柔性电力系统中的电力电子技术

——电力电子技术在电力系统中的应用

陈坚　编著

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

柔性电力系统中的电力电子技术

——电力电子技术在电力系统中的应用

陈　坚　编著

机 械 工 业 出 版 社

本书是作者在以往多年为研究生讲授“高等电力电子学”及“电力电子技术在电力系统中的应用”两门课程讲义的基础上编写的。本书基于电力系统的基本运行特性和安全、经济、高效、优质运行要求，论述了电力电子技术实现电力系统运行参数快速、灵活、精确、协调控制的基本原理，并在此基础上深入分析了采用各类电力电子变换器和补偿控制器后，电力系统的运行特性。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业和相近专业本科生选修课程用书或研究生教学用书，也可作为从事电力系统设计、电力电子装备研制和运行管理的工程师的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

柔性电力系统中的电力电子技术：电力电子技术在电力系统中的应用/陈坚编著. —北京：机械工业出版社，2012.1
ISBN 978-7-111-36565-5

Ⅰ.①柔… Ⅱ.①陈… Ⅲ.①电力电子技术－应用－电力系统 Ⅳ.①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 242208 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：牛新国 责任编辑：任 鑫 责任校对：张 媛
封面设计：路恩中 责任印制：李 洋
三河市国英印务有限公司印刷

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷
184mm×260mm · 23 印张 · 569 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-36565-5
定价：59.80 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
社 服 务 中 心：(010)88361066
销 售 一 部：(010)68326294
销 售 二 部：(010)88379649
读者购书热线：(010)88379203

网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

前　言

现代电力系统是历史上逐步扩建发展起来的地域辽阔、结构庞大、设备众多、运行要求极高的大系统，它的安全、经济、高效、优质运行具有重大的意义。实现全系统发电、输电、配电和负载用电的安全、经济、高效、优质运行的关键技术是对系统中各部分、各类电力设备运行参数能实现快速、灵活、有效的协调控制。为此，在电力系统中应有大量的能快速响应运行指令要求的调控设备和正确的调控策略，通过实时、同步地检测各地运行参数的相量和相关的运行信息，经过分析、处理、预估、决策，经高速信息通道对各地发电设备、输配电设备和调控设备的运行参数实施快速、灵活、有效的协调控制，才有可能实现整个电力系统整体协调的安全、经济、高效、优质运行。

采用大功率半导体开关器件构成开关电路和电力电子变换器，可以高效、便捷地实现各类电力电子变换；对电力电子开关电路和开关型电力电子变换器进行实时、适式的控制，可以使之输出任意频率、任意波形的电压和电流，且其幅值和相位均可精确、快速地调控。因而可以构成各类电力电子补偿控制器，并按系统运行指令要求，调控电力系统中各节点并联等效阻抗和线路串联阻抗，调控系统中的节点电压和支路电流的幅值和相位，调控发电机、储能系统以及电力电子补偿控制器注入系统节点的电流或注入输电线路的电压幅值和相位，调控有功、无功功率，最终实现电力系统的安全、经济、高效、优质运行。

从20世纪60年代初至今近50年间，电力电子技术的应用始于各行各业用电设备的电力电子变换电源（相控整流电源、相控交流-交流直接变频电源、中频感应加热电源，中小功率开关电源以及恒频恒压逆变电源）和电力机械变速传动控制所需的变压、变频电源。从20世纪80年代开始，电力电子技术的应用已经逐渐扩展到发电、输配电和负载用电整个电力系统，电力电子技术已成为现代电力系统柔性化和智能化水平继续发展、实现全系统协调控制和安全、经济、高效、优质运行的基础技术。

电力系统中采用各种电力电子变换器和电力电子补偿控制器的共同特点是：通过改变电力电子开关器件的通、断状态，控制电力电子开关电路输出的电压、电流、功率或等效阻抗，从而实时精确地调控电力系统的运行参数、潮流和运行工况，满足系统运行要求。电力电子开关型调控系统，更适合采用先进的、复杂的控制策略，实现众多被控对象有多目标控制功能的智能化协调控制。

在交流输电系统中，引入并联、串联和综合电力电子补偿控制器可以显著改善交流输电的可控性，提高交流输电的极限容量，改善交流输电系统的运行稳定性和经济性，使交流输电系统发展成控制灵活的柔性交流输电系统（Flexible AC Transmission System，FACTS）。在发电、输电、配电和负载用电整个电力系统中广泛采用电力电子技术、引入各类电力电子变换器和补偿控制器，可以有效地改善、优化电力系统的运行结构，为电力系统提供更多快速、有效、经济、可靠的控制手段，显著地提高电力系统的可控性，使整个电力系统实现全局性的“安全、经济、高效、优质运行”，使传统电力系统发生革命性的变革，

逐步发展成为智能化的柔性电力系统。这一发展过程同时也会为电力电子技术的发展带来新的机遇,推动电力电子技术向更高的水平发展。

本书是在作者多年给电气工程及其自动化专业研究生讲授“高等电力电子学”、“电力电子技术在电力系统中的应用”课程授课内容的基础上,经整理、增补、修改而成的。编写本书的指导思想是:基于电力系统的基本特性和“安全、经济、高效、优质”运行要求,向电气工程及其自动化专业在校研究生和从事电力系统电力电子新技术研究和实际运行工作的专业人士,系统、全面地介绍柔性电力系统中的电力电子技术的基本原理。全书共分7章:首先介绍了电力系统的基本特性和运行要求,接着介绍了电力电子变换器基本电路,然后依次介绍了发电、配电和储能系统中的电力电子技术,高压直流输电系统的基本原理,电力系统并联补偿控制,电力系统串联补偿控制和柔性电力系统中的综合补偿控制。

本书2009年初稿曾请清华大学韩英铎院士、华中科技大学程时杰院士审阅,征得一些原则性修改意见。上海大学陈伯时教授、华北电力大学肖湘宁教授在评审本书2010年第二稿时又提出了许多宝贵的修改意见,编者在此一并表示衷心感谢。

