

第 1 章

柔性交流输电系统概述

1.1 现代电力系统概述

1.1.1 输电技术的发展历史

自从 1831 年法拉第发现电磁感应定律以来,电能成为主要的二次能源,至今已有 180 多年的历史。其间,电力工业多次经历革命性的发展。

1882 年,托马斯·爱迪生(Thomas Edison)在美国纽约建成了世界上第一个完整的电力系统。这是一个直流系统,由一台直流发电机通过 110V 地下电缆供给半径约为 1.5km 范围内的 59 个用户,负荷全部是白炽灯。但是,直流系统的局限性很快显露出来,由于缺少适当的直流变压技术以及直流损耗大等原因,初期的直流输电只能采用较低的电压,在较小的范围内供电。

在托马斯·爱迪生开发直流输电系统的同时,卢西恩·高拉德(L. Gaulard)和约翰·吉布斯(J. D. Gibbs)开发了交流变压器和交流输电技术。后来,乔治·西屋(George Westinghouse)获得了这些新设备在美国应用的权利,并以此为基础,于 1886 年研制出交流发电机和变压器,并在马萨诸塞州大巴灵顿(Great Barrington, Massachusetts)建立了一个由 150 个电灯构成的交流配电试验系统。1889 年,北美洲第一条单相交流输电线路在俄勒冈州(Oregon)的威拉姆特瀑布(Willamette Fall)和波特兰(Potland)之间建成并投入运行,输电电压为 4kV,距离为 21km。

1888 年,尼古拉·特斯拉(Nikola Tesla)获得了交流电动机、发电机、变压器和输电系统的若干专利。1891 年,德国劳芬电厂安装了世界上第一台三相交流发电机,并在劳芬电厂至法兰克福之间建成了世界上第一条三相交流输电线路,总长 175km,电压 15.2kV,输送功率为 200kW。

在 19 世纪 90 年代,关于采用直流输电还是交流输电的问题,曾有过激烈的辩论,但交流输电的诸多优势(如变压灵活,损耗低,交流电机简单、经济等)使其很快取得绝对优势。

输电距离和容量的增大推动了交流输电电压的不断增高。早期交流系统采用 12.44kV 和 60kV 的电压等级,1922 年增加到 165kV,1923 年增加到 220kV,1935 年增加到 287kV,1953 年提高到 330kV,1965 年提高到 500kV。1966 年,加拿大魁北克水电局

(Hydro Quebec)的第一条 765kV 线路投入运行。

为规范应用,工业界已将高压交流(high voltage alternative current, HVAC)输电的电压等级标准化,西方国家规定高电压(HV)等级有 115kV、138kV、161kV 和 230kV,超高压(EHV)等级有 345kV、500kV 和 765kV。我国的高电压等级为 110kV、220kV 和 330kV,超高压等级为 500kV 和 750kV。

从 20 世纪 60 年代中期始,前苏联、美国、日本和欧洲一些国家着手研究特高压(UHV, 不低于 1000kV 的交流和 800kV 的直流)输电技术,并先后试建了特高压输电线路。但后来由于各种原因,这些国家都放弃或搁置了特高压交流输电技术的研究,已建成的特高压输电线路也多降压至 500kV 或更低运行。我国分别于 2008 年和 2010 年建成了 1000kV 特高压交流线路和 ± 800 kV 特高压直流线路,成为目前世界上唯一有特高压线路商业化运行的国家。

20 世纪 80 年代末期,随着电力电子技术、信息技术和控制理论的进一步发展和综合应用,出现了柔性交流输电系统(flexible AC transmission system, FACTS)的概念。它旨在提高交流电网的可控性,实现灵活的潮流控制和最大化电网的传输能力,它将推动交流输电系统向一个更高级的阶段发展。

