



电力科技专著出版资金资助项目

输电线路 增容技术

张启平 钱之银 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



电力科技专著出版资金资助项目

输电线路 增容技术

张启平 钱之银 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

改革开放以来,为满足国民经济高速发展和人民生活用电不断增长的需求,我国电网建设持续高速发展,电网规模逐年增加,电网密度逐渐增大,输电线路走廊呈日益紧缺之势。最大限度地发挥线路走廊资源,提高线路的输送能力,不仅是提高资源利用效率的需要,也是电网发展的必然要求,经济效益和社会效益十分明显。

自2003年以来,华东电网有限公司围绕提高输电线路(走廊)输送能力这一目标,在理论和技术上开展了如“提高导线允许使用温度”、“线路动态增容技术”、“500kV同塔四回线路关键技术研究”、“大截面导线关键技术研究”、“导线载流量深化研究”等多项提高输电线路输送能力课题的研究,研究成果已在电网运行和新建输电工程中推广应用。

本书总结了华东及国内外提高输电线路(走廊)输送能力的最新研究成果,并给出了工程实例。

本书第1章简述了不同电压等级输电线路输送的自然功率,分析了不同长度的输电线路在输送不同容量时遇到的热稳定和功角稳定极限问题及其基本对策。

第2章采用输电线路波过程理论,计算分析了输电线路在不同性质(电阻、电感、电容)负荷下的稳定特性,特别是负荷为纯电阻(线路输送纯有功功率)时的特性和线路的补偿原理,以及集中补偿与均匀补偿容量、补偿效果(电压、电流沿线均匀度,线路损耗及首末端电压相角差)的差异,并给出了满足工程精度需要的计算分析方法。

第3章分析了提高线路输送能力的电网技术,主要包括并联电抗器、电容器等补偿技术和最新的技术研究成果,并给出了原理分析和工程实例。

第4章总结了提高在输电线路输送能力的研究成果,结合工程实例,详细介绍了提高导线工作温度以及根据线路运行环境参数及导线实时电流实时计算输送容量的技术方案。本章也对变压器过载能力和相关一次设备通流能力进行了计算分析。

第5章介绍了采取新结构和新材料提高线路输送能力的技术方案,对采用同塔多回路结构和大截面、耐热、复合型导线等新材料提高线路输送能力进行了分析计算。

本书第1章由张启平编写,第2章由钱之银编写,第3章由张启平和王丰华合编,第4章由张启平、钱之银合编,第5章由钱之银和赵文斌合编,全书由钱之银统稿。上

海交通大学朱子述教授对本书提出了许多宝贵意见，并对初稿进行了审核，在此深表感谢！

由于编者水平有限，书中如有不足之处，敬请读者批评指正。

编者
2010 年 1 月

前言

1 影响输电线路输送能力的因素分析	1
1.1 输电线路传输自然功率	1
1.2 输电线路带负荷能力	2
1.3 功角稳定问题及其对策	3
1.4 电压控制问题及其对策	4
1.5 输电线路热稳定问题及其对策	5
1.6 我国现有线路输送能力分析	6
2 提高输电线路输送能力的电网技术	9
2.1 无损耗线路方程及其解的物理意义	9
2.2 输电线路首端接电压源、末端接单一阻抗时的稳态传输特性	12
2.3 输电线路输送有功功率时的计算	19
2.4 输电线路的补偿原理	22
2.5 输电线路的并联补偿	23
2.6 输电线路的串联补偿	27
2.7 基于补偿线路概念的近似计算方法举例	30
3 提高输电线路输送能力的补偿措施	34
3.1 并联电抗器补偿	34
3.2 并联电容器补偿	35
3.3 串联电容器补偿	35
3.4 灵活交流输电装置	36
3.5 紧凑型输电线路技术	53
4 提高现有输电线路输送能力的技术	56
4.1 提高输电线路输送能力研究现状	56
4.2 动态增容技术	70

4.3	提高导线工作允许温度技术	79
4.4	变压器增容技术	92
4.5	其他一次设备的通流能力分析	101
5	提高输电线路输送能力的线路建设技术	107
5.1	同塔（杆）多回输电技术	107
5.2	大截面导线技术	116
5.3	采用新型导线进行线路增容的技术	122
	参考文献	129

影响输电线路输送能力的因素分析

1.1 输电线路传输自然功率

图 1-1 所示为无损输电线路原理接线。图 1-1 中, $e(t) = E \sin(\omega t + \varphi_0)$ 为无穷大电源; l 为线路长度; Z 为波阻抗, 有 $Z = \sqrt{L_0/C_0}$; v 为波速度, 有 $v = (\sqrt{L_0 C_0})^{-1}$, 其中 L_0 和 C_0 分别是线路每米导线的纵向电感和每米导线的对地电容, 架空线路的波速度为光速; 线路末端接有负载 $R = Z$ 。