编者还要感谢华中科技大学电气与电子工程学院应用电子工程系和电力电子技术研究中心的相关同事在本书编写过程中给予的支持和帮助,感谢王雪帆、彭力、张宇、林新春、谭智力、赵阳等教授、副教授,胡国珍、陈宇、张锦等博士、硕士研究生以及张睿,感谢他(她)们在本书审阅、校对和书稿计算机录入工作中给予的帮助。编者还要对本书中引用的参考文献的作者表示衷心的感谢。编者殷切希望本专业师生和专业人士对本书的内容、结构、错误和不妥之处给予批评指正。

编 者

华中科技大学电气与电子工程学院

2011年5月

目　录

前言

第 1 章　电力系统的基本特性和运行要求 …… 1

1.1　电力系统的形成和发展 …… 1

1.2　电力系统的功率、功率损耗和电压损耗 …… 3

1.2.1　输电系统中的功率 …… 3

1.2.2　电力系统中的功率损耗 …… 8

1.2.3　电力系统中的电压损耗 …… 9

1.3　同步发电机的功角特性、运行稳定性和极限输电功率 …… 10

1.3.1　发电机的功角特性 …… 10

1.3.2　发电机运行稳定性和极限输电功率 …… 13

1.4　电力系统功率-电压特性 …… 18

1.4.1　负载的无功功率-电压特性 …… 18

1.4.2　线路电阻 $R \neq 0$ 时输电系统的功率-电压特性 …… 20

1.4.3　线路电阻 $R = 0$ 时输电系统的功率-电压特性 …… 24

1.5　电力系统潮流和潮流控制 …… 26

1.6　电力系统的特点、运行问题和基本要求 … 26

1.7　柔性电力系统的基本概念 …… 30

1.7.1　柔性交流输电系统和配电系统 …… 30

1.7.2　柔性发电及储能 …… 33

1.7.3　负荷柔性用电及电能质量控制 …… 34

第 2 章　半导体开关型电力电子变换 …… 36

2.1　实现电力变换和补偿控制的两类技术 …… 36

2.2　电力电子开关器件 …… 40

2.3　电力电子开关电路的基本类型 …… 45

2.4　电压变换基本开关电路 …… 46

2.4.1　直流降压(Buck)电路 …… 46

2.4.2　直流升压(Boost)电路 …… 46

2.4.3　交流-交流晶闸管相控电压变换电路 …… 47

2.5　三相桥晶闸管相控整流和有源逆变电路 …… 47

2.5.1　三相桥相控整流电路工作原理 …… 47

2.5.2　三相桥有源逆变电路工作原理 …… 55

2.6　交流-交流直接变频电路 …… 88

2.7　全控型开关管单相(H)桥脉宽调制(PWM)逆变和整流电路 …… 60

2.7.1　单相(H)桥逆变电路脉宽调制(PWM)基本原理 …… 60

2.7.2　单相(H)桥逆变电路正弦脉宽调制(SPWM) …… 61

2.7.3　单相(H)桥 SPWM 整流 …… 68

2.8　双电压源三相交流系统不同坐标系电压平衡方程 …… 69

2.8.1　三相静止 ABC 坐标系电压平衡方程 …… 69

2.8.2　两相旋标 d、q 坐标系和两相静止 α、β 坐标系的电压平衡方程 … 70

2.8.3　不同坐标系的功率方程 …… 76

2.8.4　d、q 坐标系和 α、β 坐标系的特点 … 77

2.9　全控型开关管三相桥脉宽调制逆变和整流电路 …… 78

2.9.1　三相桥逆变和整流正弦脉宽调制(SPWM)工作原理和控制系统 …… 78

2.9.2　三相桥逆变和整流电压空间矢量脉宽调制(SVPWM)工作原理和控制系统 …… 88

2.10　电压源型和电流源型逆变、整流电路的对比 …… 98

2.11　实现高压、大功率电力电子变换和补偿控制的技术途径 …… 99

第 3 章　发电、配电和储能系统中的电力电子技术 …… 115

3.1　同步发电机的直流励磁 …… 115

3.1.1　同步发电机励磁系统的功能 …… 115

3.1.2　同步发电机励磁系统的基本类型和电路结构 …… 117

3.2 变速恒频抽水储能电机和水力发电机交流励磁系统 …… 122
3.3 风力发电系统结构、类型和运行原理 …… 125
3.3.1 风力发电概况 …… 125
3.3.2 风力发电系统的结构 …… 126
3.3.3 风力发电机组的功率调节 …… 127
3.3.4 恒速恒频风力发电系统 …… 129
3.3.5 变速恒频风力发电系统 …… 129
3.4 并网运行的变速恒频双馈异步发电机工作原理和控制系统 …… 134
3.4.1 变速恒频双馈发电机在 d、q 坐标系的数学模型 …… 134
3.4.2 变速恒频双馈异步发电机稳态运行时定子、转子功率流向 …… 137
3.4.3 并网双馈异步发电机转子侧变流器按定子磁链定向的矢量控制系统 …… 138
3.4.4 并网双馈异步发电机定子侧变流器按电网电压定向的矢量控制系统 …… 142
3.5 太阳能光伏发电 …… 144
3.5.1 太阳能光伏发电概况 …… 144
3.5.2 太阳能光伏电池 …… 146
3.5.3 光伏发电系统 …… 148
3.5.4 光伏发电最大功率跟踪控制 …… 153
3.6 配电系统固态断路器和限流器 …… 155
3.6.1 机械-电子混合式断路器 …… 155
3.6.2 直流电路故障限流器 …… 157
3.6.3 交流电路故障限流器 …… 158
3.7 储能系统中的电力电子变换器 …… 162
3.7.1 储能系统的功能和类型 …… 162
3.7.2 超导储能系统 …… 163
3.7.3 电池储能系统 …… 173
第 4 章 高压直流(HVDC)输电系统 … 178
4.1 直流输电系统结构和优缺点 …… 178
4.1.1 直流输电系统的结构 …… 178
4.1.2 直流输电系统的优缺点 …… 181
4.2 高压直流输电系统中的相控整流和有源逆变电路特性 …… 184
4.2.1 三相桥式 6 脉波相控整流和有源逆变 …… 184
4.2.2 两个相差 30°的三相桥串联成两重化 12 脉波相控整流和有源逆变 …… 186
4.2.3 三个相差 20°的三相桥串联成三重化 18 脉波相控整流和有源逆变 …… 188
4.2.4 四个相差 15°的三相桥串联成四重化 24 脉波相控整流和有源逆变 …… 192
4.3 直流输电系统等效电路 …… 195
4.4 直流输电系统的基本控制原理和运行特性 …… 199
4.4.1 直流输电系统的等效直流电源和等效负载特性 …… 199
4.4.2 基本控制原理和运行限制 …… 200
4.4.3 整流器、逆变器的定电流控制和定关断角控制 …… 203
4.4.4 整流器和逆变器联合协调控制 … 205
4.5 采用全控型开关器件电压源型变换器的轻型直流输电系统 …… 207
第 5 章 电力系统并联补偿控制 …… 210
5.1 电力系统并联补偿器的类型和功能 … 210
5.1.1 并联补偿器的类型 …… 210
5.1.2 并联无功补偿的功能 …… 210
5.2 晶闸管控制阻抗型静止无功补偿器(SVC) …… 214
5.2.1 晶闸管投、切并联电容器(TSC) …… 214
5.2.2 晶闸管相控并联电抗器(TCR) … 217
5.2.3 TSC、TCR 投切、触发控制基本原理 …… 223
5.2.4 静止无功补偿器 SVC 控制策略 …… 225
5.3 晶闸管控制制动电阻 TCBR …… 228
5.4 电压源变流器型静止同步无功功率补偿器(STATCOM) …… 229
5.4.1 电压源变流器型静止同步无功功率补偿器(STATCOM)工作原理 …… 230
5.4.2 高压大容量静止同步无功补偿器(STATCOM)主电路结构 …… 233
5.4.3 STATCOM 在 d、q 坐标系下的数学模型 …… 238
5.4.4 STATCOM 的控制策略和控制系统 …… 244
5.5 STATCOM 与晶闸管控制阻抗型静止无功补偿器 SVC 的比较 …… 250

