

第 0 章

绪 论

0.1 高压输电的发展

0.1.1 高压输电的出现与电压等级的提高

电能的大规模传输是电气化得以普遍应用的重要基础,而高压输电则是实现电能大规模传输最主要的技术手段。1880 年在输电技术起步时,就发生了交流、直流输电孰优孰劣的争论。尼古拉·特斯拉(Nikola Tesla)1887 年提出了多相交流输电的技术,1890 年在英国出现了从 Deptford 到伦敦长达 45 km 的 10 kV 输电线路,1891 年在德国出现了从 Lauffen 到法兰克福长达 170 km 的 15 kV 三相输电线路。1896 年从加拿大尼亚加拉水电站采用三相交流系统向美国 Buffalo 送电,结束了交流、直流输电的争论,交流输电开始迅速在各国得到普遍应用。1985 年苏联建成了 1150 kV 的特高压交流输电线路。高压输电出现一百年来,世界上的输电电压提高了 100 倍。表 0-1 给出了交流输电各电压等级在国际上首次出现的时间。

表 0-1 交流输电各电压等级首次出现的时间

电压等级/kV	10	50	110	220	287	380	525	735	1150
首次出现年份	1890	1907	1912	1926	1936	1952	1959	1965	1985

促使输电电压等级提高的直接动力首先是对大容量输电需求的激增。交流输电线路的自然功率 P 与电压 U 的平方成正比,各电压等级下输电线路的自然功率见表 0-2。促使电压等级提高的另一个因素是电力的远距离输送。交流线路的输送容量随输送距离的增加而下降,因此在远距离输电时需要采用更高的输电电压。

表 0-2 交流输电电压与自然功率

系统电压 U/kV	220	330	500	750	1000	2000
波阻抗 Z/Ω	400	303	278	256	250	250
自然功率 P/MW	121	360	900	2200	4000	16000

0.1.2 交流特高压输电

随着输电电压等级的不断提高,技术上的难度不断增加,逐渐出现了“超高压”(extra high voltage,EHV)一词,以示与“高压”(high voltage,HV)的区别。当更高的 1000 kV 电压等级提出时,又采用了“特高压”(ultra high voltage,UHV)一词,以示与“超高压”的区别。因此,在高压输电行业中,称系统额定电压 ≥ 1000 kV 为“特高压”,330~750 kV 为超高压,220 kV 及以下为“高压”。

20 世纪 60 年代后期国际上就开始了特高压输电的研究,以及时应对“二战”后经济发展带来的对电力需求的快速增长。苏联于 1985 年率先建成了 1236 km 长的交流 1150 kV (系统最高电压 1200 kV)特高压线路,可送负荷 5700 MW,1989—1993 年仅断续运行 4 年后即降压为 500 kV 运行。日本也于 20 世纪 90 年代初建成了超过 300 km 的同杆双回 1000 kV(系统最高电压 1100 kV)的特高压线路,但从未在 1000 kV 运行过,至今仍运行在 500 kV。美、意、法等国,包括巴西等也早已开始了特高压的研究。苏联在建设 1150 kV 特高压线路时,设想在 2020 年左右建设 1800~2000 kV 线路,送出西西伯利亚的巨大能源,并通过白令海峡与美国联网,实现东西半球调峰。

各国发展特高压输电的主要动因不尽相同,俄罗斯是远距离与大容量这两方面因素都有,日本、意大利发展特高压,除大容量输电外,很关键的一点是为了减少电站出线的回数,压缩线路走廊,节省土地资源。但是百万伏级的特高压输电毕竟有许多极具挑战性的技术困难,加上 20 世纪 90 年代以后各主要工业国的经济增速与五六十年代相比普遍显著下降,对电力需求的增长逐渐放缓,因而陆续暂停了对特高压输电的研究。随着可再生能源发电取得了突飞猛进的发展,各国在有条件就近建设大量可再生能源电源的地区,也降低了对大容量、远距离输电的需求。近年来,在中国开始研究和建设特高压输电技术与工程后,印度也开始研究 1150 kV 的交流特高压输变电工程。国外目前实际投入工业运行的输电线路,最高电压等级只有 750 kV,美、加、俄、巴西、南非、印度、韩等国的 750 kV 线路中,时间最长的已有四五十年的运行经验。