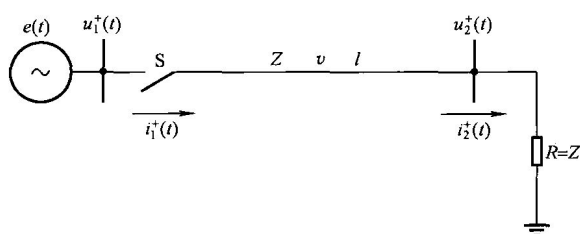


图 1-1 无损输电线路原理接线

当开关 S 合闸后, 将在线路上产生一个从首端向末端以速度 v 传播的电磁波, 该波的电压为 $u_1^+(t) = e(t)$ (上标 + 表示波由线路首端向末端传播), 电流为 $i_1^+(t) = u_1^+(t)/Z$, 功率为 $[u_1^+(t)]^2/Z$ 。经过时间 $\tau = l/v$, 该波到达线路末端, 末端的波的电压值 u_2^+ 等于 u_1^+ , 但要滞后一段传播时间 τ , 即 $u_2^+(t) = u_1^+(t - \tau)$ 。因为线路末端的负荷阻抗与线路波阻抗匹配, 即 $R = Z$, 故线路末端的入射波 u_2^+ 不发生反射, 其携带的功率全部被 R 吸收。此时, 线路输送的功率就是自然功率 P_n 。

对于正弦稳态而言, 在输送自然功率时, 线路上只有单一的入射波, 线路上任意一点的电压有效值相等, 但有相角差。此时, 线路内部纵向电感上所消耗的无功功率等于对地电容上所发出的无功功率。

若线路输送的功率 P'_n 大于自然功率 (即 $R < Z$ 的情形下), 线路电流的增大使线路内部纵向电感所消耗的无功功率大于线路对地电容上所发出的无功功率, 线路末端电压会低于首端电压且要从首端注入无功功率。若要使首末端电压保持相等, 线路所需补偿的无功功率可以在首、末端并联电容获得。此举措可近似地看作并联电容加大了线路的对地电容 C_0 , 从而使线路的等效波阻抗减小到 Z' , 自然功率 $P'_n = U^2/Z'$ 变大, 从而使线路又处于输送新的自然功率状态。

反之, 当线路输送的功率小于自然功率时 (即 $R > Z$ 的情形下), 线路电流的减小使线路纵向电感消耗的无功功率小于线路对地电容所发出的无功功率, 线路末端电压会高于首端电压并且要在线路首端吸收无功功率。此时, 若要使原来的首、末端电压保持不变,

可在线路两端并联电抗器来等效地增大线路的波阻抗，达到等效线路传输等效自然功率的状态。

1.2 输电线路带负荷能力

输电线路带负荷能力指的是在给定导线温度、电压变化和稳定极限条件下线路的传输功率极限，用线路自然功率的百分值来表示。这些给定条件是保证系统安全性和电能质量的需要。

图 1-2 所示为无补偿的架空输电线路通用负荷能力曲线，它表明线路传输的功率极限与线路长度的关系，热极限、电压降极限和静态稳定极限是影响功率极限的三个因素。

在确定负荷能力曲线时，对于图 1-3 (a) 所示的系统模型，假定沿线最大允许的电压降为 5%，最小允许的静态稳定裕度为 30%，其中静态稳定裕度的定义为 [参照图 1-3 (b)]

$$\text{静态稳定裕度} = \frac{P_{\max} - P_{\text{limit}}}{P_{\max}} \times 100\% \quad (1-1)$$