5.5.1 无功功率特性的比较 …… 251
5.5.2 对提高输电系统稳定性能力的比较 …… 251
5.5.3 其他方面的比较 …… 255
5.6 负荷三相不平衡补偿控制 …… 256
5.7 并联型无源电力滤波器 …… 258
5.7.1 并联型无源电力滤波器的类型 … 258
5.7.2 并联型无源 *LC* 滤波器基本特性 … 259
5.8 并联型有源电力滤波器 …… 264
5.8.1 并联型有源电力滤波器基本工作原理 …… 264
5.8.2 谐波电流 i_h 和无功电流 i_{1Q} 的检测 …… 265
5.8.3 控制系统框图 …… 266
5.8.4 并联型有源电力滤波器的主电路结构 …… 267
5.8.5 无源和有源电力滤波器的组合使用 …… 268
第 6 章 电力系统串联补偿控制 …… 271
6.1 串联补偿的类型和基本功能 …… 271
6.1.1 串联补偿的类型 …… 271
6.1.2 串联电容补偿的基本功能 …… 271
6.2 晶闸管控制阻抗型串联补偿器 …… 275
6.2.1 门极可关断(GTO)晶闸管控制串联电容器(GCSC) …… 275
6.2.2 晶闸管投、切串联电容补偿器(TSSC) …… 279
6.2.3 晶闸管控制串联电容补偿器(TCSC) …… 281
6.2.4 次同步谐振 …… 284
6.2.5 GCSC、TSSC、TCSC 基本的运行控制方案 …… 285
6.3 开关变流器型静止同步串联补偿器(SCCC) …… 287
6.3.1 静止同步串联补偿器基本原理 … 288
6.3.2 传输功率与传输角的函数关系 … 289
6.3.3 控制范围与额定容量 …… 292
6.3.4 提供有功补偿的能力 …… 293
6.3.5 抑制次同步谐振 …… 297
6.3.6 静止同步串联无功补偿器的内部控制和外部控制 …… 297
6.3.7 动态电压恢复器(DVR) …… 301
6.4 开关变流器型与可控阻抗型串联补偿装置的对比 …… 302
6.5 晶闸管控制的电压与相角调节器(TCVR,TCPAR) …… 303
6.5.1 电压与相角调节器的基本原理 … 303
6.5.2 采用相角调节器的潮流控制 …… 305
6.5.3 相角调节器改进暂态稳定性能 … 307
6.5.4 相角调节器抑制系统振荡 …… 308
6.5.5 功能要求的总结 …… 309
6.5.6 晶闸管控制的电压与相角调节器的电路结构 …… 309
6.6 开关变流器型电压和相角调节器 …… 314
6.7 复合型相角调节器 …… 315
第 7 章 柔性电力系统综合补偿控制 … 316
7.1 柔性交流输电系统(FACTS)控制器简介 …… 316
7.2 统一潮流控制器(UPFC) …… 319
7.2.1 基本工作原理 …… 319
7.2.2 常规的传输控制能力 …… 320
7.2.3 有功和无功潮流的独立控制 …… 326
7.2.4 UPFC 与串联补偿器和相角调节器的对比 …… 328
7.2.5 控制系统结构 …… 335
7.2.6 调节 *P*、*Q* 潮流的基本控制系统 …… 338
7.3 带有相移变压器的复合 UPFC 装置 … 341
7.4 线间潮流控制器(IPFC) …… 344
7.5 线间潮流控制器(IPFC)与 UPFC 组合运行 …… 346
7.6 统一(综合)电能质量控制器(UPQC) … 348
7.6.1 UPQC 的电路结构和功能…… 348
7.6.2 UPQC 的控制策略…… 350
7.7 柔性电力系统广域信息监测、通信和协调控制 …… 350
7.7.1 广域信息监测、通信和控制系统结构 …… 350
7.7.2 同步采样、同步相量形成和信息传输 …… 351
7.7.3 柔性电力系统广域信息监测、通信和控制功能 …… 353
柔性电力系统中电力电子装备和系统汇总表 …… 357
参考文献 …… 359

第 1 章　电力系统的基本特性和运行要求

1.1　电力系统的形成和发展

电能是现代社会中最重要的能源，电能的开发、生产和应用已逾百年。电能具有许多优点：它可以方便地转化为其他形态的能源，如机械能、热能、光能、化学能；其传输、分配易于实现；其应用方式、调节控制也较简便；电能又可以从其他各种形态的能源转换得到。因此，电能被广泛地应用于工农业、交通运输、商业、通信、科学技术、国防装备以及人类日常生活的各个领域。以电作为动力使产业机械化和自动化，实现了人类历史上第二次工业革命。以电力机械取代其他形式的动力机械（如电力机车取代蒸汽机车、内燃机车、汽车等）是降低总能源消耗的一个重要途径。电气化也是当今社会信息化的技术基础。根据美国工程院的评估，20 世纪人类取得的最伟大的技术成就是电气化。