虽然在电力工业发展初期,直流输电不敌交流输电而在很长一段时间内默默无闻,但对其技术的研究一直在进行,特别是自 20 世纪 50 年代开始,随着汞弧阀换流技术的逐步成熟和应用,高压直流(high voltage direct current, HVDC)输电重新进入人们的视野,并与 HVAC 输电并肩发展。第一个现代商用的 HVDC 输电工程于 1954 年在瑞典建成,在随后的 20 多年里,共投运了 10 多个基于汞弧阀换流的 HVDC 输电工程。20 世纪 60 年代中后期发展起来的晶闸管及其换流技术为 HVDC 的发展注入了新的更大的活力。1970 年前后,第一个采用晶闸管的变换器组成功应用于瑞典 Gotland 直流输电系统的扩展工程;1972 年,首个采用晶闸管的全固态商业化 HVDC 系统,即伊尔河(Eel river)背靠背(back to back, B2B)工程投入商业运行。随着直流换流设备价格的降低、尺寸的缩小以及可靠性的提高, HVDC 输电的应用逐步扩大,因在大容量远距离架空线和水下/地下输电以及异步联网等领域具有独特优势而受到青睐。到 2004 年, HVDC 诞生 50 年之际,世界上已成功投运 95 项商业 HVDC 工程,总传输容量达到 70GW,最高电压等级达到 ± 600 kV(2010 年突破 ± 800 kV)。随着更新电力电子器件和输电材料的产生,加上制造和控制等技术的发展, HVDC 技术也处于快速变革之中,如对更高电压等级(± 1000 kV 和 ± 1200 kV)的 HVDC 输电技术的研究,以及较近发展的轻型 HVDC(HVDC light/plus)输电技术,将不断提高 HVDC 的输电能力,使其具有更好的性能和更高的可靠性。

FACTS 和 HVDC 都是基于电力电子技术而发展起来的,它们之间既有共同点,又有区别,是现代电力工业中重要的两种互补性支撑技术,它们与新兴的信息技术、通信技术以及先进的控制理论相结合,将不断推动输电技术的完善和发展。

1.1.2 现代电力系统的主要特点

经过 100 多年的发展,现代电力系统与早期相比,已经发生了巨大的变化。总的来说,有如下特点。

1. 多种一次能源发电

在发电领域,呈现出利用多种一次能源发电的局面。如传统的火力发电、水力发电、核

能发电,随着技术的不断进步,其容量提高,效率增高,污染下降;可再生能源发电,如风能发电、太阳能发电、地热发电等技术不断完善,实用化程度提高,得到越来越广泛的应用;另外,还出现了一些很有前景的新型电源,如燃料电池、超导储能和超级电容等,它们将不断推动电力工业的变革和发展。

2. 机组容量增大

由于电力需求的增加,同时为了提高能量转换效率,发电机组的单机容量和大机组在总装机容量中所占的比例不断提高。2004年,世界上单机容量最大的火电和水电机组达到1300MW和700MW,分别安装在美国的Cumberland电厂和我国的三峡水电站,而80%以上的核电主力机组容量都超过300MW。

3. 高电压、远距离和大规模互联电网输电

由于一次能源和电力负荷在地理位置上的分离,并为提高资源利用效率和输电可靠性等,互联电网成为现代电力系统最重要的特征之一。世界上已经形成多个横跨多国的超大规模电网,如美加联合电网,2011年,其装机容量已分别达到了11.4亿kW。在我国,2011年的总装机容量约为10.56亿kW,已完成了各大区电网的交直流互联,形成全国联网的巨型交直流电力系统。

随着电网规模的扩大,HVAC和HVDC的电压等级和输电容量不断提高。HVAC的电压等级从数千伏的高压发展到数百千伏的超高压,以至超过兆伏的特高压。HVDC的最高运行电压达到 $\pm 800\text{kV}$,总的传输容量超过70GW。

同时,由于现代负荷中心远离能源中心,远距离大容量输电成为必然,输电线路的长度也不断增加。如前苏联1150kV线路的输电距离达到1900km,我国“西电东送”走廊的输电距离大部分在1000km以上。

4. 更重视电能质量(power quality)问题

由于自动化生产线、精密加工工业、计算机系统、机器人等先进技术的广泛使用,电能质量恶化带来的影响加大,对电能质量要求不断提高。而另一方面,随着各种新型用电设备,尤其是电力电子设备应用于电网,带来了大量的谐波污染,电能质量恶化。用户电力(custom power)技术的发展为提高电能质量和供电可靠性提供了一种新的技术前景。