当稳定裕度为 30% 时，传输角 δ 为 44° 。此稳定极限的计算包括线路两端的等值系统电抗的影响，对应的故障电流为 50kA。

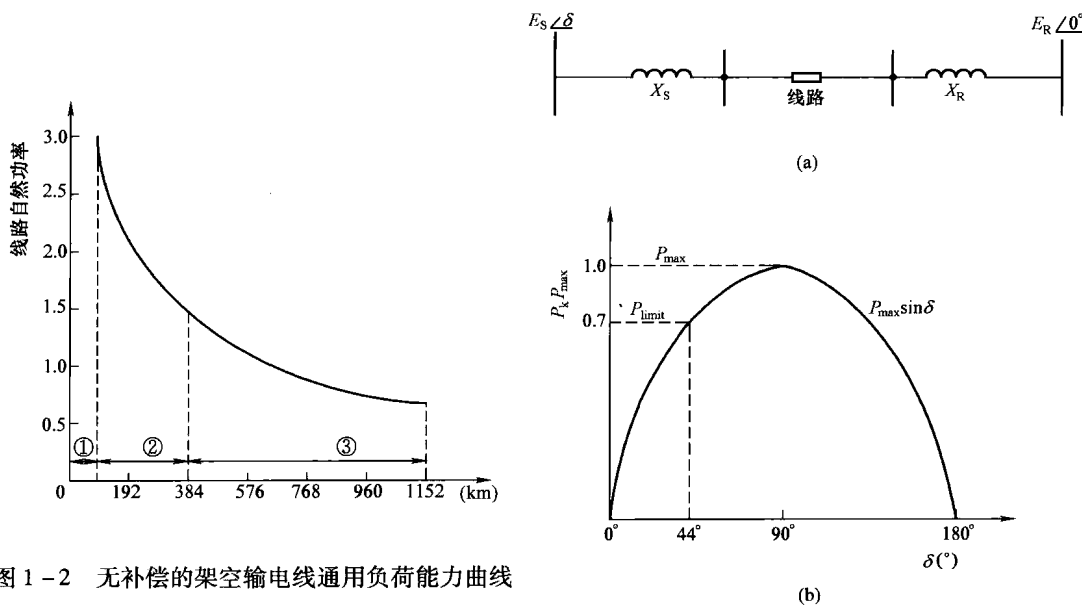


图 1-2 无补偿的架空输电线路通用负荷能力曲线

- ①—0 ~ 96km, 热极限区;
- ②—96 ~ 384km, 电压降极限区;
- ③—384 ~ 1152km: 静态稳定极限区

图 1-3 静态稳定裕度计算
(a) 输电系统模型; (b) 传输角曲线

由图 1-2 可见，0 ~ 96km 线路受制于热极限；96 ~ 384km 线路受制于电压降极限；超过 384km 的线路受制于稳定极限。

表 1-1 列出了典型架空输电线路的参数，据此可方便地得到不同电压等级线路输送的自然功率。

表 1-1 典型架空输电线路的参数

额定电压 (kV)	230	345	500	765	1100
$R(\Omega/\text{km})$	0.050	0.037	0.028	0.012	0.005
$X_L = \omega L(\Omega/\text{km})$	0.406 7	0.305 8	0.270 8	0.274 2	0.243 3
$X_C = \omega C(\Omega/\text{km})$	2.809 2	3.765 0	4.333 3	4.148 3	4.62
$\alpha(\text{непер}/\text{km})$	0.000 067	0.000 066	0.000 057	0.000 025	0.000 012
$\beta(\text{rad}/\text{km})$	0.001 1	0.001 1	0.001 1	0.001 1	0.001 1
Z_c	380	285	250	257	230
$SIL(\text{MW})$	140	420	1000	2280	5260

- 注 1. 设定频率为 50Hz。
 2. 除 230kV 线路外, 表列所有线路都用裂相导线。
 3. R 、 X_L 和 X_C 为每相值。
 4. SIL 是自然输送功率 (三相值)。

1.3 功角稳定问题及其对策

超、特高压交流输电系统正常运行的一个基本条件为输电系统中的主要同步发电机稳定地保持同步。从输电线路输送能力的角度说, 该条件实际为功角稳定问题, 通常用静态稳定裕度来表示。

对于图 1-3 (a) 所示的输电系统模型, 假定 $E_S = E_R = U_N$, E_S 、 E_R 和 U_N 分别为线路送端电压、受端电压和额定电压, 则线路受端的有功功率为

$$P_R = \frac{P_n}{\sin\beta l} \sin\delta \quad (1-2)$$

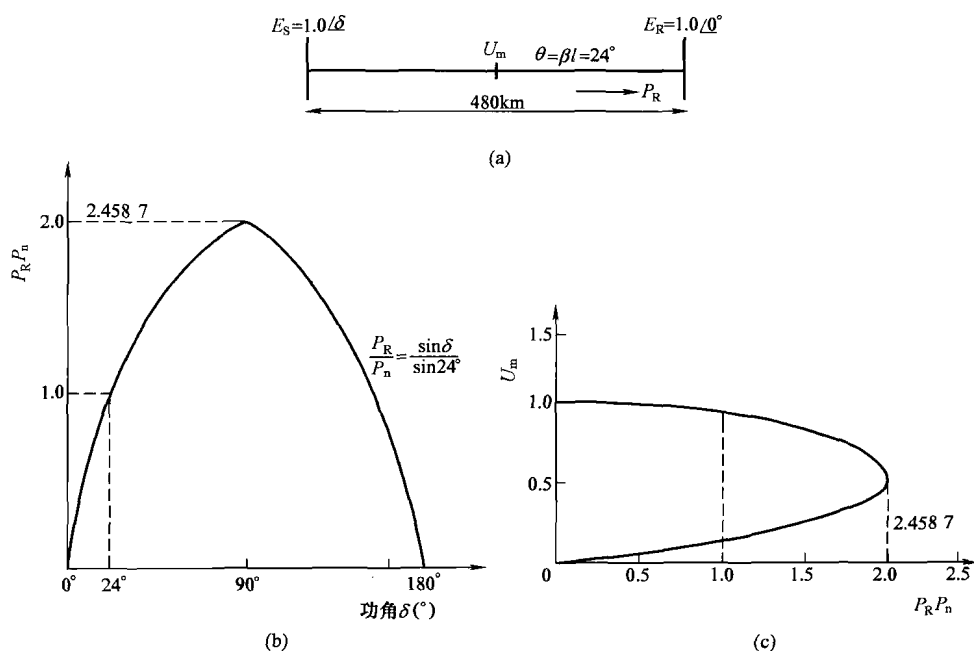
由式 (1-2) 可见, 线路传输功率仅是功角 δ 的函数。当 $P_R = P_n$ 时, $\delta = \theta$ 。