发电、输配电和消费电能的各种电气设备连接在一起而组成的总体称为电力系统，电力系统由发电系统、输配电系统和用电系统三大部分组成。

1）发电系统：发电系统由发电机、励磁机、开关电器等设备组成。发电系统将一次能源（煤、石油、天然气、水力、风力、太阳能、化学能、核能等）转变为电能。

2）输配电系统：将发电机生产的电能经升压、传输、降压和配电送至负荷处。它包括升压、降压变压器和各种电压等级的输配电线路和开关电器。输配电系统又称为电力网。

3）用电系统：在用电设备处，电网的电能经调控或再经电压、频率变换后对用电设备（负载或负荷）供电，用电设备再将电能转变为最终所需要的其他形式的能源（机械能、热能、化学能、光能等），如驱动机械运动、车辆行驶、船舶航行所需的机械能，生活取暖、金属冶炼、机械锻压成型和焊接所需的热能，电解、电镀系统所需的化学能，照明系统的光能等。所以各行业中的各种自动化设备、信息系统也都依赖于具有一定品质、特性的电能供电。

如果把发电机的原动机及其相关设备（火电厂、水电厂、核电站、风电场、太阳能等电站中的锅炉、汽轮机、水轮机、风力机等动力部分）也包括进来，则上述系统称为动力系统。

图 1-1 给出了电力网、电力系统和动力系统总体示意图。

随着经济的发展和电力负荷持续增长，区域电网规模不断增大。为确保供电可靠性，通过区域电网间的互联逐步形成地区电网、全国联网以及跨国联网，从而形成联合电力系统。现代电力系统是历史上逐步扩建发展起来的地域辽阔、结构复杂的大系统。电力系统是分布在地域几百万，甚至上千万平方公里范围内，有数百台甚至上千台发电机，由几十条甚至上百条主干高压输电线路，连接各种不同电压等级的配电网络，对不可计数的各类用电负荷提供几千万 kW 甚至上亿 kW 电力的发电、输配电和用电系统。电力系统是国家最大的能源生产、传输和消费系统，其安全、经济、高效、优质运行具有重大意义。遍布全国的电力系统，在运行中会有各种不可避免的事故发生，严重危害国民经济和社会生活。电力系统中各

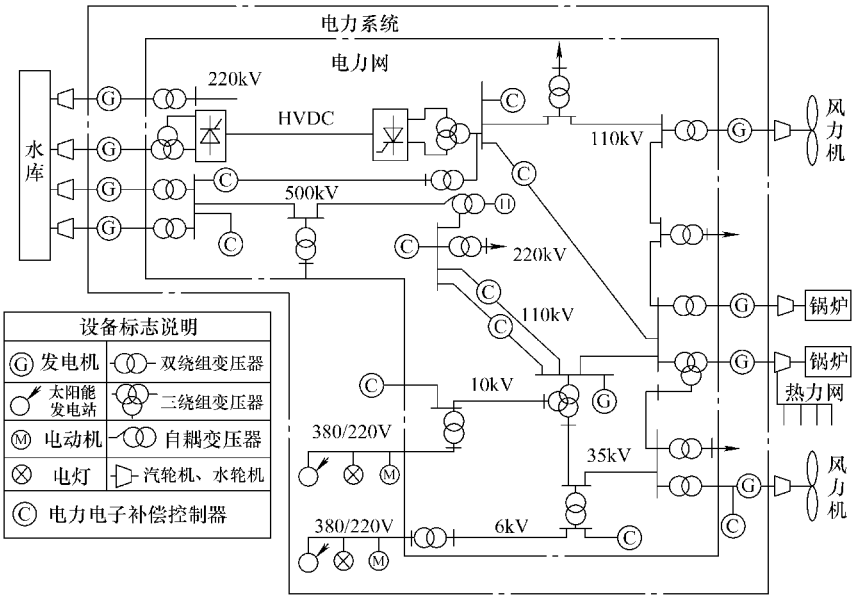


图 1-1 电力网、电力系统和动力系统总体示意图

级自动化设备和控制系统，应能对整个系统中发电机、输电线、配电网络和负荷的运行工况和电压、电流、功率等运行参数实现快速、有效地检测、调节和控制，才有可能保证电力系统中各环节设备的安全、经济、高效、优质运行。

至 2010 年底，我国全国电力系统装机容量已超过 9.62 亿 kW，其中火电约占 73.3%，水电约占 22.2%，核电约占 1.2%，风能发电约占 3.2%，太阳能发电量小于 0.1%。从 1996 年起，我国电网总装机容量及总发电量均居世界第二位。2007 年我国投产的装机容量达到 9100 万 kW，超过英国过去 140 年的全国装机总和。尽管我国电力工业发展迅速，但由于人口众多，到 2010 年底人均装机容量仅为 0.72kW，人均用电量仅为 2700kW · h 左右，约为世界平均水平的一半，为发达国家的 1/5 ~ 1/4。电力负荷增加空间巨大。根据有关部门进行的负荷预测，到 2020 年，我国装机规模将超过 14 亿 kW。

由于我国一次能源和负荷中心地域分布很不均衡，石油资源又较短缺，为在全国范围内实现资源优化配置，我国电力系统发展的国策是“优化发展煤电，有序发展水电，积极发展核电，加快发展气电，大力发展可再生能源（风力，太阳能，生物能）发电，大力新建超高压输电系统”，“西电东送，南北互供，全国联网”。

我国现有超高压电网主要为 500kV 交流和 ±500kV 直流系统，2010 年底我国已建成世界上第一个 ±800kV 的高压直流输电工程，2010 年已完成 1000kV 特高压交流输电工程。

到 2020 年西电东送的三条通道总容量将超过 1.2 ~ 1.5 亿 kW。按现有输电能力需要兴建 ±500kV 直流输电线 40 ~ 50 条，或 500kV 交流输电线 120 ~ 150 条。我国超高压电力系统的结构将得到极大的改善。