中国围绕百万伏级交流特高压输电技术,在 20 世纪 80 年代全国 500 kV 电网建设时就进行了第一次大范围的论证,在 90 年代三峡电站建设时又一次进行了大范围论证。2004 年年底,国家电网公司和南方电网公司再次提出发展特高压输电,由此我国的特高压输电进入快速发展期。2009 年 1 月 6 日,晋东南—南阳—荆门交流 1000 kV 特高压试验示范工程(系统最高电压 1100 kV)顺利投产,并安全运行至今。在取得上述重大进展的同时,我们还应该清醒地认识到,特高压输电技术本身还有许多问题需要进一步研究。

0.1.3 远距离大容量直流输电

直流电压因为不能利用变压器、感应电动机等因素,所以最初交流输电得到迅速发展。20 世纪 50 年代中期以来,随着各方面技术的进步,直流输电的优越性逐步得到体现,许多国家又逐步开始发展直流输电。目前国外直流输电的最高电压等级为 ± 600 kV。由于直流输电几乎不受距离的限制,因此在远距离大容量输电上的优势尤其明显。在岛屿与大陆、岛屿与岛屿之间通过较远距离的海底电缆进行连接时,直流输电也显示出较为明显的优势。

各直流电压等级下的输送容量见表 0-3。就输电本身而言,交、直流输电工程在进行技

术经济比较时,往往要分析“经济距离”。若输电距离低于此“经济距离”,则交流输电占优,反之则直流输电更经济。

表 0-3 直流输电电压与输送容量

电压 $\pm U/\text{kV}$	± 400	± 500	± 600	± 800	± 1100
双极容量 P/MW	480~1000	1000~3000	2500~4800	4800~8000	8800~11000
电流 I/A	600~1250	1000~3000	2100~4000	3000~5000	4000~5000

我国数十项远距离大容量的西电东送工程采用了直流输电。2009 年 12 月 28 日,云南—广东 $\pm 800\text{ kV}$ 直流特高压线路单极带电;2010 年 6 月 18 日和 7 月 8 日,输送距离分别为 1417 km 和 1895 km、额定输送容量分别为 5000 MW 和 6400 MW 的云南—广东和向家坝—上海 $\pm 800\text{ kV}$ 直流特高压工程实现双极投运,均安全运行至今。

0.1.4 节约输电走廊与环境友好的输电方式

输电走廊紧张的问题在工业发达国家已经存在多年,在我国经济发达地区,随着负荷密度的升高也日益突出。为了节省线路走廊资源,普遍出现了同塔双回、同塔多回的输电线路。虽然每回线路的电压等级和自然功率并没有提高,但每条线路走廊内的输送总容量却得到大大的提高。长三角、珠三角、京津等地区已经出现大量两回 500 kV 和两回 220 kV 共四回同塔的线路,四回 500 kV 同塔也已运行多年。2014 年 11 月正式开工建设的淮南—南京—上海的特高压线路,由于部分地区输电走廊十分紧张,在苏州站出线的 22 km 范围内,采用了两回 1000 kV 和两回 500 kV 共四回同塔的堪称极端的情况。同塔多回线路在提高走廊利用率的同时,也带来系统可靠性在一定程度上降低的问题。

俄罗斯、巴西等国家尝试了高自然功率(high surge impedance loading, HSIL)的输电线路,靠增加每相导线的分裂导线数、加大分裂半径等措施,大幅度减小线路电感,增大相间电容,从而大幅度降低线路波阻抗,在不提高电压等级的同时,大幅度提高输电线路的自然功率。巴西在 1996—1997 年分两次投运了 230 kV 共 660 km 的 HSIL 线路,随后 500 kV 等级的 HSIL 线路进行了技术、经济等方面的大量研究,目前正在巴西东北部建设一条 617 km 长,自然功率达 1670 MW 的 500 kV 线路。

