

清华大学电气工程系列教材

高电压工程	梁曦东 等
电路原理 (第2版)	江缉光 等
电机学	孙旭东 等
电机学电子课件	孙旭东 等
电机学学习指导	孙旭东 等
柔性交流输电系统的原理与应用 (第2版)	谢小荣 等
电力设备的在线监测与故障诊断	王昌长 等
可编程控制器原理及系统设计	于庆广
电力电子电路的计算机仿真 (第2版)	朱桂萍 等
电动机控制	黄立培
高电压试验技术 (第2版)	张仁豫 等
电力系统调度自动化	吴文传 等
高压断路器原理和应用	徐国政 等
过电压防护及绝缘配合	张伟钹 等
电力系统稳定 (待出版)	闵 勇
电力系统分析 (待出版)	孙宏斌 等

清华大学出版社数字出版网站

WQBook 书文
www.wqbook.com

ISBN 978-7-302-35474-1



9 787302 354741 >

定价: 48.00元

清华大学电气工程系列教材

柔性交流输电系统的原理与应用 (第2版)

Flexible AC Transmission Systems:
Principles and Applications
(Second Edition)

谢小荣 姜齐荣 编著
Xie Xiaorong Jiang Qirong

清华大学出版社

内 容 简 介

柔性交流输电系统(FACTS)技术自 20 世纪 80 年代末诞生以来,得到了迅速发展,成为电力工业近 20 年来发展最快和影响最广的新兴技术领域之一。本书系统地阐述了 FACTS 的原理与应用,首先介绍 FACTS 的基本概念、发展历史与现状,及其与高压直流输电(HVDC)的关系;然后简要总结了作为 FACTS 技术基础的大功率电力电子技术;继而逐章论述并联型 FACTS 控制器(如 SVC、STATCOM、BESS、SMES 等)、串联型 FACTS 控制器(如 GCSC、TSSC、TCSC、SSSC 等)、复合型 FACTS 控制器(如 TCVR/TCPAR、UPFC、IPFC 等)及其他 FACTS 控制器(如 NGH SSR 阻尼器、TCBR、SCCL 等),重点介绍其基本原理、主电路结构、运行特性、控制方法和应用情况;最后介绍 FACTS 技术应用于配电网而产生的用户电力(亦称 DFACTS)技术,重点讨论了两类典型的用户电力控制器,即有源电力滤波器(APF)和动态电压调节器(DVR)。

本书可供电气工程专业高年级本科生和研究生使用,也可供 FACTS 领域的广大科研和工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

柔性交流输电系统的原理与应用/谢小荣,姜齐荣编著.--2 版.--北京:清华大学出版社,2014

清华大学电气工程系列教材

ISBN 978-7-302-35474-1

I. ①柔… II. ①谢… ②姜… III. ①柔性交流输电—电力系统—高等学校—教材 IV. ①TM721.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 031212 号

责任编辑:孙 坚 张占奎

封面设计:傅瑞学

责任校对:刘玉霞

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:23.75 字 数:573 千字

版 次:2006 年 9 月第 1 版 2014 年 8 月第 2 版 印 次:2014 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:48.00 元

产品编号:056695-01

前言

电力输电系统已进入大系统、超高压远距离输电、跨区域联网的新阶段,社会经济的发展促使现代输电网的管理和运营模式发生变革,对其安全、稳定、高效、灵活运行控制的要求日益提高,从而急需发展新的调节手段,提高其可控性;另一方面,控制理论、大功率电力电子、计算机信息处理等技术的蓬勃发展又为输电控制手段的改善和升级换代不断提供新的可能。在这种情形下,美国 N. G. Hingorani 博士首先较完整地提出了柔性交流输电系统(flexible AC transmission system, FACTS)的概念。FACTS 自诞生始就受到各国电力科研院所、高等院校、电力公司和制造厂家的重视,得到了广泛的研究和迅速的推广应用,成为电力工业近 20 年来发展最快和影响最广的新兴技术领域之一。目前已发明了近 20 种 FACTS 控制器,部分已经商业化并取得良好的成效,成为解决现代电网诸多挑战的重要手段之一。从长远来看,FACTS 技术的作用将更为深远,正如 IEEE/PES 的“DC 与 FACTS 分委会”所指出的:“FACTS 与先进控制中心和整体自动化等技术所带来的非常长远的优越性已经被世人广泛认可,它们预示着电力传输系统一个新时代的到来。”