5. 自动化水平大大提高

发电、输电、配电和用电一般称为电力系统的一次侧,对应地,将对电网一次侧进行控制、操作的自动化和信息系统,称为二次侧。近半个世纪以来,随着计算机、通信技术和控制理论的发展与应用,电力系统二次侧得到了巨大的发展。

现代电网的结构越来越复杂,为了维持其高效和可靠运行,需应用大量的自动化监测、分析、通信、调度、控制以及管理设备和系统,如机组励磁控制、继电保护、能量管理系统/监控与数据采集(energy management system/supervisory control and data acquisition,EMS/SCADA)、广域测量系统(wide-area measurement system, WAMS)、区域稳定控制、管理信息系统(management information system, MIS)等,它们已经成为现代电网不可缺少的组成部分。

6. 电力工业引入市场化机制

20世纪80年代以来,许多国家的电力工业都在进行打破垄断、解除管制、引入竞争、建立电力市场的电力体制改革,目的在于更合理地配置资源,提高资源利用率,促进电力工业

与社会、经济、环境的协调发展。在我国,电力工业快速发展的同时,电力体制改革也逐步深入,电力工业以“公司制改组,商业化运营,法制化管理”为改革目标的基本取向,“十五”期间初步实施了“厂网分开,竞价上网”的发电侧市场化改革。电力工业市场化发展趋势,不仅促进电网运营和管理模式的变革,也对电力系统的相关支撑技术提出了新的要求。

7. 电力工业面对新的外部环境制约

随着电力需求的增长、电网规模的扩大,电力工业与社会经济各领域的协调发展成为重要的课题之一,诸多新的问题提上日程。

(1) 环境污染

电力工业是污染物排放较多的行业,其中火电厂的环境问题尤为突出。在我国,目前的主要难题包括:火电厂二氧化硫尚未得到有效控制,在酸雨问题突出和污染负荷集中的城市和地区已成为电力发展的制约因素;一些位于城市附近的老机组设备陈旧、煤耗高、除尘设备落后、烟尘排放超标量大。环境问题已成为制约电力发展的主要因素之一。

(2) 能源产地和主要利用能源的经济发达地区分布不平衡

在我国,火电、水电仍占总电力的绝大部分(超过 98%),而煤炭和水力资源多分布在西部和北部,与东部和南部等主要的经济发达、能源消耗量大的地区相距甚远,能源输送路线比较长,占去国家相当大的运力。“全国联网,西电东送”是我国能源政策的重要组成部分,预计到 2020 年,西电东送的总容量将达到约 1 亿 kW,这对电网建设和安全运行提出了强大的挑战。

(3) 电力设施占用土地资源

建设发电厂、输电走廊、变电站以及供电电缆沟等,将占用更大量的土地资源;而随着地球人口的增多、工业化速度的加快和城市的扩张,土地资源缺乏成为越来越严重的制约。

8. 大停电事故将带来灾难性后果

尽管现代电网的运行和管理水平得到了长足发展,但仍不能避免大电网发生瓦解性的崩溃事故,而且因为电网规模巨大、地域宽广和区间耦合性增强,偶发性的事故如果控制不当,反而会导致灾难性的大面积停电,造成巨大的经济损失和社会混乱。2003 年发生在美加联合电网的“8·14”大停电事件即是明证。该事件造成 100 多座电厂跳闸,损失负荷 61.80GW,停电范围 9300 多平方英里,涉及美国的 8 个州和加拿大的 2 个省,受影响的居民约 5000 万人,直接经济损失达数百亿美元,美国的商业经济中心纽约在停电 29 小时后才恢复供电。

1.2 输电网互联带来的挑战

1.2.1 电网互联带来的好处和挑战

现代电网通过互联,形成了越来越大的巨型电力系统。电网互联带来的好处主要有如下方面。

(1) 为能源的远距离传输奠定了基础

由于一次能源产地和负荷中心往往不在同一个地区,客观上存在大范围传输电能的要求,而电能传输的可靠性高、经济性好,是实现远距离能量传输的最佳方式。

(2) 提高了供电可靠性

在发电电源和用户负荷之间,电网起着一个大容量“电源池”的作用,通过适当的控制措施,使得电源与负荷各自的变动(甚至故障)对彼此的影响大大减小。就负荷而言,实现了多路供电,各个电源在紧急情况下可以相互支援,可大大提高供电可靠性和电能质量。