对于一条 480km 的线路, $\theta = 0.502 \text{ rad}$ 和 $\sin\theta = 0.482$, 其传输功率和传输角的关系曲线如图 1-4 所示。

由图 1-4 (b) 和图 1-4 (c) 可见, 有一个最大的传输功率存在。当传输角增加时 (即当线路送端同步系统领先于线路受端同步系统时), 根据式 (1-2) 和图 1-4 (b) 可见, 传输功率也随之增加。且同时伴随着中点电压 U_m 的降低和中点电流 I_m 的增加, 从而使传输功率也随之增加。当到达某个确定的点之前, 中点电流 I_m 的增加超过中点电压 U_m 的降低。当传输角达到 90° 时, 传输功率达到其最大值。在到达某一个确定的点之后, 中点电压 U_m 的降低超过中点电流 I_m 的增加, 因此它们的乘积随着功角的进一步增加而减少, 此时系统是不稳定的。

能传输的最大功率表示静态稳定的极限。对于图 1-4 所示的 480km 线路, 这个极限等于自然功率的 2.458 7 倍。

由于线路串联补偿电容可抵消线路串联电感, 使线路的等效相移系数 β 值降低, 从而提高线路的有功功率。长线路经常采用这一方法来提高线路的输送容量。


 图 1-4 480km 线路的 $P_R - \delta$ 曲线和 $U_m - P_R$ 曲线

(a) 输电系统模型；(b) 传输角特性；(c) 中点电压作为传输功率的函数

1.4 电压控制问题及其对策

超、特高压交流输电系统正常运行的一个基本条件为输电线路各点的电压必须保持在额定电压附近。从线路输送能力的角度来说，该条件实际上为无功控制和电压稳定问题，即各种无功补偿装置的合理配置。

当线路输送的有功功率大于某一临界值时，线路首端的输入无功功率加大，并会使首末两端的电压差值大于 5%，这是不允许的。

对于 200km 及以下的短距离输电，限制输送能力的主要因素是无功不足，原因是在短距离情况下，由静态稳定储备系数所确定的输送功率可以达到线路自然功率的 3 倍甚至 4 倍以上。此时，线路电感消耗的无功比线路电容的充电无功大出 10 倍以上，为了维持线路两端的电压水平，两端系统必须提供足够大的无功功率。如果两端系统不能提供这样大的无功功率以维持线路两端的电压水平，那么只有减少线路的输送功率直到两端系统提供的无功功率满足线路消耗的无功要求为止。

对于中、长距离输电系统，电压和无功控制主要应考虑以下三个问题：

- (1) 线路轻负荷或空负荷时两端系统应吸收的无功功率。
- (2) 线路轻负荷或空负荷时线路中点的运行电压不应超过线路的最高允许运行电压。我国规定的最高允许运行电压一般是额定电压的 1.1 倍。
- (3) 线路末端三相开路时由电容效应引起的线路首端和末端工频电压升高应限制在

较低的范围之内。一般规定，线路首端的工频电压升高应限制在 1.25 ~ 1.3 倍之内；线路末端的工频电压升高应限制在 1.4 ~ 1.5 倍之内。

对于给定的有功功率，若在线路首末两端电压相等的前提下在 300km 的线路两端进行串联补偿或并联补偿时，该线路的中点电压和中点电流同相（只通过有功功率），相当于一条首端补偿的 150km 的线路。此时，若 $P = 1.5P_n$ ，沿线的电压、电流最大差值仅为 1.52%，与均匀补偿相差无几。

对于小于 300km 的线路输送 1.5 倍自然功率而言，任何一种补偿都是可行的。对于更长的线路，采用串联补偿为宜，此时， βl 下降。但由于补偿度高时会导致系统的固有频率变低，可能会引发次同步谐振等问题，应考虑混合补偿的方案。