FACTS 的基本内涵是:基于采用现代大功率电力电子技术构成的各种 FACTS 控制器,结合先进的控制理论和计算机信息处理技术等,实现对交流输电网运行参数和变量(如电压、相角、阻抗、潮流等)更加快速、连续和频繁的调节,即所谓柔性(或灵活)输电控制,进而达到提高输电系统运行效率、稳定性和可靠性的目的。因此,FACTS 的基石是大功率电力电子技术,核心是 FACTS 控制器,关键是对输电网参数和变量的柔性化控制。FACTS 技术通过适当的改造,还可应用于配电和用电网络,以改善电能质量和提供用户定制电力。

笔者长期从事 FACTS 技术领域的研究工作,曾参与研制了国内首台大容量(20Mvar) STATCOM 装置,2003 年开始在清华大学开设研究生课程“柔性输配电系统(FACTS/DFACS)的原理及应用”,本书即是在该课程讲授过程中逐渐成稿的。

全书共分 12 章。第 1 章概述 FACTS 和定制电力技术,并讨论 FACTS 和 HVDC 的关系。第 2 章简要介绍作为 FACTS 和定制电力技术基石的电力电子。第 3 章先概述并联无功补偿的作用、历史与现状以及补偿器的分类,然后重点介绍 SVC 的原理、特性、控制和应用。第 4 章论述 STATCOM 的基本原理、数学建模、特性分析、控制设计及应用情况。第 5

章对 SVC 和 STATCOM 的基本特性进行比较,研究它们的系统级控制策略共性,并讨论综合并联补偿系统。第 6 章介绍将 STATCOM 与蓄电池和超导磁体结合起来构成的电池储能系统和超导储能系统。第 7 章介绍变阻抗型串联 FACTS 控制器,重点讨论晶闸管控制串联电容补偿器(TCSC)的原理、特性、控制和应用。第 8 章介绍静止同步串联补偿器(SSSC)。第 9 章介绍静止电压/相角调节器。第 10 章介绍统一潮流控制器及其他复合补偿器。第 11 章主要介绍电能质量和定制有特殊用途的 FACTS 控制器,即 NGH 次同步谐振阻尼器、晶闸管控制的制动电阻和短路电流限制器。第 12 章概述了电能质量和定制电力技术,并重点介绍两类典型的电能质量控制器,即并联型有源电力滤波器和串联型动态电压调节器。

本书的第 2~7 章由谢小荣编写,第 8~12 章由姜齐荣编写,第 1 章为二人合写。本书力求体现 FACTS 领域中研究开发和工程技术人员的研究成果,它应该属于在该领域中奋力开拓的国内外科技工作者。

在本书编写过程中,选修编者所开设课程的研究生在文献检索、资料汇编和图文整理等方面给予了大量的帮助,严干贵博士阅读全书并提出了宝贵意见,同时得到了韩英铎院士、王仲鸿、陈建业、崔文进、童陆园和刘文华等教授的指导,清华大学电机工程系与柔性输配电系统研究所也给予了支持,在此一并表示诚挚的感谢。