(3) 可实现大范围的能源资源优化配置和规模经济效益

电网互联带来的经济性优势是多方位的。首先,可以充分利用成本较低的发电资源和采用高效率的大型发电机组,达到发电成本的最小化;其次,可利用各地区间负荷时间特性上的差异,减小全网负荷峰谷差,实现地区间电力的平衡和经济调度;再者,可以减小系统整体必需的备用容量;此外,电网互联后,有利于安排机组的检修,提高系统的抗冲击能力和运行灵活性。电网规模越大、自动化水平越高,其资源优化配置的能力和可获得规模经济效益就越大,这是推动电网互联最重要的推动力之一。

(4) 互联电网是电力市场的物质基础

电网是电能的运载工具,也是电力市场的“物流通道”,电力的交易是通过电网来实现的,因此电力市场的前提之一是联通的电力传输网络。可以说,电网有多大,电力市场的规模才可能有多大。实现电网互联是电力市场化改革的必然要求。

(5) 电网互联可以取得巨大的环保效益

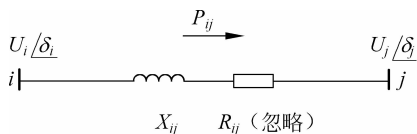
目前世界上的电力主要来自于火电,但燃煤发电,会排放大量的 CO_2 和 SO_2 等有害气体,是造成“温室效应”和酸雨等环境问题的罪魁祸首。电网互联后,通过更多地采用水力发电、风力发电等相对清洁的发电方式,有利于降低环境污染。

电网互联在获得诸多好处的同时,也带了一系列挑战性问题,如系统规划与资源配置的优化问题,互联电网的协调组织,运行与管理问题,大系统的动态行为与安全性分析问题,潮流控制问题,改善稳定性以提高传输容量的问题等。以下主要讨论潮流控制和改善稳定性以提高传输容量两个问题,这也是 FACTS 技术所关注的核心问题。

1.2.2 输电网的潮流控制

1. 潮流控制的基本概念及其必要性

如图 1-1 所示,电网中的两个母线节点通过高压输电线路互联,在忽略线路损耗的情况下,线路上的有功潮流由下式决定:

$$P_{ij} = \frac{U_i U_j}{X_{ij}} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (1-1)$$


式中, P_{ij} 为从节点 i 流向节点 j 的有功功率; U_i 、 U_j , δ_i 、 δ_j 分别为节点 i 和节点 j 的母线电压幅值和相角; X_{ij} 为联络线的等效电抗值。由上式可见,线路上传输的有功功率主要是由节点电压和线路阻抗决定的。

图 1-1 电网中两个母线节点通过输电线路互联的潮流

在大型电网中,节点电压幅值受很多因素的制约(如负载和设备的耐压等),一般在额定值附近变化不大;如果不考虑电网中的无功补偿器、移相器等调节设备,电网的“自然”潮流分布将主要决定于功率注入的位置和大小,以及网络拓扑和参数。以图 1-2 所示的 3 节点系统为例,节点 A、B 接有发电机组,设其注入的有功功率分别为 680MW 和 600MW,节点 C 接入 1280MW 的负荷,忽略传输线路的损耗,线路 A—C、A—B 和 B—C 的电抗分别为

60Ω 、 60Ω 和 40Ω , 连续负载能力均为 700MW , 各节点电压均为额定值 220kV , 则系统的“自然”潮流分布如图 1-2 所示。可见, 线路 B—C 上功率最大, 已经超过了允许的连续载流能力, 需要通过适当潮流控制措施来降低其传输的功率。

除了受制于线路载流能力而需要进行潮流调整以外, 还有很多因素, 使得对大电网的自然潮流分布进行控制成为必要, 如:

(1) 减少环流, 实现最优潮流, 降低网络损耗

在复杂电网中, 存在大量的电磁环网, 如果参数设置不当, 会出现环流, 增加损耗。同时, 功率从一个节点流向另一个节点也会有多个通道, 不同的潮流分布方式对应不同的网络损耗, 如何实现损耗最小的潮流(最优潮流)成为潮流控制的重要目标之一。