1.5 输电线路热稳定问题及其对策

在实际运行环境中，线路热稳定已成为输电能力的瓶颈有扩大的趋势。

输电线路的热稳定既与导线的材料有关，又与相关材料的允许温度、应力和对地安全净距等因素有关。这些因素如果超过所允许的限制会加速导体的老化和机械损伤，甚至影响导体的安全运行。由于输电线路通过电流而引起的导体温度、弧垂和张力的变化是相互依存的，因此在工程中往往采用最高允许温度作为元件载荷能力的界定。

热稳定有稳态和静态之分。所谓静态热定值，就是从静态热平衡方程出发，按导体最大允许温度所解算的最大允许载流值。而暂态热定值主要是从动态的热平衡方程出发，以导体载流与温度不同步为特点，体现导体温度在不同持续时间的界定，即以温度来表征热定值。之所以称之为暂态，是因为其体现的是温度变动的暂态过程，过程结束又回到静态热定值，所以该概念往往都对应着一个延续的时间。

对于承载输电任务的线路，在其设计之初首先要进行导线型号的选择，主要是指导体截面的选择。输电线路的导线截面一般按经济电流密度选择，此外还要按电晕及无线电干扰等条件进行校验。在某些情况下，还要依据电力系统非正常运行情况校验导线的允许载流量。随着输电线路输送容量的增大及大截面分裂导线的采用，电晕损失、无线电干扰已不再起控制作用，且导线允许的电流密度随截面增大而减小。因此，导线截面选择主要由允许载流量来决定，即线路的规划和建设一般考虑线路目前以及未来需要承担的供电任务而选择。

就导体自身而言，其热载荷能力由导体本身的物理限制所决定，因此对于同种规格的导线，其载流量直接取决于其发热允许温度，允许温度越高，载流量越大。提高线路的允许温度会极大地提高经济效益，然而，温度升高必然会导致线路弧垂的增加。

导线的温度与导线的载流量、环境温度、风速、日照强度、导线表面状态等有关，对于确定的环境条件，导线的允许载流量直接取决于其发热允许温度，允许温度越高，允许载流量越大。但是导线发热允许温度受导线载流发热后的强度损失制约，因此架空导线的允许载流量一般是按一定气象条件下导线不超过某一温度来计算的，目的在于尽量减少导线的强度损失，以提高或确保导线的使用寿命。

允许载流量的计算与导体的电阻率、环境温度、使用温度、风速、日照强度、导线表面状态、辐射系数及吸热系数、空气的传热系数和动态黏度等因素有关。导线的最高使用温度按各国的具体情况而定,日本、美国的导线最高使用温度允许到 90°C ,法国为 85°C ,德国、荷兰、瑞士等国允许到 80°C ,我国和前苏联允许到 70°C 。

影响弧垂的因素有很多,其中主要有导线应力、传输容量、大气温度、风、导线覆冰等。导线的应力变大则弧垂变小。提高导线的传输容量,或者气温升高,必然会引起导线发热,导线温升会影响弧垂的变化,温度越高弧垂会越大。导线覆冰也会使弧垂增大造成闪络并有可能烧伤烧断导线。

可通过实时监测导线温度(载流量)、环境温度、风速和日照等参量分析计算不同持续时间的暂态容许载流量和静态容许载流量,以达到动态增容的目标。

1.6 我国现有线路输送能力分析

目前,我国现有电网主网架以 500kV 为主。自1981年我国第1条 500kV 平顶山—武汉输电线路投入运行以来,经过24年的发展, 500kV 电网已经覆盖了全国除西北、西藏和海南以外的全部省份。目前国家电网公司已投产的 500kV 线路总长度为 $3.8 \times 10^4\text{km}$,形成了东北、华北、华中、华东等4个以 500kV 为骨干网架的区域电网,并且实现了东北—华北—华中的交流联网,是世界上规模最大的 500kV 交流电力系统之一。

500kV 电网是随着长距离、大容量输电而出现和逐步形成的。我国地域广阔,一次能源主要集中在中西部地区,而电力消费却主要集中在东南部沿海和中部地区。输电距离长、供电范围大是我国 500kV 电网发展过程中的主要特点。在 500kV 电网建设发展初期, 500kV 输电线路的建设大多是将远方坑口、路口火电厂和大型水电站的电力输送到位于大中城市和沿海地区的负荷中心,由于 500kV 电网还未形成较为坚强的网状结构,长距离链形结构使得我国 500kV 长距离输电线的输送能力主要取决于线路的稳定极限。20世纪80年代,每回 500kV 交流线路的输送能力为 $600 \sim 800\text{MW}$,近年来随着电网建设的发展、区域电网结构的加强,使 500kV 交流线路的平均输送能力提高到了目前的 $800 \sim 1000\text{MW}$ 左右。