1.2　电力系统的功率、功率损耗和电压损耗

1.2.1　输电系统中的功率

图 1-2a 所示为最简单的输电系统中，首端（或送端）发电机 G_s 通过升压变压器 T-1、双回路输电线 L、降压变压器 T-2 接到输电线末端（或受端）电力系统等效发电机 G_r。如果末端等效发电机 G_r 容量相对于首端发电机而言很大，则首端发电机输送任何功率时，末端母线电压 $\dot{V}$ 的幅值、相位、频率均不变，即末端等效为无限大容量的母线。若首端发电机为隐极同步发电机，忽略发电机、变压器和输电线的等效电阻 R 时，可以得到系统的等效电路图 1-2b。图中 E 为首端发电机 G_s 的电动势、V 为末端母线的电压，X_g、X_{T1}、X_{T2} 和 X_L 分别为发电机、升压变压器、降压变压器和单回路输电线电抗，则系统的总电抗 X 为

$$X = X_g + X_{T1} + X_{T2} + X_L/2 \tag{1-1}$$

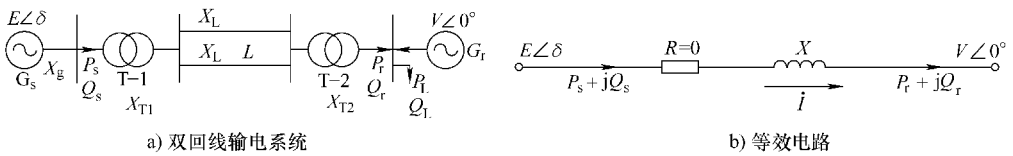


图 1-2　简单电力系统及其等效电路（$R=0$）

发电机、变压器和输电线路的电阻远小于电抗，因此，若图 1-2b 中全系统的等效电阻 R 近似为零，采用相对值（标幺值）表示电力系统的参数，由等效电路图 1-2b 可以得到

$$\dot{E} = \dot{V} + \mathrm{j}X\,\dot{I} = \dot{V} + \mathrm{j}X(\dot{I}_p + \dot{I}_q) \tag{1-2}$$

图 1-3a 和图 1-3b 给出电流 $\dot{I}$ 超前电压 $\dot{V}$ 和 $\dot{I}$ 滞后 $\dot{V}$ 两种工况下的电压、电流相量图。图中，$\dot{I} = \dot{I}_p + \dot{I}_q$。两种工况都是首端电动势 $\dot{E}$ 的相位超前末端电压 $\dot{V}$，相位超前角 δ 又称为功率角。若电压 $\dot{V}$ 相位为 0°，$\dot{V} = V\angle 0°$，则电动势 $\dot{E} = E\angle\delta$。图 1-3a 中电流 $\dot{I}$ 超前电压 $\dot{V}$ 的角度为 φ_2，$\dot{I}_q$ 对 $\dot{V}$ 而言为容性无功电流 $\dot{I}_{qC}$；图 1-3b 中电流 $\dot{I}$ 滞后电压 $\dot{V}$ 的角度为 φ_2，$\dot{I}_q$ 对 $\dot{V}$ 为感性无功电流 $\dot{I}_{qL}$。图 1-3a 和图 1-3b 中取 $\dot{V}$ 在水平坐标轴 $d(p)$ 方向，即 $\dot{V}$ 的相位角为零。取超前 $d(p)$ 轴 90°的方向为 q 轴（容性 q 轴）。因此 $\dot{I}$ 在 $d(p)$ 方向的分量为有功电流 I_p，$\dot{I}$ 在 q 轴方向的分量为无功电流 $\dot{I}_q$。对于图 1-3a 所示的工况，即 $\dot{I}$ 的相位角为 φ_2，则有

$$\dot{V} = V\angle 0° = V(\cos 0° + \mathrm{j}\sin 0°) = V$$

$$\dot{I} = I\angle\varphi_2 = I\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_2} = I[\cos\varphi_2 + \mathrm{j}\sin\varphi_2] = I\cos\varphi_2 + \mathrm{j}I\sin\varphi_2 = \dot{I}_p + \dot{I}_q \tag{1-3}$$

有功电流相量为

$$\dot{I}_p = I_p = I\cos\varphi_2 \tag{1-4}$$

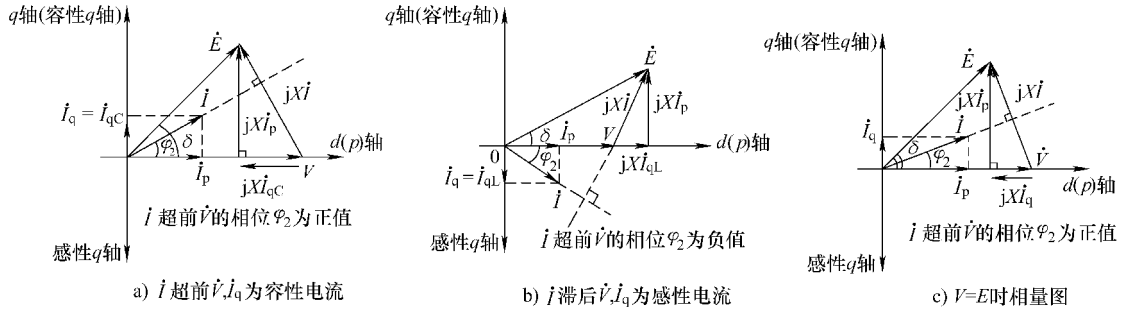


图 1-3 简单电力系统相量图($R=0$)

在图 1-3a 中 $\dot{I}_q$ 对 $\dot{V}$ 而言为容性(超前)无功电流相量，即

$$\dot{I}_q = \mathrm{j}I\sin\varphi_2 = \mathrm{j}I_q = \mathrm{j}I_{qC} \tag{1-5}$$