(2) 稳定性考虑

不同的潮流运行方式下系统的稳定水平是不同的, 希望通过潮流控制, 使系统运行于最有利于稳定性的潮流模式下。同时, 在扰动发生后, 通过对电网潮流进行动态控制, 能大大提高系统的稳定性。

(3) 电力交易市场化的基础

电网是电力交易的“物流平台”, 电力市场进一步的发展将要求对潮流进行精确和灵活的控制。

2. 潮流控制的方法

总体来说, 电力系统的潮流是由电源、负载和网络三者共同决定的。其中负荷(除去少量负荷可采用就地无功或/和有功电源进行可控补偿外)一般是不可控的; 而大电源(如火力、水力和核能发电厂)的布局是在电网规划过程中, 根据一次能源位置以及多种决定技术经济指标的因素来确定的, 投入运行后, 主要由系统调度和机组控制来动态调节其输出, 能在一定程度上对电网潮流进行控制; 分散发电电源, 虽然其可控制性和灵活性较好, 但相对来说, 容量较小, 对主干电网的潮流控制能力较弱。以下主要介绍通过对输电网的调节实现潮流控制的方法, 并以图 1-2 所示问题为例说明其基本原理。

(1) 增建新的传输线路

于节点 A、C 之间增建一回线路, 其参数与原线路相同, 则线路 A—C 之间的等效电抗由 60Ω 减为 30Ω , 相当于电气距离缩短一半。假设各节点的电压幅值不变, 可计算出新的潮流分布, 如图 1-3 所示。可见, 过载线路 B—C 上的潮流已经降低到允许值以下, 当然, 也可以在节点 A 和 C 之间增建一条 HVDC 线路, 达到同样的潮流控制目的。

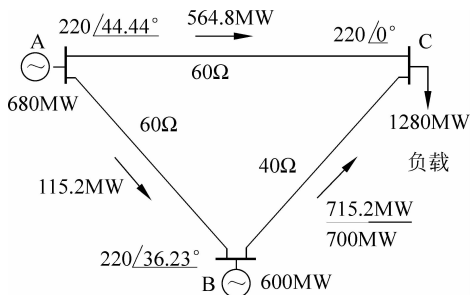


图 1-2 3 节点电力系统的自然潮流分布

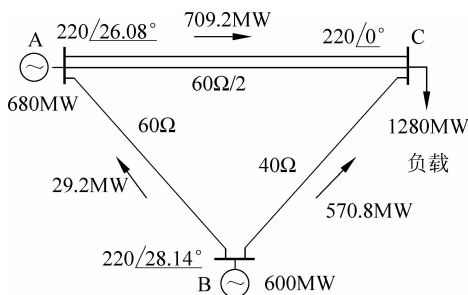


图 1-3 3 节点电力系统在节点 A、C 间增建一回线路后的潮流分布

(2) 串联阻抗补偿

串联补偿的等效阻抗可为容性或感性,图 1-4 所示为在线路 A—C 靠近节点 A 处加入容性串联补偿,设等效容抗值为 -4.2Ω (对应补偿度为 7%),则线路 A—C 的等效电抗下降到 55.8Ω 。假设各节点的电压幅值不变,可计算出新的潮流分布如图 1-4 所示。可见,线路 B—C 上的潮流下降到允许范围,线路 A—C 上的载流量上升。

如果在线路 B—C 靠近节点 B 处加入感性串联补偿,设等效电抗值为 4Ω ,则线路 B—C 的等效电抗上升至 44Ω ,相当于电气距离增加了 10%。假设各节点的电压幅值不变,可计算出新的潮流分布如图 1-5 所示,同样达到了降低线路 B—C 上潮流的目的。