本书可供高年级本科生和研究生使用,也可供 FACTS 领域的广大科研和工程技术人员参考。

由于作者水平有限,书中不妥和错误之处恳请广大读者批评指正。

作 者

2014 年 5 月于清华园

目录

第1章 柔性交流输电系统概述	1
1.1 现代电力系统概述	1
1.1.1 输电技术的发展历史	1
1.1.2 现代电力系统的主要特点	2
1.2 输电网互联带来的挑战	4
1.2.1 电网互联带来的好处和挑战	4
1.2.2 输电网的潮流控制	5
1.2.3 提高传输容量	9
1.3 传统解决方法及其局限性	12
1.4 新的解决方法——FACTS的诞生	12
1.4.1 FACTS出现的背景及其必然性	12
1.4.2 FACTS的历史、现状与前景	13
1.5 FACTS及其控制器概述	14
1.5.1 FACTS基本概念	14
1.5.2 FACTS控制器的基本类型	15
1.5.3 主要FACTS控制器的定义	17
1.5.4 FACTS的优越性	27
1.6 FACTS与HVDC	31
1.6.1 HVDC的发展历史回顾	31
1.6.2 HVDC的基本原理及其特点	32
1.6.3 HVDC的特点和等价距离概念	34
1.6.4 HVDC的传统应用领域和FACTS技术的影响	36
1.6.5 HVDC与FACTS的关系	38
1.7 电能质量与定制电力	40
1.7.1 电能质量问题概述	40

1.7.2 定制电力及其控制器	47
参考文献	52
第2章 电力电子学基础	56
2.1 概述	56
2.2 电力电子器件	56
2.2.1 发展历史与现状	56
2.2.2 分类	59
2.2.3 特性参数	60
2.2.4 主要器件简述	61
2.2.5 FACTS 控制器中的电力电子器件	67
2.3 电力电子变换器概述	70
2.3.1 电力电子变换器及其分类	70
2.3.2 电压/电流源型变换器的一些基本概念	71
2.4 电压源型变换器	72
2.4.1 基本原理	72
2.4.2 单相变换器	73
2.4.3 三相二电平变换器	75
2.4.4 三相多电平变换器	81
2.4.5 脉宽调制技术	88
2.4.6 多电平变换器和 PWM 技术在 FACTS 中的应用	92
2.4.7 如何增大变换器容量	93
2.5 电流源型变换器概述	95
2.6 电压源型变换器与电流源型变换器的比较与综合	96
2.6.1 VSC 和 CSC 的比较	96
2.6.2 混合变换器概念	97
2.6.3 阻抗型变换器概念	98
参考文献	99
第3章 并联补偿与静止无功补偿器	101
3.1 并联补偿概述	101
3.2 并联补偿的作用	101
3.2.1 输电系统并联补偿和动态性能控制	102
3.2.2 输电线路分段和中点并联补偿	103
3.2.3 并联补偿提高系统电压稳定性	104
3.2.4 并联补偿提高输电系统暂态稳定性	106
3.2.5 并联补偿提高输电系统振荡稳定性	108
3.2.6 负荷的三相不平衡补偿	109
3.2.7 电力系统谐波的并联补偿	110

3.3	电力系统并联补偿技术的历史与现状	110
3.4	并联补偿器的种类	112
3.5	静止无功补偿器	113
3.5.1	并联饱和电抗器	113
3.5.2	晶闸管控制/投切电抗器	114
3.5.3	晶闸管控制的高阻抗变压器	118
3.5.4	晶闸管投切电容器	119
3.5.5	组合式 SVC 概述	124
3.5.6	固定电容-晶闸管控制电抗型 SVC	125
3.5.7	晶闸管投切电容-晶闸管控制电抗型 SVC	127
3.5.8	机械式投切电容-晶闸管控制电抗型 SVC	129
3.6	SVC 的控制策略简介	130
3.6.1	面向电力系统的对称控制策略	130
3.6.2	面向负荷的控制策略	132
3.7	SVC 的应用概述与工程举例	134
3.7.1	SVC 应用概述	134
3.7.2	美国 Eddy 变电站高压直流联络线的并联无功补偿	134
3.7.3	武钢硅钢厂 SVC 工程	136
	参考文献	139
第 4 章	静止同步补偿器 STATCOM	141
4.1	概述	141
4.2	STATCOM 工作原理简述	141
4.3	国产 $\pm 20\text{Mvar}$ STATCOM 的建模、分析与控制	142
4.3.1	$\pm 20\text{Mvar}$ STATCOM 简介	142
4.3.2	主电路结构	144
4.3.3	主电路建模	144
4.3.4	特性分析	155
4.3.5	控制系统	157
4.3.6	保护系统	162
4.3.7	运行与测试	163
4.4	国内外 STATCOM 应用工程概述及实例	165
4.4.1	国内外 STATCOM 应用工程概述	165
4.4.2	日本关西电力系统 Inuyama 开关站 $\pm 80\text{Mvar}$ STATCOM	169
4.4.3	NGC-ALSTOM 的 $\pm 75\text{Mvar}$ 链式 STATCOM	175
	参考文献	183
第 5 章	综合并联无功补偿系统	186
5.1	概述	186