又有 $E\cos\delta = V - XI_{qC}$，输出容性(超前)电流 $\dot{I}_q$ 为

$$\dot{I}_q = I_{qC} = \frac{V - E\cos\delta}{X} = I\sin\varphi_2 \tag{1-6A}$$

又 $E\sin\delta = XI_p$，输出有功电流 I_p 为

$$I_p = \frac{E\sin\delta}{X} = I\cos\varphi_2 \tag{1-7A}$$

首端电源($\dot{E}$)经输电系统送至末端($\dot{V}$)的有功功率 P_r 为

$$P_r = VI_p = VI\cos\varphi_2 = \frac{EV}{X}\sin\delta \tag{1-8}$$

式中，P、V、E 为相对单位制中的标幺值。在相等单位制中，三相功率等于单相功率。

首端电源($\dot{E}$)经输电系统送到末端 V 的容性(超前)无功功率为

$$Q_{rC} = VI_{qC} = \frac{V(V - E\cos\delta)}{X} = VI\sin\varphi_2 > 0 \tag{1-9A}$$

容性(超前)无功功率 Q_{rC} 等效于负值的感性(滞后)无功功率 Q_{rL}，即 $Q_{rC} = -Q_{rL}$，图 1-3a 中，I 超前 V，电压 V 大于 $E\cos\delta$，首端电源(E)经输电系统送到末端电压 V 的感性(滞后)无功功率 Q_{rL} 为

$$Q_{rL} = -Q_{rC} = \frac{V(E\cos\delta - V)}{X} \tag{1-9B}$$

对于图 1-3b 所示工况，I_q 为滞后(感性)无功电流 I_{qL}，$E\cos\delta = V + XI_{qL}$。

输出感性(滞后)无功电流为

$$I_q = I_{qL} = \frac{E\cos\delta - V}{X} > 0 \tag{1-6B}$$

又 $E\sin\delta = XI_p$，则输出有功电流为

$$I_p = \frac{E\sin\delta}{X} \tag{1-7B}$$

图 1-3b 中，$\dot{I}$ 滞后于 $\dot{V}$，首端电源($\dot{E}$)经输电系统送到末端 V 处感性(滞后)的无功功

率 Q_r 为

$$Q_r = Q_{rL} = VI_{qL} = VI\sin\varphi_2 = \frac{V(E\cos\delta - V)}{X} \tag{1-9C}$$

图 1-3a 和图 1-3b 中，$\dot{E}$ 超前于 $\dot{V}$，即 $\delta > 0$ 时，由式(1-7A)、式(1-8)可知，$I_p > 0$，$P_r > 0$，首端电源 $\dot{E}$ 经线路向末端送电；若 $\dot{E}$ 滞后于 $\dot{V}$，即 $\delta < 0$ 时，由式(1-7A)、式(1-8)可知，$I_p < 0$，$P_r < 0$，则末端电源 $\dot{V}$ 经线路向首端送有功功率。因此在两个电源 $\dot{E}$、$\dot{V}$ 之间，有功功率总是从相位超前的电源送至相位滞后的电源。

如果 E 的数值比 V 大得很多，以至于 $E\cos\delta > V$（见图 1-3b），则首端电源 $\dot{E}$ 经输电系统送至末端的感性(滞后)无功功率 Q_{rL} 为式(1-9B)，$Q_{rL} > 0$；若 V 较大，以致 V 的数值大于 $E\cos\delta$，(见图 1-3a)，则首端电源 $\dot{E}$ 经输电系统送至末端 V 处的电流为容性无功电流，对应的容性(超前)无功功率 Q_{rC} 为式(1-9A)，等效于这时末端电源 $\dot{V}$ 向线路输出感性滞后无功功率 $Q_{rL} = -Q_{rC}$。因此感性(滞后)无功功率是从电压值高的电源输出到电压较低的电源。

在图 1-3b 中，首端发电机输出的有功功率 P_s 和感性(滞后)无功功率 Q_s 为

$$P_s = EI\cos(\delta + \varphi_2) = E\cos\delta I\cos\varphi_2 - E\sin\delta I\sin\varphi_2 = \frac{EV}{X}\sin\delta = P_r \tag{1-10}$$

首端发电机输出的感性(滞后)无功功率为

$$Q_s = EI\sin(\delta + \varphi_2) = E\sin\delta I\cos\varphi_2 + E\cos\delta I\sin\varphi_2 = \frac{E(E - V\cos\delta)}{X} \tag{1-11}$$

电力系统中电抗 X 所消耗的滞后无功功率 Q_X 为

$$Q_X = I^2X = \frac{P_r^2 + Q_r^2}{V^2}X \tag{1-12}$$

由图 1-3b 可知 $(IX)^2 = E^2 + V^2 - 2VE\cos\delta$，故有

$$Q_X = I^2X = \frac{E^2 + V^2 - 2VE\cos\delta}{X}$$

由式(1-9B)和式(1-11)有

$$Q_s - Q_r = \frac{E^2 + V^2 - 2VE\cos\delta}{X} = Q_X = I^2X = \frac{P_r^2 + Q_r^2}{V^2}X \tag{1-13}$$

由式(1-10)可知，发电机输出的有功功率 P_s 等于送至末端的有功功率 P_r(忽略了所有元件的电阻，故有功损耗 $I^2R = 0$)。由式(1-13)可知，发电机 G_s 产生的感性(滞后)无功功率 Q_s 经系统电抗 X 消耗 I^2X 后，向系统末端输出的感性(滞后)无功功率为 $Q_r = -VI\sin\varphi_2 = Q_s - Q_X = Q_s - I^2X$。

在实际电力系统中，如果像图 1-3b 中所示，流入末端的电流 $\dot{I}$ 滞后 $\dot{V}$，φ_2 为负值，则末端负荷的感性滞后无功负荷也由首端电源 $\dot{E}$ 经系统等效电抗 X 供给，则在输电系统中不仅引起较大的电压损耗，而且还有较大的有功功率损耗和无功功率损耗。

如果令电力系统中发电机、变压器、输电线路的全部无功损耗 I^2X 由输电线路首、末两

端电源($\dot{E}$ 、$\dot{V}$)平均负担，即令 $-Q_r = Q_s = I^2X/2$ ，则由式(1-9c)、式(1-11)或由图 1-3 可得到 $E = V$，这时如图 1-3c 所示。$\dot{I}$ 滞后$\dot{E}$ 的角度为 $\delta/2$ ，$\dot{I}$ 超前$\dot{V}$ 的角度也是 $\delta/2$ ，即 $\dot{I}$ 超前$\dot{V}$ 和$\dot{I}$ 滞后$\dot{E}$ 的角度都是 $\delta/2$ ，这时首、末两端的电源输出相等的感性(滞后)无功功率供输电系统中电抗的无功损耗。