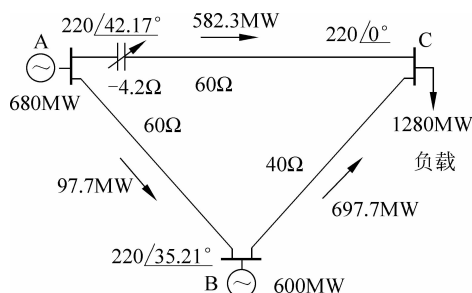


图 1-4 3 节点电力系统在线路 A—C 上采用容性串联补偿后的潮流分布

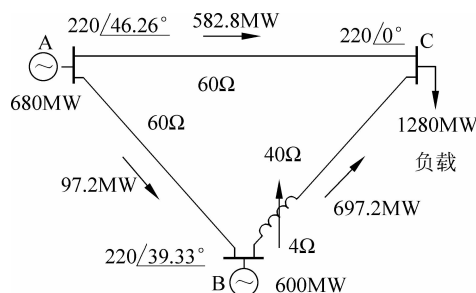


图 1-5 3 节点电力系统在线路 B—C 上采用感性串联补偿后的潮流分布

图 1-4 和图 1-5 所示的串联阻抗补偿也可视为串联无功电压补偿,即相当于在线路上串入一个幅值为 IX_c (其中 I 为线路电流有效值)、相位超前(对应感性阻抗)或滞后(对应容性阻抗)线路电流相量 90° 的无功电压源。

(3) 采用移相器(phase shifter)

如图 1-6 所示,在线路 A—C 靠近节点 A 处加入移相器,设节点 A 的电压相位经过移相器后增加 4.04° ,同样假设各节点的电压幅值不变,可计算出新的潮流分布如图 1-6 所示。可见,其效果与在线路 A—C 间加入容性串联补偿的潮流方式(图 1-4)类似,同样达到了降低线路 B—C 上潮流的目的。

(4) 在线路中间采用并联无功补偿

根据线路的功角关系式(1-1)可知,改变两端母线的电压幅值也可以调整潮流,但由于电力系统对母线电压有严格的限制(如静态误差在 5% 以内,暂态波动范围不超过 10%),因此,依靠调节两端母线电压来控制潮流的能力有限。一种常用的方法是在线路上电压降落最大处,即沿线电压最低点进行并联无功补偿,提高该点的电压,达到提高线路传输功率的目的。对于上述的 3 节点系统,线路 A—C 上的电压降落最大处即为其中点,因此,可如图 1-7 所示,在线路 A—C 的中点将线路一分为二,接入并联无功补偿设备。并联无功补偿设备可以视为一个无功电流源,通过调节注入的无功电流大小,改变注入点母线的电压,从而达到调节电网潮流的目的。

设补偿前线路 A—C 两端母线电压相量为 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_C$,其间的相角差为 δ_1 ,则线路 A—C 中点的电压为

$$\dot{U}_m = (\dot{U}_A + \dot{U}_C)/2 = \dot{U}_C \cos \frac{\delta_1}{2}$$

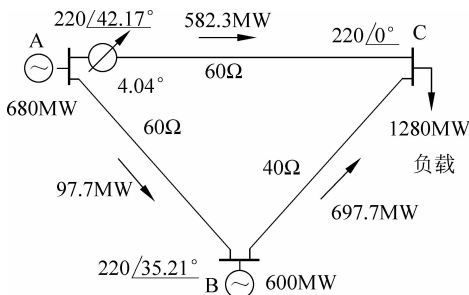


图 1-6 3 节点电力系统在线路 A—C 上采用移相器后的潮流分布

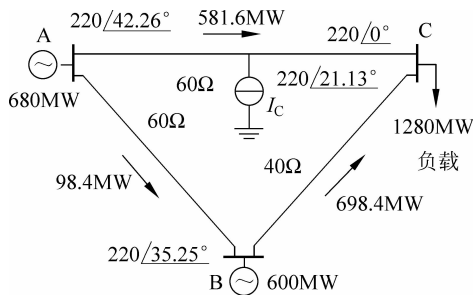


图 1-7 3 节点电力系统在线路 A—C 电气中点采用并联无功补偿器后的潮流分布

设并联无功补偿能将中点电压幅值提升到与其他节点电压相同,则新的潮流分布如图 1-7 所示。可见,线路 B—C 上的潮流已经降低到允许的范围。此时,线路 A—C 两端及其中点电压的相量关系如图 1-8 所示,其中 $\dot{U}_{Ac}$ 、 $\dot{U}_{Cc}$ 、 $\dot{U}_{mc}$ 分别为补偿后节点 A、C 和线路 A—C 中点的电压相量, δ_{1c} 为 $\dot{U}_{Ac}$ 与 $\dot{U}_{Cc}$ 之间的相角差。设 $\dot{U}_m$ 和 $\dot{U}_{mc}$ 仍在一个方向上,则线路 A—C 中点电压的幅值增加量