5.2	SVC 与 STATCOM 的基本特性比较	186
5.2.1	输出特性比较	186
5.2.2	响应速度比较	188
5.2.3	损耗特性比较	189
5.2.4	有功功率调节能力	190
5.2.5	交流系统不对称时的运行特性	190
5.2.6	其他方面的比较	190
5.3	SVG 的系统控制	191
5.3.1	SVG 的一般控制策略	191
5.3.2	电压控制策略及其闭环动态模型	192
5.3.3	STATCOM 和 SVC 提高电压稳定性的比较	195
5.3.4	恒电压控制模式下 STATCOM 和 SVC 对提高传输容量的比较	196
5.3.5	暂态稳定控制	198
5.3.6	阻尼控制	200
5.3.7	无功储备控制	202
5.3.8	多目标控制策略	203
5.3.9	SVG 控制系统构成	204
5.4	综合并联无功补偿	205
	参考文献	208
第 6 章	并联储能系统	209
6.1	概述	209
6.2	电池储能系统	210
6.2.1	技术特点	210
6.2.2	基本原理与模型	211
6.2.3	控制系统	212
6.2.4	应用情况	215
6.3	SMES	215
6.3.1	技术特点	215
6.3.2	基本结构	216
6.3.3	运行特性与控制简述	218
6.3.4	在电力系统中的应用	218
6.3.5	国内外研究与应用状况	219
6.3.6	应用前景展望	221
	参考文献	222
第 7 章	变阻抗型串联补偿器	225
7.1	电力系统串联补偿概述	225
7.1.1	基本概念	225

7.1.2 串联补偿的工作原理	226
7.2 串联补偿的作用	227
7.2.1 串联补偿与潮流控制	227
7.2.2 串联补偿提高系统电压稳定性	228
7.2.3 串联补偿提高输电系统暂态稳定性	229
7.2.4 串联补偿提高输电系统振荡稳定性	230
7.2.5 串联补偿抑制次同步振荡	230
7.3 电力系统串联补偿技术的历史与现状	233
7.4 可控串联补偿的方法和串联补偿器的种类	234
7.5 GTO 控制串联电容器	235
7.6 晶闸管投切串联电容器	238
7.7 晶闸管控制串联电容器	240
7.7.1 基本原理	240
7.7.2 TCSC 的电路分析	241
7.7.3 稳态基波阻抗模型	243
7.7.4 TCSC 的动态特性	245
7.7.5 $U-I$ 工作区与损耗特性	246
7.7.6 谐波特性	248
7.7.7 同步信号	248
7.7.8 实用的 TCSC 电路结构及其参数选择	249
7.8 GCSC, TSSC 和 TCSC 次同步谐振特性	251
7.9 GCSC, TSSC 和 TCSC 的控制	253
7.9.1 控制系统概述	253
7.9.2 GCSC 的内环控制原理	254
7.9.3 TCSC 的内环控制原理	255
7.9.4 TCSC 的系统级控制概述	259
7.10 TCSC 的应用工程概述及实例	261
7.10.1 国内外 TCSC 应用工程概述	261
7.10.2 中国南方电网平果变电站 TCSC 工程	261
参考文献	271
第 8 章 静止同步串联补偿器	274
8.1 工作原理	274
8.2 SSSC 装置对系统功角特性的影响	274
8.3 SSSC 装置的主电路	277
8.4 SSSC 装置的控制	281
8.5 SSSC 与 TCSC 的比较	284
8.6 混合静止同步串联补偿器	286
参考文献	286