我国将类似的线路称为“紧凑型线路”,更强调将三相导线集中在同一个塔窗内,大大缩小相间距离,并适当增加分裂导线数、适当增大分裂半径,自然功率可比常规线路提高约 30%。我国第一条 82 km 长的 500 kV 紧凑型线路从北京昌平到房山,自然功率达 1300 MW,线路下方工频场强 $\geq 5\text{ kV/m}$ 的走廊宽度仅为普通三相水平排列线路的 1/3。该线路 1999 年 11 月投入运行,2001 年 5 月 6 日成功进行了 1600 MW 的大容量输电试验。目前我国实际建成运行的 500 kV 紧凑型线路总长度已有 10400 km。

对于新增输电走廊十分困难的地区,通过采用大截面导线或耐热导线以提高线路电流、采用小弧垂导线以便在增大线路电流的同时不增加线路弧垂、更换绝缘子串以提升电压等级等方式提高输送容量的研究和工程实践在经济发达国家已经进行了多年的积极探索。

在线路走廊十分拥挤、占地十分昂贵的城市及城郊,地下电缆及地下管道输电成为很有发展前景的方式。地下电缆在节省线路走廊、减少电磁环境影响方面,无疑具有极大的吸引

力。但其造价十分昂贵、故障检测与维修困难、供电距离有限的特点也很明显,目前仅在少数特大城市大量采用地下电缆的方式供电。气体绝缘的地下管道输电优势也非常明显,但目前尚处于积极探索阶段,只有个别的工程应用。过去百年来以及今后二三十年内,架空输电线路仍然是各国高压输电的最主要方式。为了降低架空输电线路的视觉影响,或为了提升沿线居民的接受程度,部分国家对输电杆塔材料及其结构也进行了一些有益、有趣的探索和尝试。

0.1.5 基于大容量电力电子技术的交直流输电

灵活交流输电(flexible AC transmission system, FACTS),或称柔性交流输电,是基于大容量电力电子技术,对交流输电系统实施灵活、快速调节控制的交流输电方式。在提高电网输送能力等方面有很大的优越性,可控串联补偿(TCSC)和静止无功补偿(STATCOM)是目前我国灵活交流输电最主要的方式。

单个可再生能源发电机组及机组群的容量往往都不是很大,将其并入电网时,电压源换相直流输电(VSC-HVDC,通常简称柔性直流)技术成为更合适的方式,近海及海上风电则采用直流电缆输送到陆地电网。南方电网公司和国家电网公司分别在南澳岛和舟山进行了多端柔性直流试验工程。

其他的输电方式如超导输电、多相输电、分频输电、半波长输电、无线输电等也在研究中。

0.2 中国电力工业的现状与展望

0.2.1 发电量与装机容量

图 0-1 给出了我国 1980 年以来年发电量的增长情况(不含港、澳、台)。1996 年我国的年发电量超过日本,达世界第二位;2008 年我国发电量超过欧盟各国之和,2009 年超过英、法、德、意、日、加六国总和;并在 2012 年首次超过美国,跃居世界第一;2014 年达到 5.55 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。从图 0-1 的三条虚线还可以看出,改革开放的三十多年来,我国的发电量不仅始终保持了快速增长,而且增速经历了三个不断加速的阶段,每个阶段十年左右。预计今后我国发电量的增速将会放缓至更加可持续的区间。

1980 年我国的发电设备装机容量仅 0.66 亿 kW ,1987 年、2000 年、2005 年、2011 年分别跨上了 1 亿 kW 、3 亿 kW 、5 亿 kW 、10 亿 kW 的台阶。2007—2013 年 7 年间我国新增的发电设备装机容量等于 2006 年以前五十多年的总和。2013 年我国的发电设备装机容量达到 12.47 亿 kW ,首次超过了美国,居世界第一位,2014 年达 13.6 亿 kW ,人均装机达到 1 kW 。

0.2.2 电压等级、电网结构与输电线路

我国的火电及水电资源主要集中在西北、西南地区,而用电负荷中心则集中在长三角、珠三角及京津等东部沿海地区,因此大容量远距离输电成为我国电力行业必须长期面对的主要问题之一。