在 d、q 坐标系中，取 q 轴超前 d 轴 90°，复数功率$\dot{S}$ 可以有两种表达式，即

$$(1)\ \dot{S} = \dot{V}\ \dot{I}^* = P + \mathrm{j}Q$$

$$(2)\ \dot{S} = \dot{V}^*\ \dot{I} = P - \mathrm{j}Q$$

式中，$\dot{I}^*$ 为电流$\dot{I}$ 的共轭相量；$\dot{V}^*$ 为$\dot{V}$ 的共轭相量；Q 为感性(滞后的)无功功率。若电流$\dot{I}$ 滞后电压$\dot{V}$ ，则有功功率 P 为正，感性(滞后的)无功功率也为正值。由$\dot{V} = V_d + \mathrm{j}V_q$；$\dot{I} = I_d + \mathrm{j}I_q$，有

(1)若令：

$$\dot{S} = \dot{V}\ \dot{I}^* = (V_d + \mathrm{j}V_q)(I_d - \mathrm{j}I_q) = (V_dI_d + V_qI_q) + \mathrm{j}(V_qI_d - V_dI_q) = P + \mathrm{j}Q \qquad (1\text{-}14)$$

则有功功率为

$$P = V_dI_d + V_qI_q \qquad (1\text{-}15\mathrm{A})$$

感性(滞后)无功功率为

$$Q = V_qI_d - V_dI_q \qquad (1\text{-}15\mathrm{B})$$

若取$\dot{V}$ 在 d 轴上，如图 1-3 所示，则 $V_d = V$，$V_q = 0$，这时取 $I = I_d + \mathrm{j}I_q$。I_q 为正值时则为容性(超前)无功电流，I_q 为负值时则为感性(滞后)无功电流。这时有 $\dot{S} = P + \mathrm{j}Q = VI_d - \mathrm{j}VI_q = V(I_d - \mathrm{j}I_q)$，有功功率：$P = V_dI_d = VI_d$；感性(滞后)无功功率：$Q = -V_dI_q = -VI_q$。上式中，$I_d$ 为与 V 同相的有功电流；I_q 为超前 V 的容性无功电流；$-I_q$ 为感性(滞后)无功电流。

在图 1-3b 中，I_d 为正，P 为正；I_q 为负(感性、滞后电流)，$Q = -VI_q$ 为正(感性、滞后无功功率)。

在图 1-3a 中，I_d 为正，P 为正；I_q 为正(容性、超前电流)，$Q = -VI_q$ 为负(容性、超前无功功率)。

(2)若令：

$$\begin{aligned}\dot{S} &= \dot{V}^*\ \dot{I} = (V_d - \mathrm{j}V_q)(I_d + \mathrm{j}I_q) = P - \mathrm{j}Q \\ &= (V_dI_d + V_qI_q) - \mathrm{j}(V_qI_d - V_dI_q)\end{aligned}$$

则有功功率为

$$P = V_dI_d + V_qI_q$$

感性(滞后的)无功功率为

$$Q = V_qI_d - V_dI_q$$

将以上 P、Q 表达式与式(1-15)对比可知，复功率$\dot{S}$ 的两种表达式$\dot{S} = \dot{V}\dot{I}^* = P + \mathrm{j}Q$ 和

$\dot{S}=\dot{V}^{*}\dot{I}=P-\mathrm{j}Q$ 中的 P、Q 是相同的。

图 1-4a 是一个更一般化带支路 Z_3 的双电源输电系统网络，以下分析不忽略输电线路的电阻时输电系统的功率特性。图 1-4b 和图 1-4c 分别为末端电源 $V=0$ 和首端电源 $E=0$ 时的等效电路，I_{11}、I_{21}是 $V=0$ 时的电流；I_{12}、I_{22}是 $E=0$ 时的电流。由叠加原理有

$$\dot{I}_1=\dot{I}_{11}-\dot{I}_{12};\quad \dot{I}_2=\dot{I}_{21}-\dot{I}_{22}$$

$$\dot{I}_{11}=\dot{E}_1/\left(\dot{Z}_1+\frac{\dot{Z}_2\dot{Z}_3}{\dot{Z}_2+\dot{Z}_3}\right)=E_1/Z_{11}$$

$$Z_{11}=\dot{Z}_1+\frac{\dot{Z}_2\dot{Z}_3}{\dot{Z}_2+\dot{Z}_3}$$

$$\dot{I}_{22}=\dot{V}/\left(\dot{Z}_2+\frac{\dot{Z}_1\dot{Z}_3}{\dot{Z}_1+\dot{Z}_3}\right)$$

$$=\dot{V}/Z_{22},\quad Z_{22}=\dot{Z}_2+\frac{\dot{Z}_1\dot{Z}_3}{\dot{Z}_1+\dot{Z}_3}$$

式中，Z_{11}、Z_{22}称为系统的输入阻抗。

又有 $\dot{I}_{21}=\dot{I}_{11}\dfrac{\dot{Z}_2\cdot Z_3}{Z_2+Z_3}\dfrac{1}{Z_2}=\dot{E}/\left(\dot{Z}_1+\dot{Z}_2+\dfrac{Z_1Z_2}{Z_3}\right)=\dot{E}/\dot{Z}_{21}$

$$\dot{I}_{12}=\dot{I}_{22}\frac{Z_1Z_3}{Z_1+Z_3}\frac{1}{Z_1}=\dot{V}/\left(\dot{Z}_1+\dot{Z}_2+\frac{Z_1Z_2}{Z_3}\right)=\dot{V}/\dot{Z}_{12}$$

式中，$\dot{Z}_{21}=\dot{Z}_{12}=Z_1+\dot{Z}_2+Z_1Z_2/Z_3$ 称为系统的转移阻抗。

因此

$$\dot{I}_1=\dot{E}/\dot{Z}_{11}-\dot{V}/\dot{Z}_{12}$$

$$\dot{I}_2=\dot{E}/\dot{Z}_{21}-\dot{V}/\dot{Z}_{22}$$

若取$\dot{V}$ 在水平轴方向上，$\dot{V}=V\angle 0^\circ=V$，$\dot{E}$ 超前$\dot{V}$ 相角为 δ，$\dot{E}==E\angle\delta=E(\cos\delta+\mathrm{j}\sin\delta)$。

