值又越来越小。

尽管各级电压线路结构彼此相差很远, 但是单导线线路的波阻抗约在 $380 \sim 400 \Omega$ 之间, 通常取 400Ω 。对于双分裂导线线路, 波阻抗约为 320Ω 。根据式 (1-6), 可得出各级电压的自然功率, 如表 1-8 所示。

表 1-8 各电压等级线路的自然功率

线路电压等级 (kV)	35	110	220	330	500
单导线时的自然功率 (MW)	3	30	120	270	—
双分裂导线时的自然功率 (MW)	—	38	150	340	—
四分裂导线时的自然功率 (MW)	—	—	—	—	1000

二、传输自然功率 ($S/P_H=1$) 的情况

在不采用附加补偿装置的情况下, 当其电磁场功率完全平衡时, 沿线路可传送的有功功率应为线路的自然功率。但另一方面, 任何输电线路都应能在空载状态下运行, 在此状态下, 必须装设吸收线路无功功率 (线路电场功率) 的补偿装置。当线路长度较短时, 发电机即可起到这种补偿装置的作用; 当线路较长时



(超过 300km), 则必须装设电抗器。

当沿线传输功率由零增加到自然功率时, 无功功率吸收装置所需的容量将逐渐减少到零。因此无功功率吸收装置应该是可调节的。发电机虽然可以满足此要求, 但当线路较长时, 仍需采用可控电抗器。传输自然功率的运行方式 ($S/P_H=1$) 与导线长度和电压等级无关, 其重点在于保证线路的自我补偿。在此情况下, 线路既不产生也不需要无功功率。线路中的传输功率等于负载所需的功率。故在这种运行方式下, 不论是线路首端或末端, 并不需要无功电源来保证其工作能力。这是技术上最完善和经济上最合理的运行状态。

三、传输功率小于自然功率 ($S/P_H<1$) 的情况

当传输功率小于自然功率时, 送端电压低于受端电压, 线路产生无功以供负载、变压器以及部分发电机之用, 线路中产生的剩余无功则由并联电抗器所吸收。

为保证传输电能时沿线的电压变化率较低, 应采取补偿措施。因为传输功率较额定自然功率下降的程度与电流密度、线路长度及电压等级有关。由电阻引起的电压降, 应由线路的电容电流在其电感上的压降来补偿。当线路电压等级提高后, 单位长度电阻下降, 而电容电流增加, 这就易于补偿线路电阻的压降。因此, 对于 110kV 及以下的输电线路, 由于其电阻相对较大, 电容电流较小, 只有取较小的电流密度, 才能使线路两端的电压相等。

为了在故障情况下 (导致切除个别线路) 保证系统运行的高度可靠性, 传输功率低于自然功率 ($P\approx 0.8P_H$) 的运行方式是适宜的, 这样的结论来自对配电网的运行分析。

四、传输功率大于自然功率 ($S/P_H>1$) 的情况

长线路中传输功率高于自然功率的方式会引起沿线电压落差的增大, 因而限制了传输距离和显著增大电网中的电能损失。

当传输功率超过自然功率时, 沿线的电压变化率将急剧增大, 而电压等级对电压变化率的影响也越小, 这是由于线路所需



的无功增加所决定的。由送端向受端输送无功功率将引起附加的电压降，这也使电压变化率加大。为了减少这种单向无功功率流动，可在输电线路末端安装同期调相机、静止补偿器等无功电源。传输功率越是大于自然功率，所需无功也就越大。在此情况下，线路首、中、末端均需有无功电源。

采用紧凑型输电技术，是为了提高线路的自然输送功率、减少线路走廊宽度、提高单位走廊输电容量；采用大截面导线输电技术，可通过提高线路的输送电流以成倍提高线路输送能力；采用耐热导线输电技术，通过提高导线允许温度、增加导线输送电流，从而提高线路输送容量；采用同塔双回输电技术，是通过压缩线路走廊占地来提高其单位走廊输电能力。由此可见，对同样电压等级的单回线路而言，只有紧凑型输电技术才能提高线路的自然传输功率。

第三节 线路的稳定运行及其技术措施

对于最大输电能力 (Total Transfer Capability, TTC)，目前国际上普遍采用北美电力系统可靠性委员会于 1995 年给出的定义，即 TTC 是指在至少满足下述 3 个约束条件下，通过预先设定的源点和汇点，或称作某一界面，从一个区域向另一个区域可能输送的最大功率：①在无故障发生的正常方式下，系统中所有设备（包括线路）的负荷及电压水平在其额定范围内；②在系统中单一元件（如输电线路、变压器或发电机等）停运 ($n-1$) 的故障条件下，应能吸收动态功率振荡，维持系统的稳定；③在系统出现 ($n-1$) 故障条件下，且系统功率振荡平息后，在调度员进行故障相关的运行方式调整前，所有设备的功率及电压水平应在给定的紧急事故条件下的额定范围之内。

一、按经济电流密度确定导线截面

在设计高压架空线路时，一方面要考虑如何降低线路建设总投资，另一方面要减少线路的年运行费用。



线路的总投资 Z 包括：①与导线截面无关的费用 Z_0 ，如勘测设计、房屋搬迁、青苗赔偿和土地征用等费用；②与导线截面有关的费用 b ，如导线截面 A 越大，投资费用越大，杆塔费用也随导线截面增大而增大。线路总投资可表示为（其中 l 为线路长度）

$$Z = (Z_0 + bA)l \quad (1-21)$$

线路的年运行费用 F_1 包括：设备折旧费 F_z ，维护修理费 F_x 和管理费 F_g 等，均可用总投资的百分数表示

$$F_1 = F_z + F_x + F_g = \frac{a}{100}(Z_0 + bA)l \quad (1-22)$$

此外，还应包括线路年电能损耗费 F_s ，即

$$F_s = \frac{P_m^2(1 + \tan^2 \varphi)}{U_N^2} R \tau \beta \approx 3I_m^2 \tau \beta \frac{\rho l}{A} \times 10^{-3} \quad (1-23)$$

式中 R ——线路等值电阻；

P_m 、 I_m ——线路输送最大功率（MW）、最大电流（kA）；

τ ——最大负荷损耗小时数（h），可依据最大负荷小时数和功率因数查得；

β ——单位电价 [元/（kWh）]。

经济电流密度 J_n 可用以下方法求得。

$$F = F_1 + F_s = \frac{a}{100}(Z_0 + bA)l + 3I_m^2 \tau \beta \frac{\rho l}{A} \times 10^{-3} \quad (1-24)$$

$$\text{令} \quad \frac{\partial F}{\partial A} = 0$$

导线经济截面 A （mm²）为

$$A = I_m \sqrt{\frac{3\rho\tau\beta}{10ab}} \quad (1-25)$$

经济电流密度 J_n （A/mm²）为

$$J_n = \frac{I_m}{A} = \sqrt{\frac{10ab}{3\rho\tau\beta}} \quad (1-26)$$

我国的经济电流密度值如表 1-9 所示。