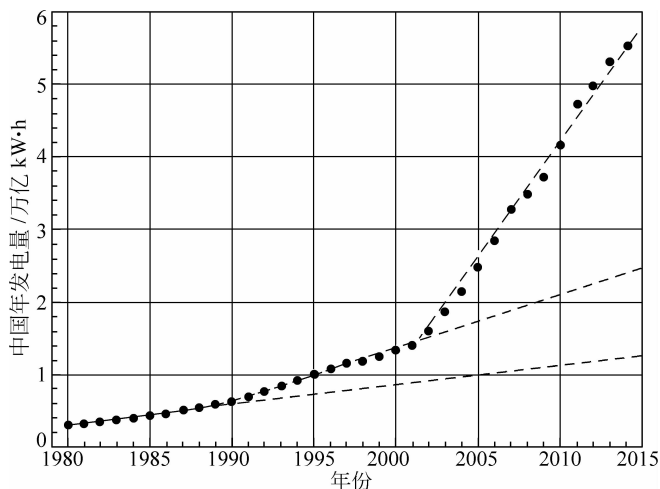


图 0-1 我国年发电量的增长情况

1972 年我国自主设计、建设的第一条 330 kV 输电线路(刘家峡—天水—关中)投入运行,此前我国的最高电压等级仅为 220 kV。1981 年引进多国技术的 500 kV 输电线路(平顶山—武汉)投入运行,我国自此开始了 500 kV 大电网的建设。2005 年我国第一条 750 kV 线路(官亭—兰州东)投入运行,2009 年则迈上了 1000 kV 特高压等级的大台阶,到 2014 年底已有晋东南—南阳—荆门,皖电东送淮南—上海,浙北—福州等 3 项 1000 kV 特高压交流输变电工程投入运行。在直流输电方面,我国第一条 ± 500 kV 的直流输电线路(葛洲坝—上海)1991 年投入运行,2009—2010 年我国迈上了 ± 800 kV 直流特高压的新台阶,到 2014 年底已有云南—广东,向家坝—上海,锦屏—苏南,哈密南—郑州、溪洛渡左岸—浙江金华 5 项 ± 800 kV 直流特高压输变电工程投入运行。

我国目前有东北电网、华北电网、华东电网、华中电网、西北电网和南方电网六大区域电网。其中华东、华中、华北电网现有的交流输变电及配电电压等级为 1000 kV/500 kV/220 kV/110 kV/35 kV/10 kV,东北电网和南方电网的电压类似上述序列,但是没有 1000 kV,东北电网中与 35 kV 并列的还有 66 kV,西北电网的电压等级为 750 kV/330 kV/(220 kV)110 kV/35 kV/10 kV。现有电压等级的简化优化工作已经提出多年,还在不断研究中。我国现有的直流输电主要是 ± 800 kV 和 ± 500 kV 两种电压等级,在 ± 660 kV 和 ± 400 kV 电压各有一条输电线路, ± 1100 kV 特高压直流已有规划的线路,并已开展了大量研究。

2012 年,我国 35 kV 及以上各电压等级的输电线路总长度达 150 万 km,图 0-2 给出了 1985 年以来我国主要电压等级输电线路的长度增长情况。截止到 2013 年底,我国 220 kV 及以上各电压等级的交、直流输电线路总长度达 54 万 km。

0.2.3 电源结构与可再生能源发电

在我国的电源结构中,火力发电一直占据绝对主导地位。受资源条件的限制,我国的燃油和燃气发电极少,火力发电几乎都是燃煤发电。近年来我国的风力发电、太阳能光伏发电等清洁能源发电得到了快速发展。2012 年风电发电量首次超过核电,成为我国的