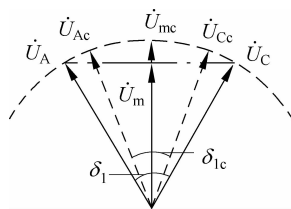


图 1-8 线路 A—C 两端及其中点电压的相量关系

$$\Delta U = U_{mc} - U_m = 220 \left(1 - \cos \frac{\delta_1}{2} \right) \approx 16.34 \text{ kV}$$

(5) 采用综合潮流控制器

将以上介绍的各种方法总结为表 1-1。可见,它们都是通过改变潮流基本公式(1-1)中的某一项参数来达到潮流控制的目的。它们也可以组合起来应用,形成综合解决方案。在本书稍后还将会介绍一些同时调节公式(1-1)中多个参数的综合型潮流控制器,如统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)、线间潮流控制器(interline power flow controller, IPFC)等,它们能更灵活地控制潮流。以 IPFC 为例,它接在两回或多回线路上,通过在各线路“插入”一定幅值和相位的串联电压源,能达到在两回或多回交流输电线路之间交换潮流目的。如图 1-9 所示,如在节点 A 的两回出线,即 A—C 和 A—B 之间安装一台 IPFC,将线路 A—B 上的部分潮流(如 20MW)“抽”到线路 A—C 上,则同样可以解决前述潮流控制问题。在实际应用中,需要综合考虑各种潮流控制手段的经济技术指标,选择现实可行、技术效用最佳的解决方案。

表 1-1 各种潮流控制方法的比较

方 法	控 制 参 数	技术经济性
增建 HVAC/HVDC 线路	线路等效阻抗	投资大、建设周期长,受输电走廊的限制,运行和控制简单,可靠性最高
采用串联阻抗补偿器	线路等效阻抗	投资小,运行和控制相对较复杂
采用移相器	相角差	投资小,运行和控制相对较复杂
采用并联补偿器	节点电压	投资小,运行和控制相对较复杂
采用综合型潮流控制器	多个参数	投资较小,运行和控制相对复杂

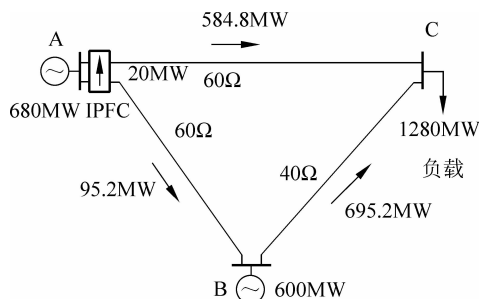


图 1-9 采用线间潮流控制器(IPFC)实现网络潮流控制

1.2.3 提高传输容量

1. 决定传输容量的因素

电网的传输容量(transfer capacity)是指电网在一系列的约束条件下能够传输功率的能力。限制电网传输容量的主要因素包括热稳定极限、设备绝缘限制、理想线路的极限传输功率和电力系统稳定性限制。

1) 热稳定极限

运行中的电力设备由于存在内部损耗,通常会发热并升温,而且发热量随着载流量的增大而增加,一旦载流量过大、温升达到其上限,就会破坏设备本身的机械和物理特性,使其不能正常工作。对应该上限温升值的传输功率即称为设备的热稳定极限。在电网中,主要是架空线的热容量限制传输容量。架空线的热容量是导线物理参数(材料、尺寸、分裂方式等)、环境温度、风况、运行历史和离地高度等多种因素的函数。在规划输电线路时,一般是在比较保守的基础上,即考虑(统计意义上的)最恶劣环境下,根据其在电网中承担的功率设计物理参数,也就是说,实际运行时的传输容量一般远低于热稳定极限,存在较大的冗余。

由于实际运行中,线路的传输热容量还受诸多时变性环境因素的影响,因此可以采用一些离线或在线的检测设备和计算程序,动态地跟踪线路自身和环境参数的变化,实时地获取线路的热稳定极限。