但是,由于受限于线路热稳定水平、暂态稳定水平(主要集中在远距离送出线路及跨省联络线)和动态稳定水平,目前约有 $1/4$ 的输电线路输送能力明显低于国外水平,且多为跨区、跨省联络线,在一定程度上造成了当前“送不出,落不下,交换能力不强”的问题。因此,提高 500kV 电网输送能力工程的研究重点应首先放在提高跨区、跨省和大电源送出线路的极限上。

送电能力受限的原因之一是我国电网在推广应用新技术上还存在差距,因此,要使我国 500kV 线路的输电能力整体上达到国外先进水平,必须加大先进技术的应用,尤其是一些实用化的技术。这些技术主要包括以下几个方面:

一、串联补偿和可控串联补偿技术

串联补偿技术是一项十分成熟的技术,在电力系统中已有70多年的应用历史,世界

上已安装的串联补偿电容总容量已超过 90Gvar。20 世纪 90 年代以后,随着电力电子技术的发展,在常规串联补偿技术的基础上又发展了可控串联补偿技术。对于长距离输电线,其输电能力主要取决于线路的稳定极限,采用串联补偿、可控串联补偿可使系统稳定极限大幅度提高从而提高线路的输电能力,如瑞典、加拿大和巴西都采用串联补偿技术来提高线路输电能力、降低输电工程投资。国内曾在 220kV 和 330kV 系统采用过串联补偿技术,后因设备质量问题和系统条件变化而相继退出运行。在国家电力公司和国家自然科学基金委员会的支持下,从 1996 年开始中国电力科学研究院与清华大学等单位合作一直在进行可控串联补偿的关键技术和工程应用的研究,现已基本掌握了关键技术,设备研制攻关已立项并正在落实应用工程实施。

二、紧凑型输电技术

紧凑型输电技术是通过减少输电线相间距离和改变排列来达到减少线路电抗、增加容抗、提高线路自然功率,从而提高输电线输电能力的输电技术。紧凑型输电技术通常用于长距离输电工程。

三、动态无功补偿技术

动态无功补偿技术可根据系统需要快速调节无功、维持母线电压在额定值附近。对于长距离输电线,在中间变电站采用动态无功补偿技术可以提高线路输电能力、改善线路两端的电压水平。动态无功补偿技术广泛采用的是无功静止补偿装置(SVC),在一些长距离输电线路的中间安装一定容量的 SVC 能够提高线路的输送能力。目前,全世界已有超过 300 套、总容量约为 50Gvar 的 SVC 在输配电系统中运行。我国目前有 5 个 500kV 变电站安装了 SVC,容量在 105 ~ 170Mvar 之间,这些装置对当时系统调相调压和稳定性的改善作用比较明显。此外,在一些发达国家的负荷中心,为防止电网可能出现的电压崩溃,也大量采用动态无功补偿技术,如东京电力。因此,动态无功补偿技术不仅能用于长距离输电工程以提高输电能力,而且能用于负荷中心以加强电网的安全。目前我国能生产配电网用的 SVC,但用于 500kV 输电系统的大容量、高电压的 SVC 尚未实现国产化。

四、大截面容量技术

一般情况下,短距离输电线的输电能力主要取决于线路的热容量限制,因此需根据负荷密度和输电容量选择合适的线路型号和导线截面。如东京电网根据其负荷密度高、输电距离短和走廊紧张的特点采用大截面耐高温导线和同杆并架技术,提高了单位走廊的输电能力,采用的耐高温导线 TACSR810 × 4 和 TACSR810 × 6 的热容量分别达 6GW 和 10GW。这一经验值得负荷中心地区电网建设借鉴。

我国 500kV 线路目前主要采用 LGJQ300mm² × 4 和 LGJQ400mm² × 4 的导线,主要是由我国 500kV 线路的输送能力决定的。如果考虑到将来的发展,对一些重负荷地区的线路和采用串联补偿提高输电能力的线路需研究采用更大截面导线。目前我国只是在三峡电力系统主网架等局部地区的规划中采用了大截面。

五、采用特高压技术

我国 1000kV 特高压交流输电工程和 ±800kV 特高压直流输电工程已经立项建设。

六、柔性交流输电（FACTS）技术

FACTS 技术是基于电力电子技术改造交流输电的系列技术，对交流电的无功（电压）、电抗和相角进行控制，从而有效提高交流系统的安全稳定性，使交流输电系统具有更高的柔性和灵活性，可以有效地增加输电线路的容量，提高线路利用率。目前常用的 FACTS 装置主要有统一潮流控制器、可控串联补偿器、静止补偿器等。