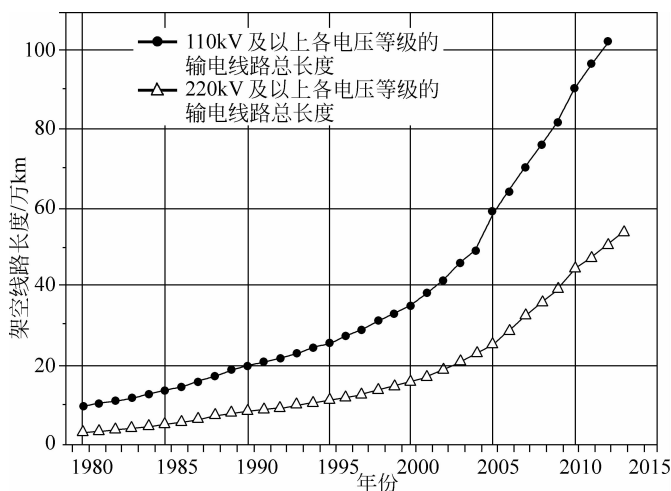


图 0-2 我国架空输电线路长度的增长情况

第三大电源。2013 年全年非化石能源发电新增装机 5829 万 kW, 占总新增装机比重提高到 62%。表 0-4 给出了 2014 年我国发电装机、发电量及各类电源所占比例的情况。

表 0-4 2014 年我国发电设备装机容量、发电量及各类电源所占比例

电源类型	火电	水电	风电	核电	光伏	总量	非化石能源
发电装机/亿 kW	9.16	3.02	0.958	0.199	0.265	13.60	4.44
所占比例/%	67.4	22.2	7.04	1.46	1.95	100	32.7
发电量/亿 kW·h	41731	10661	1563	1262	231	55459	11570
所占比例/%	75.2	19.2	2.82	2.28	0.04	100	24.7

0.2.4 输变电装备

输变电装备是电力工业的物质基础。随着我国电力工业的突飞猛进, 电工装备制造业也及时把握机遇, 得到了飞速的发展; 反过来, 输变电装备制造水平与制造能力的显著提升, 也有力支撑了我国电力工业的发展。2013 年我国共生产发电机组 1.27 亿 kW, 其中水轮机组 2140 万 kW, 汽轮机组 8450 万 kW, 风力发电机组 1800 万 kW。输变电装备的技术水平、国产化率和竞争力也成为我国装备制造业三大重大装备(输变电、冶金矿山、石油化工)中最高的。在主机基本实现国产化以后, 提高关键零部件和关键材料的国产化, 从而进一步提高核心竞争力, 成为输变电装备的当务之急。

0.2.5 电网建设与长期缺电

缺电问题自 1970 年以来困扰我国近四十年, 缺电范围广, 持续时间长。1998 年随着我国工业整体告别短缺经济, 各地似乎不缺电了。2002 年以来随着经济的加速发展, 各地再一次表现出较为普遍、较为严重的缺电状况, 每年夏季高峰用电时期, 缺电状况尤其严重。直到 2009 年以后, 我国才算是真正告别了长期以来的缺电状况。

电力工业增速曾经长期跟不上国民经济的发展速度,成为导致我国缺电的重要原因。另外,我国在发电、输电、配电方面长期投资比例失调,电网建设投资太低,也是导致电网有电但用户缺电的重要原因。比如美国在发电、输电、配电的投资比例约为 1 : 0.43 : 0.7,英国约为 1 : 0.45 : 0.78,日本约为 1 : 0.47 : 0.68,而我国 1998 年启动大规模城乡电网改造前多年间约为 1 : 0.21 : 0.12。2005 年我国电网投资在电力投资中的比重为 33.4%,2008 年上升到 45.9%,2009 年电网投资比重达到 50.9%,首次突破 50%,2013 年达到 51.2%,2014 年进一步上升到 53%,电网建设落后的局面得到显著改善。由于历史欠账太多,电网建设将是一项长期的工作,方兴未艾的智能电网为配电网的升级改造创造了新的机遇,也提出了新的要求。

0.2.6 中国电力工业的展望

首先,未来几十年内中国电力工业的发展空间还是巨大的。发达国家的电力发展已经进入平稳期,而我国目前仍处于工业化时期,只是随着经济方式大力向可持续发展的方向转变,今后我国电力工业的发展速度会逐渐放缓,但长期来看增长空间依然很大。我国急需大幅度提高电能在终端能源消耗中的比重,仍需大幅度提升人均用电水平。

基于国际能源署 IEA 的统计数据,图 0-3 给出了 2000 年以来中(不含港、澳、台)、美两国用电量的比较。美国的电力增长在趋于平稳,我国则经过多年尤其是近十几年的飞速增长在总量上超过了美国,但是人均用电量仍有较大的增长空间。