若输入阻抗和转移阻抗为$\dot{Z}_{11}=Z_{11}\angle\varphi_{11}$，$\dot{Z}_{22}=Z_{22}\angle\varphi_{22}$，$\dot{Z}_{12}=\dot{Z}_{21}=Z_{12}\angle\varphi_{12}$，其中线路阻抗角分别为 $\varphi_{11}=\arctan X_{11}/R_{11}$，$\varphi_{22}=\arctan X_{22}/R_{22}$，$\varphi_{12}=\arctan X_{12}/R_{12}$，$X_{11}$、$X_{22}$、$X_{12}$、$R_{11}$、$R_{22}$、$R_{12}$分别为阻抗 Z_{11}、$\dot{Z}_{22}$、$\dot{Z}_{12}$的电抗和电阻，线路阻抗角的余角 $\alpha=90^\circ-\varphi$，如图 1-4d 所示。线路首端功率为

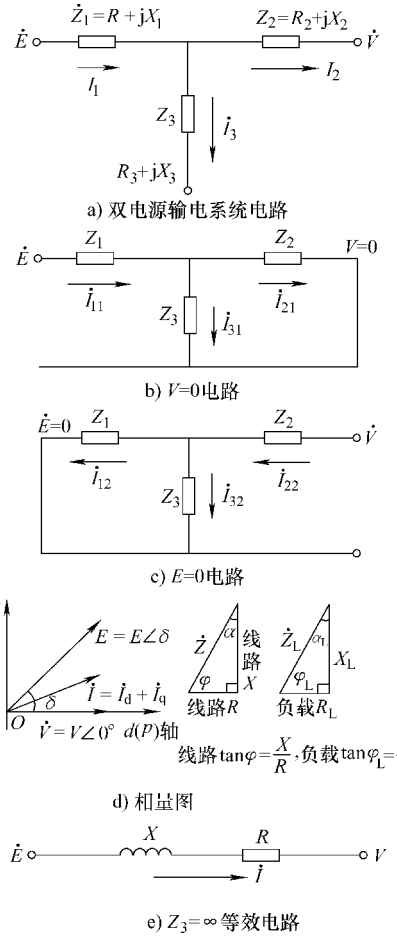


图 1-4　带支路的双电源输电网络

$$\dot{S}_s = \dot{E}\ \dot{I}_1 = E\angle\delta\left(\frac{\dot{E}}{\dot{Z}_{11}} - \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_{12}}\right)^* = E\angle\delta\left(\frac{E\angle -\delta}{Z_{11}\angle -\varphi_{11}} - \frac{V}{Z_{12}\angle -\varphi_{12}}\right)$$

$$= P_s + jQ_s = \frac{E^2}{Z_{11}}\angle\varphi_{11} - \frac{EV}{Z_{12}}\angle\delta + \varphi_{12} = \frac{E^2}{Z_{11}}(\cos\varphi_{11} + j\sin\varphi_{11}) - \frac{EV}{Z_{12}}[\cos(\delta + \varphi_{12}) + j\sin(\delta + \varphi_{12})]$$

$$P_s = \frac{E^2}{Z_{11}}\cos\varphi_{11} - \frac{EV}{Z_{12}}\cos(\delta + \varphi_{12}) \tag{1-16A}$$

$$Q_s = \frac{E^2}{Z_{11}}\sin\varphi_{11} - \frac{EV}{Z_{12}}\sin(\delta + \varphi_{12}) \tag{1-16B}$$

同理，由线路末端功率 $S_r = VI_2^* = V(\dot{E}/\dot{Z}_{21} - \dot{V}/\dot{Z}_{22})^*$ 可得到

$$P_r = -\frac{V^2}{Z_{22}}\cos\varphi_{22} + \frac{EV}{Z_{12}}\cos(\varphi_{12} - \delta) \tag{1-17A}$$

$$Q_r = -\frac{V^2}{Z_{22}}\sin\varphi_{22} + \frac{EV}{Z_{12}}\sin(\varphi_{12} - \delta) \tag{1-17B}$$

如果 Z_3 支路不存在，即 $Z_3 = \infty$，则 $Z_{11} = Z_{12} = Z_{22} = Z_1 + Z_2 = Z$,, $R_{11} = R_{12} = R_{22} = R_1 + R_2 = R$，$X_{11} = X_{12} = X_{22} = X_1 + X_2 = X$，$Z^2 = R^2 + X^2$，由于 $\dot{Z} = Z\angle\varphi = Z\cos\varphi + jZ\sin\varphi$，$R = Z\cos\varphi$，$X = Z\sin\varphi$，$\tan\varphi = X/R$，$\varphi$ 为线路阻抗 $Z_1 + Z_2$ 的阻抗角。式(1-16A)和式(1-16B)可简化为

$$P_s = \frac{E}{Z}[-V\cos(\delta + \varphi) + E\cos\varphi] \tag{1-16C}$$

$$Q_s = \frac{E}{Z}[E\sin\varphi - V\sin(\delta + \varphi)] \tag{1-16D}$$

如果不考虑线路电阻，$R = 0$，$Z = X$，阻抗角 $\varphi = 90°$，则式(1-16C)和式(1-16D)简化为式(1-10)和式(1-11)。

如果支路 Z_3 不存在，即 $Z_3 = \infty$，式(1-17A)和式(1-17B)可简化为

$$P_r = \frac{V}{Z}[E\cos(\varphi - \delta) - V\cos\varphi] \tag{1-17C}$$

$$Q_r = \frac{V}{Z}[E\sin(\varphi - \delta) - V\sin\varphi] \tag{1-17D}$$

如果不考虑线路电阻，$R = 0$，$Z = X$，阻抗角 $\varphi = 90°$，则式(1-17C)和式(1-17D)可简化为式(1-8)、式(1-9C)。有功功率为

$$P_r = P_s = \frac{EV}{X}\sin\delta \tag{1-10}$$

感性(滞后)无功功率为

$$Q_r = \frac{V(E\cos\delta - V)}{X} \tag{1-9B}$$

1.2.2 电力系统中的功率损耗

如果变压器、输电线路等效电阻为 R，电抗为 X，有功电流为 I_p，无功电流为 I_q，负载功率因数为 $\cos\varphi_L$，则电阻 R 的有功功率损耗 ΔP 为