七、输电线路动态增容技术

现行技术规程规定的导线额定输送载流量是设定在很差的气象条件下（很高的环境温度、很强的日照、较低的风速等同时出现），根据导线最高允许温度（70℃）计算出的理论值，其结果非常保守。实际的气象条件大多要好于上述的设定，而同时出现这种恶劣气象条件的时机概率则更少。因此在导线最高允许温度（70℃）的条件下，实际气象条件下的导线实际可允许输送载流量要比现行技术规程规定的输送载流量高许多，即一般常说的导线允许输送载流量的实际值和规定值之间存在隐性载流量。实时增容技术则通过实时监测的导线温度、环境温度、风速等参量计算在当前环境条件下实际可允许的输送载流量，从而在不改变现行技术规程规定的前提下，提高输电线路的输送载流。

输电线路动态增容技术（Dynamic Thermal Rating, DTR）系统将导体由最大允许载流量的监视转化为温度的监视，是导体热定值技术的进步，也标志着电力系统输电元件载荷定值向真实化迈进了一步。DTR 系统进一步挖掘了导体的载流能力，减缓了对新建、扩建线路的要求，节约了投资，并使得系统可靠性得以提高。此外，通过对导体温度进而对导体弧垂或张力的监视，能达到监视输电线路安全运行的目的，同时可以开展对线路寿命的评估，把握导体在运行环境下的真实状况。但实时增容技术仅为一种新技术，目前对其载流量动态计算、系统暂态运行等相关理论的研究还较少，制约了该技术的推广应用。

提高输电线路输送能力的电网技术

2.1 无损耗线路方程及其解的物理意义

2.1.1 无损耗线路的性能方程

对单相均匀无损耗线路进行分析易于得到清晰的物理概念, 这一简化一般不会影响对线路输送能力的工程研究。

图 2-1 所示为单相均匀无损长线及其中的一个微分元。图 2-1 中, L_0 是每米导线对地形成的回路电感, C_0 是每米导线的对地电容。该微分元离线路首端的距离为 x , 线路上电压 $u(x, t)$ 和电流 $i(x, t)$ 都是距离和时间的函数。

当分析工频稳态时, L_0 和 C_0 用线路正序参数 L_1 和 C_1 替代即可。

取电压的参考方向为线路到地, 电流的参考方向与 x 的正方向一致。根据 KVL 和 KCL, 可建立以下偏微分方程组

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2-1)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2-2)$$

由式 (2-1) 和式 (2-2) 对 x 求导可得

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2-3)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (2-4)$$

式 (2-3) 和式 (2-4) 称为波动方程, 其解为

$$u(x, t) = u^+ \left(t - \frac{x}{v} \right) + u^- \left(t + \frac{x}{v} \right) \quad (2-5)$$

$$i(x, t) = i^+ \left(t - \frac{x}{v} \right) + i^- \left(t + \frac{x}{v} \right)$$

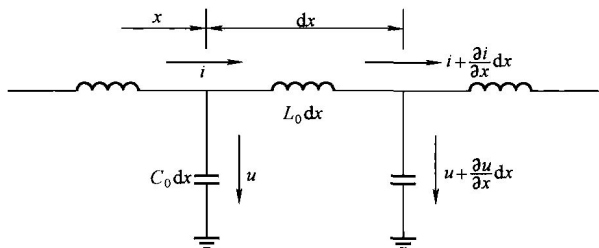


图 2-1 单相均匀无损长线及其中的一个微分元

$$= \frac{u^+}{Z} \left(t - \frac{x}{v} \right) + \frac{i^-}{-Z} \left(t + \frac{x}{v} \right) \quad (2-6)$$

式(2-5)和式(2-6)中, $v = (\sqrt{L_0 C_0})^{-1}$, 称为线路的波速度, 它具有速度的量纲。 $Z = \sqrt{L_0 / C_0}$, 称为线路的波阻抗, 它具有电阻的量纲。电压 u 和电流 i 的上标 +、- 分别表示波向 x 的正方向或负方向传播。

2.1.2 线路上的前行波和反行波

(一) 波的运动特性

组成电压(伴随着电流)的两个分量 $u^+ \left(t - \frac{x}{v} \right)$ 和 $u^- \left(t + \frac{x}{v} \right)$ 分别以波速度 v 向 x 正方向和 x 负方向运动, 它们分别被称为前行波电压和反行波电压。

以 $u^+ \left(t - \frac{x}{v} \right)$ 为例进行分析

$$u^+ \left(t - \frac{x}{v} \right) = u^+ \left(t + \Delta t - \frac{x + v\Delta t}{v} \right) = u^+ \left(t + \Delta t - \frac{x + \Delta x}{v} \right)$$