根据 2014 年国际能源署统计的用电量及人口数据,表 0-5 给出了 2012 年七国集团、金砖国家、亚太、北欧、中东等地区部分国家的年用电量及人均用电量。2006 年我国(不含港、澳、台)的人均用电量仅为 2040 kW·h,不到当年世界人均水平的 80%。2010 年人均用电量增长到 2942 kW·h,刚刚超过当年的世界平均水平,2012 年增长到 3475 kW·h,同年我国台湾地区的年用电量和人均用电量分别达到 240.98 TW·h 和 10283 kW·h。预计 2020 年和 2030 年我国(不含港、澳、台)的年发电量将分别达到 7.5 万亿 kW·h 和 10.4 万亿 kW·h,年人均用电量分别有望达到 5300 kW·h 和 7000 kW·h。

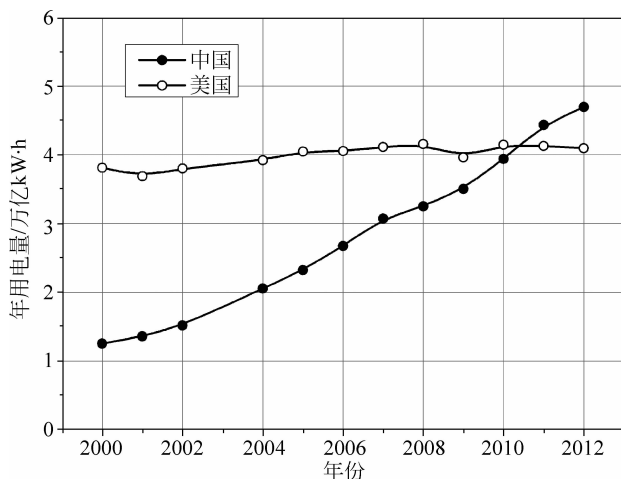


图 0-3 中国与美国用电量变化的比较

表 0-5 不同国家 2012 年用电量及人均用电量

国 家	加拿大	美国	日本	法国	德国	英国	意大利
用电量/TW·h	542.68	4069.06	988.92	482.05	584.71	347.30	321.38
人均用电量/kW·h	15558	12947	7753	7367	7138	5452	5277
国 家	俄罗斯	南非	中国	巴西	印度	韩国	澳大利亚
用电量/TW·h	947.59	230.54	4693.68	498.36	939.78	517.33	236.33
人均用电量/kW·h	6602	4410	3475	2509	760	10346	10218
国 家	挪威	芬兰	瑞典	沙特	伊朗	伊拉克	全球
用电量/TW·h	118.73	84.93	136.03	247.90	210.35	48.31	20915
人均用电量/kW·h	23656	15687	14289	8763	2752	1483	2972

注：表中数据来自于国际能源署《2014 Key World Energy Statistics》，为各国 2012 年的数据。

今后,随着风电、光伏等可再生能源发电设备的大幅增加,由于这些发电设备的年利用小时数明显低于火电与核电,发电量将比发电装机容量更能反映电力工业的发展状况;随着我国与周边国家电力交换量的增加,用电量将是比发电量更能反映国家发展程度的指标。

中国急需探索出一条高生活质量、低能源消耗的新路。

其次,未来几十年我国的电源结构、用能结构将出现较大幅度的调整。我国应大幅度提升发电用煤在煤炭消费中的比重,大幅度提升清洁可再生能源发电在总发电量中的比重,大幅度提升电能在终端能源消费中的比重。2014 年 9 月国务院刚刚批复了《国家应对气候变化规划(2014—2020 年)》,将进一步促进非化石能源利用的快速增长。

2008 年以后,我国超过美国成为全球最大的 CO₂ 排放国,减少温室气体排放成为新的突出问题。2011 年我国发电用煤占煤炭消费总量的比重提升到约 53%,而同期世界平均水平为 65%,发达国家 2000 年前后的电煤比重就已达 80% 以上,美国 1995 年以后就已超过了 90%。电气化水平的重要标志之一是电能占终端能源消费的比重,我国这一指标在 1980 年仅为 6.84%,2005 年上升到 18%,接近 2003 年 18.8% 的世界平均水平,2011 年进一步提升到约 21%,2020 年有望提高到 27% 左右,2030 年提高到 30% 以上,届时电能将成为我国第一大终端消费能源。