2) 设备绝缘限制

电力设备的耐压值都是有限的,在增加传输功率时,必须保证无论是在稳态下还是暂态过程中所有的设备都工作于允许的电压限值以内(如不超过额定值的10%)。由于电力设备的绝缘设计通常有很大的冗余,并且电网的运行电压是严格限定的,因此稳态运行时一般不会突破电压限制。需要注意的是确保动态和瞬时的电压在限值以内。采用无缝避雷器(或具有内部无缝避雷器的线路绝缘子)和在变电所安装过压抑制器可以大大提高线路和变电所的耐压能力。

3) 理想线路的极限传输功率(或静态稳定极限功率,static stability limit)

根据式(1-1)可知,一条无损的理想线路上能流过的最大功率(也称为静态稳定极限功率)为

$$P_{ij\max} = \frac{U_i U_j}{X_{ij}} \quad (1-2)$$

此时对应线路两端节点电压的相位差为 $\pi/2$,可见极限传输功率与线路的等效阻抗(电气距

离)成反比,通过调节等效阻抗可以改变该极限值。

4) 电力系统稳定性限制

交流互联电网实现功率传输的基本条件是系统稳定,即运行于正常条件下的平衡状态且在遭受干扰后能够恢复到容许的平衡状态。对于发电机,稳定是维持同步运行的问题,即系统中所有的同步发电机在满足一定的电压、频率约束下能彼此保持同步运行;对于负荷,稳定是维持电压在其正常范围之内,避免负荷电压的崩溃。稳定性不仅包括稳态平衡和无扰动情况下维持正常运行(机组同步运行和负荷电压正常)的特性,也包括在各种扰动或故障打破稳态平衡后系统重新恢复正常运行能力。由于电力设备的热稳定极限和绝缘极限一般保守度较大。长期以来,稳定性是限制电网传输容量最现实的因素。

电力系统的稳定性是机组、电网和负荷的整体特性,但根据系统结构和运行模式的不同,电力系统不稳定可以通过不同的方式表现出来,包括:

(1) 转子角稳定性(rotor angle stability)

转子角稳定性是电力系统中互联的同步发电机保持同步运行的能力。

根据干扰特性,它分为小信号(小扰动)稳定和暂态(大扰动)稳定两种。

(2) 电压稳定性(voltage stability)

电压稳定性是电力系统在正常运行条件下和遭受扰动之后系统所有母线都持续保持可接受电压的能力,同样可分为小扰动和大扰动两种。

(3) 中期和长期稳定性(mid-term and long-term stability)

引入这两个概念是为了研究电力系统遭受严重扰动后的动态响应及其导致的稳定性问题。

长期稳定性主要是伴随大规模系统扰动而产生的较慢的、长期的现象,及其所引起的大大的、持续的发电与用电之间的功率不平衡问题。

中期响应是介于短期和长期响应之间的系统过渡过程。

一般典型的时段范围是:短期(或暂态)对应 0~10s,中期对应 10s 至数分钟,长期对应数分钟至数十分钟。然而应该注意到,短期、中期和长期的划分首要是根据所分析的现象和所采用的系统描述,特别是所关注的系统暂态和机组振荡的描述,而不是单纯地根据时段范围。

通常所说的频率稳定性(frequency stability),即系统在遭受重大扰动后功率严重不平衡,甚至被解列成多个孤岛后,电网频率重新恢复到可接受水平的能力,一般归为中、长期稳定性的范畴。

电力系统稳定性是一个整体问题,但要很简单地研究它却并不实际,考虑到电力系统不稳定的不同形式和影响因素,将电力系统稳定性进行适当分类是很必要的。但是应该注意到,各种稳定性问题之间存在重叠,有些是相互扩展而没有清晰的界限。分类处理虽然有利于将复杂的问题简化和分解,但在实际应用中,应始终牢记,稳定性是电力系统的整体特性,需要对其所有方面进行观察和分析。关于电力系统稳定性更进一步的阐述,可参考文献[2,3]。

2. 提高电网传输容量的方法

为了有效利用电力传输设备,需尽量提高电网的传输极限。通过以上分析可知,影响电网传输容量的因素很多。但一般来说,稳定性限制决定的传输容量极限小于其他因素,如热