上式中的 $\Delta x = v\Delta t$ 。由此可见, t 时刻 x 处的前行波电压, 随着时间的推移, 在 $t + \Delta t$ 时刻将跑到导线 $x + \Delta x = x + v\Delta t$ 那一点上去。 u^+ 在 x 正方向的运动速度为 $v = \Delta x / \Delta t = (\sqrt{L_0 C_0})^{-1}$, 它具有速度的量纲。

对于架空线路, 设导线离地高度为 h , 导线的半径为 r , 则每米导线的对地电容 C_0 和每米导线对地回路的电感 L_0 分别为

$$C_0 = \frac{2\pi \varepsilon_0}{\ln \frac{2h}{r}} \quad (\text{F/m}) \quad (2-7)$$

$$L_0 = \frac{\mu_0 \ln \frac{2h}{r}}{2\pi} \quad (\text{H/m}) \quad (2-8)$$

式中 ε_0 ——空气的介电常数, 取 $(36\pi)^{-1} \times 10^{-9}$;

μ_0 ——空气的磁导率, 取 $4\pi \times 10^{-7}$ 。

因此, 波速度为

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = 3 \times 10^8 (\text{m/s})$$

它等于空气中的光速。也就是说, 行波以光速沿无损架空线路传播。

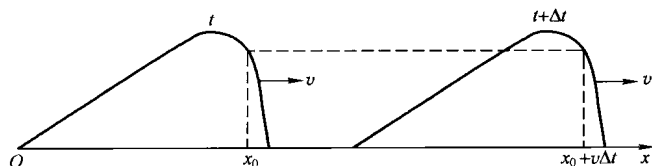


图 2-2 前行波的运动情形

前行波的运动情形如图 2-2 所示。在运动过程中, 波形上的每一点的运动速度均相等且其幅值保持不变, 所以它在线路范围内的运动是不变形、不衰减的。

类似的分析可知, u^- 的运动速度是 $-v$, 是以速度 v 向 x 负方向运动的波。

需要特别指出的是, 线路末端的前行波 $u^+(t + \tau - l/v)$ 等于首端的前行波 $u^+(t - \frac{0}{v})$ 。

式中, l 是线路长度, $\tau = \frac{l}{v}$ 是波从线路首端到末端所经历的时间, 即前者来源于后者, 但两者之间存在着“时差 τ ”。若 u^+ 是角频率为 ω 的正弦波, 则两者存在滞后相角差 $\omega l/v = \beta l$ 。对于 50Hz 工频来说, $\beta = 0.06^\circ/\text{km}$ 或 $\beta = 0.1047\text{rad}/\text{km}$ 。另外, 到达末端的前行波不受末端边界状态的影响。

(二) 波的能量特性

若以波的运动方向作为其电流的正方向来表述单波的电压、电流的比值, 则有

$$\frac{u^+}{i^+} = \frac{u^-}{-i^-} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = Z$$

式中 Z ——波阻抗, 具有电阻的量纲。

对于架空线路, 其波阻抗为

$$Z = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} \ln \frac{2h}{r} = 60 \ln \frac{2h}{r} \quad (2-9)$$

当 u^+ 和 u^- 是以角频率为 ω 的正弦波时, $Z_c = \sqrt{\omega L/\omega C}$, 称为线路的特性阻抗。为方便书写, 稳态时的波阻抗 Z_c 也用 Z 来表达。

一般架空线路的波阻抗 Z 约为 $400 \sim 500\Omega$, 分裂导线的波阻抗 Z 约为 250Ω 。

把式 (2-9) 变换成下列形式

$$\begin{cases} \frac{1}{2} C_0 (u^+)^2 = \frac{1}{2} L_0 (i^+)^2 \\ \frac{1}{2} C_0 (u^-)^2 = \frac{1}{2} L_0 (i^-)^2 \end{cases} \quad (2-10)$$

据此可显而易见 Z 的物理含义。式 (2-10) 表明: 对于线路上传播的每一个独立的行波而言, 其电场能量恒等于磁场能量, 这是电磁波在无损线路中传播必定要遵循的能量关系, 线路波阻抗 Z 就反映了这一关系。

以上分析说明线路上任一点的电压和电流是波合成的结果。反之, 从任一点的电压、电流由式 (2-5) 和式 (2-6) 可对应地分解出该处的前行波和反行波, 即

$$u^+ = \frac{1}{2}(u + iZ) \quad (2-11)$$

$$u^- = \frac{1}{2}(u - iZ) \quad (2-12)$$

$$i^+ = \frac{u^+}{Z} \quad (2-13)$$

$$i^- = \frac{u^-}{-Z} \quad (2-14)$$