我国的发电量中,火电发电量长期占 80% 以上,2006 年甚至高达 84%。近几年在大力发展清洁能源的努力之下,2012 年火电发电量占比首次低于 80%,2013 年我国非化石能源发电量占比上升到 21.6%,这一结果距离我国的长远目标仍有很大差距。2014 年 6 月底,我国风电并网装机达 8275 万 kW,并网光伏发电装机 1814 万 kW,“风光”合计的装机容量突破 1 亿 kW。2014 年底全国发电装机 13.6 亿 kW 中,非化石能源发电装机 4.44 亿 kW,占比 32.7%,发电量占比快速上升到 24.7%,见表 0-4。到 2050 年,我国水电、风电、太阳能、核电等非化石能源的发电量应占总发电量的 50%~70%。

第三,未来几十年内,在发电、用电增速趋缓的同时,用电负荷中心也将适当向西部、北部转移,但我国总体上的用电负荷中心仍将主要分布在中东部地区。预计 2050 年中东部地区的用电量仍将占全国的 75% 左右。我国的大规模水电、风电、荒漠太阳能发电都集中在西部、北部,“西电东送”、“北电南送”的局面仍将长期存在,只是由目前以水电和煤电为主的

输电,逐步转变为水电、煤电、风电和太阳能发电并重的大容量远距离输电。电网的目标由单纯输电变为输电与实现多种电源互补调节相结合,电网不仅要满足大容量远距离输电的需求,还要适应大规模新能源电力的接入,电网优化能源资源配置的作用将进一步提升。在输电方面,走廊节约、环境友好的输电要求会更加迫切。

第四,智能电网是未来电网建设的重要方向。智能电网是社会发展到信息化时代对电网提出的新要求,其内涵和外延都很宽泛,需要各国在未来几十年用各自的实践去充实、去阐述。与发电和输电环节相比,智能电网对配电和用电环节的影响将更大、更深刻。大量的高新技术将在智能电网中找到广阔的用武之地。在智能电网的框架下,各种后续能源的利用、分散能源的控制、电力市场化的改革、用能效率的提升等将给我国电力系统带来深远的影响。智能电网将突破目前狭义电网的范畴,与综合信息服务、综合能源服务相结合,向智能的综合能源信息网方向发展,为保护可持续发展的环境,为提高人民生活水平提供全新的能源利用模式。

0.3 高电压、高场强下的特殊问题

有许多问题在低电压、低场强下并不突出,但当电压或场强高到一定程度后,不仅变得十分突出、十分特殊,而且还很不好解决。本教材将围绕这些问题展开论述。

1. 绝缘问题

没有可靠的绝缘,高电压、高场强甚至无法实现。高电压、高场强下的绝缘问题之所以突出就是因为这时对绝缘的要求太高,以至于为绝缘所花的代价太高,而且其可靠性往往还存在问题。

(1) 绝缘材料:首先要研究性能优良的绝缘材料,要研究各种绝缘材料在高电压、高场强下的各种性能、各种现象以及相应的过程和理论,尤其是绝缘击穿破坏的过程和理论。对绝缘材料性能逐渐劣化、击穿破坏的深入研究,也是开发新材料,进而大幅度提高其性能的基础。

(2) 绝缘结构(电场结构):绝缘材料的性能并不能代表绝缘结构的性能,绝缘结构的性能才是实际的设备使用性能。同一种材料在不同的绝缘结构下其外在表现是不同的。对绝缘结构的研究就是要更好的利用材料的性能。