第9章 静止电压/相角调节器	288
9.1 电压/相角调节的作用	288
9.2 电压/相角调节的方法	290
9.3 TCVR/TCPAR 的工作原理、控制方法	291
参考文献	300
第10章 统一潮流控制器及其他复合补偿器	302
10.1 概述	302
10.2 统一潮流控制器	303
10.2.1 工作原理	303
10.2.2 UPFC 对输电系统功率特性的影响	304
10.2.3 控制方法及其改善电力系统稳定性和传输能力的分析	308
10.2.4 示范工程	313
10.3 线间潮流控制器	316
10.4 通用型多功能 FACTS 控制器	321
参考文献	322
第11章 其他 FACTS 控制器	324
11.1 晶闸管控制的制动电阻	324
11.2 短路电流限制器	327
参考文献	332
第12章 DFACTS 与定制电力技术	334
12.1 有源电力滤波器	334
12.1.1 有源滤波器主电路拓扑结构	336
12.1.2 有源滤波器的控制策略	337
12.1.3 功率电路的设计	346
12.1.4 有源滤波器的技术要求	347
12.1.5 工程实例	347
12.2 动态电压调节器	351
12.2.1 动态电压调节器的结构分析	351
12.2.2 动态电压调节器的控制	354
12.2.3 DVR 设计实例	358
参考文献	362
缩略词表	364

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±800kV 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±600kV(2010 年突破±800kV)。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(±1000kV 和±1200kV)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。

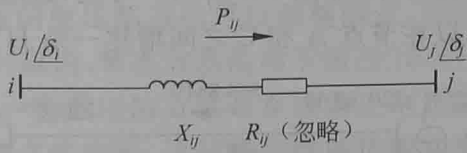
电网互联在获得诸多好处的同时,也带了一系列挑战性问题,如系统规划与资源配置的优化问题,互联电网的协调组织,运行与管理问题,大系统的动态行为与安全性分析问题,潮流控制问题,改善稳定性以提高传输容量的问题等。以下主要讨论潮流控制和改善稳定性以提高传输容量两个问题,这也是 FACTS 技术所关注的核心问题。

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:

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



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

总体上来说, 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。

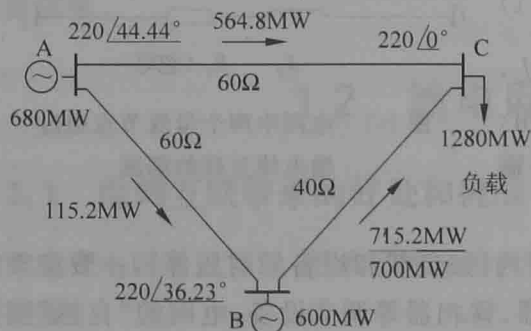


图 1-2 3 节点电力系统的自然潮流分布

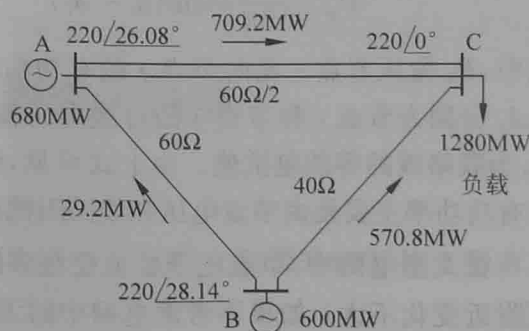


图 1-3 3 节点电力系统在节点 A、C 间增建一回线路后的潮流分布