(3) 电压形式:研究绝缘问题是不能离开电压形式的。如工频或高频交流电压、直流电压、冲击电压等,同样的材料、结构,在不同电压形式下,其绝缘性能也是有很大差异的。

2. 高电压试验问题

对任何一门工程技术学科而言,实际的试验都是必不可少的。高电压试验面临的问题首先就是如何产生各种高电压,而且所产生的高电压波形、幅值都方便可调,这就需要研究各种经济、灵活的高电压发生装置。有了人工产生的高电压,如何对电气设备进行高电压试验也是很值得研究的,不同的试验方法对材料和设备的考核要求也差别极大。另外,还有如何测量高电压的问题,在各学科的研究中,计量与测试都是研究的基础,因此如何能测得准确、方便、及时是基本要求。低电压下各种电量的测量方法、手段、仪器很多,但高电压高场强下的测量就不那么方便了。高强度、微弱量、快速量都不好测,而高电压试验中这三类信号都有,微弱量受到高电压、大电流下的强电磁干扰也是普通干扰所不能比的。

3. 过电压防护问题

高电压设备上的工作电压已经很高,设备造价也已很高,如一台 $500\text{ kV}/360\text{ MV}\cdot\text{A}$ 的电力变压器,1994 年的出厂价已达 1200 万~1300 万元,而一台 $\pm 800\text{ kV}$ 特高压直流换流变压器(仅为三相中的一相)的价格就接近 1 亿元人民币。但在电力系统的运行中,还会有各种情况导致比工作电压高得多的过电压产生。如自然界的雷击,称为大气过电压或外过电压。又如电力系统本身操作导致参数变化引起振荡的过渡过程,称为操作过电压或内过电压。这些过电压如不加防护而完全用设备本身的绝缘去承受,将使设备的造价高到无法承受的地步。

所以要研究各种过电压的特点及形成条件,研究各种保护装置及其保护特性,研究电压、绝缘、保护三者之间的绝缘配合问题。

4. 电磁环境问题

高电压下的电磁环境问题可分为电磁兼容与生态效应两个方面。

(1) 电磁兼容:电磁兼容问题在电子设备日益广泛应用的今天已经很热门了,高电压、高场强下各种电磁干扰信号更强,电磁兼容问题也就更突出。高电压、高场强下的电磁干扰形式主要有静电感应、无线电干扰、电视干扰、地电位浮动、传导干扰、可听噪声干扰等。在高电压测试技术中的抗干扰与这里的消除干扰、抗干扰有密切的联系,也有所不同。

(2) 生态效应: 500 kV 输电线档距中央正下方的地面工频电场最大场强规定不得超过 100 V/cm ,但随离开输电线距离的增加,地面场强衰减很快,这种场强当然是低压线路所没有的。特高压输电线路下的地面场强规定要求与此相同, 110 kV 、 220 kV 线路下的地面场强要小一些。

20 世纪 70 年代初,苏联、西德、美国、法国、西班牙、加拿大、瑞典等国都对高压线路、变电站的工作人员及附近居民长期在电场下的健康情况进行了考察,以及病理学研究,至今未发现在 200 V/cm 电场下有什么差异。

美、日等国对动物(白鼠、小型哺乳动物、鸟类、蜜蜂)进行的研究也未得出任何统计性的差异,但是鸟类往往会回避在带电的高压线上栖息。对作物、林木的研究表明,即便在 765 kV 线路下, $7\sim 8\text{ kV/m}$ 的场强不大可能影响作物生长。虽然在树顶处 $20\sim 25\text{ kV/m}$ 场强下,树枝端部有电晕烧伤,但这种烧伤对树木生长并无影响。

电磁环境问题本教材暂不展开论述。

0.4 高电压下的特殊现象及其应用

每门学科都有各自的理论、现象,高电压学科的特有现象可以举出许多,其中一些已得到应用,并有很好的发展前景,成为国内外广泛开展研究的方向。

1. 静电技术及其应用

电除尘器效率达 99% 以上,在国际上已得到普遍应用,在我国也成为大力发展的新型环保产品。电除尘器在大型发电厂已成为与汽轮机、锅炉、发电机并称的四大主要设备。脉冲电晕放电也成为烟气处理中脱硫脱硝的有效方法。另外,在污水处理、选矿、印刷、纺织、喷漆、喷雾、食品保鲜等方面,各种利用电晕与静电现象制成的设备也得到了广泛的应用。基于介质阻挡放电的臭氧产生方法,成为臭氧发生器最主要的技术方案。