



国际电气工程先进技术译丛



Springer

可持续电力系统的建模与控制： 面向更为智能和绿色的电网

**Modeling and Control of Sustainable
Power Systems: Towards Smarter and
Greener Electric Grids**

王凌峰 主编

张凯锋 滕贤亮 耿建 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

可持续电力系统的建模与控制： 面向更为智能和绿色的电网

王凌峰 主编

张凯锋 滕贤亮 耿建 等译



机械工业出版社

本书汇集了多位国际知名专家的最新学术研究成果,介绍了可持续电力系统建模和控制的相关问题,内容涉及智能电网、分布式发电、有源配电网、电力电子新装置、需求侧管理等多个方面。

本书专业性和学术性较强,适合有一定电气工程学科知识基础的从业人员阅读,也可以作为对智能电网、新能源发电等领域有兴趣的普通读者的科技读物。

Translation from English language edition:

Modeling and Control of Sustainable Power Systems

by Lingfeng Wang

Copyright © 2012, Springer Berlin Heidelberg.

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版,未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有,翻印必究。

本书版权登记号:图字 01-2012-3708 号。

图书在版编目(CIP)数据

可持续电力系统的建模与控制:面向更为智能和绿色的电网/王凌峰主编;张凯锋等译. —北京:机械工业出版社, 2013. 5

书名原文: Modeling and Control of Sustainable Power Systems: Towards Smarter and Greener Electric Grids

ISBN 978-7-111-42052-1

I. ①可… II. ①王…②张… III. ①智能控制-电力系统-系统建模-研究 IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 068836 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: 刘星宁 责任编辑: 刘星宁

版式设计: 霍永明 责任校对: 闫玥红

封面设计: 马精明 责任印制: 杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2013 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 19.25 印张 · 395 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-42052-1

定价: 88.00 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

网络服务

社服务中心: (010)88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203 封面无防伪标均为盗版



译者序

近年来,随着新能源发电的不断发展和智能电网概念的提出,电力系统中出现越来越多的新设备和新技术,如分布式发电、有源配电网、电力电子新装置、需求侧管理等。这些新设备和新技术对电力系统建模与控制带来了很大的挑战。

本书为《Modeling and Control of Sustainable Power Systems: Towards Smarter and Greener Electric Grids》一书的中文译本。原书由美国托莱多大学(University of Toledo)电气工程与计算机科学系的王凌峰教授主编,由Springer出版社于2012年出版。本书介绍了可持续电力系统建模和控制方面的研究进展。它源于多位国际知名专家的学术研究成果,结合智能电网、分布式发电、需求侧管理等新颖的控制问题,向读者展示了当前时期电力系统各个方面的建模与控制研究现状。本书并不是一本系统的电力系统建模和控制的基础性教材,而是着眼于各个方面的具体研究问题,展开较为深入的分析与介绍。

全书共分12章,各章内容相对独立,读者可以顺序阅读,也可以根据自己的兴趣选择相关章节阅读。本书内容专业性较强,在翻译本书时,我们力求保持译文的专业性和可读性,希望能对学习电力系统建模和控制的读者有所帮助。

本书是由张凯锋(东南大学)、滕贤亮(国网电力科学研究院)、耿建(中国电力科学研究院)主持翻译,研究生王颖、陈汉一、陈长升、刘成、杨国强、宗海翔、周龙生、刘菲菲等也参与了部分翻译工作。

由于时间比较仓促,且译者的水平有限,书中难免有翻译不妥之处,敬请读者批评指正。

译者

前 言

智能电网理念通过向电网中集合智能、高效、优化方法，向世界展现了一种有效而智能的方法去管理能源生产、传输、消费全过程。同时，能源供应商和消费者通过实时、智能的能源管理，共同受益于电力系统的方便性、可靠性、节能性。为此，当前电网正在经历翻天覆地的变化和升级。例如，大量的绿色能源（如风能和太阳能）并网，需要在电力系统中安装更多的储能装置，用于降低新能源所带来的间歇性问题。另外，人们研发了新型的电力电子技术和控制策略。例如，在改善电力系统可靠性和电能质量上，柔性交流输电系统（FACTS）和相量测量装置（PMU）就是两种很有前景的技术。需求侧管理（DSM）能够使消费者主动参与到负荷管理中。因此，在新型智能电网技术发展中，电网的建模和控制是一个极大的挑战。本书各章节均源于国际知名专家的学术成果，介绍了可持续电力系统中的建模与控制方法。

在第 1 章中，A. K. Srivastava、R. Zamora、N. N. Schulz、K. G. Ravikumar 和 V. M. Mohan 讲述了智能电网建模与仿真以及广域监测与控制（WAMC）测试平台的开发。

在第 2 章中，C. Cecati、C. Citro、A. Piccolo 和 P. Siano 提出了智能电网的一种能源管理系统。该系统采用最优潮流方法，并整合了需求侧管理机制和有源管理方案，使智能电网在竞争市场中达到最优。

在第 3 章中，A. Egea-Alvarez、A. Junyent-Ferré 和 O. Gomis-Bellmunt 介绍了利用电压源变换器对分布式发电和储能系统进行有功和无功功率控制的方法。

在第 4 章中，S. T. Cha、Q. Wu、A. Saleem、J. Østergaard 和 Y. Ding 提出了一种基于多代理的控制器，用于分布式发电的频率稳定控制。同时，建立了一个测试平台，用于验证基于多代理的频率控制器的控制效果。

在第 5 章中，A. V. Stankovic、D. Schreiber 和 S. Wu 提出了两种在不平衡条件下，完全消除网侧逆变器谐波的控制方法。仿真结果显示该控制方式在几类电力系统故障下，在风能系统中有出色的控制效果。

在第 6 章中，F. Yang、V. Donde、Z. Li 和 Z. Wang 通过配电自动化系统和在线系统分析，探索了先进的高性能计算体系结构，有效地控制了大规模配电系统问题分析的复杂性。

在第 7 章中，H. Falaghi 和 M. K. Mahmoodee 为了管理和控制发电厂的气体排放，对于包含电池储能系统（BESS）的电力系统进行了建模和分析，同时，在建模中采用了 BESS 使用寿命参数。

在第8章中, S. Kamalasadan、J. T. Haney 和 C. M. Tanton 以微网和智能电网并网单元为基础, 讨论了光伏 (PV) 阵列和质子交换膜 (PEM) 燃料电池的建模与控制。

在第9章中, P. Siano、P. Chen、Z. Chen 和 A. Piccolo 为了使风电投资商在有源配电网中投资的净现值最大, 提出了一种结合了遗传算法和多阶段最优潮流的混合优化方法。

在第10章中, Y. Cheng 和 M. Sahni 从电力系统规划的角度讨论了风力发电等效模型、低电压穿越能力和评估, 以及风力发电无功功率控制, 惯性和频率控制等相关问题。

在第11章中, A. K. Sadigh 和 S. M. Barakati 讨论了多电平变换器的几种拓扑结构以及对应控制方法。近年来, 由于在工业应用中功率电平提高的重要性越来越突出, 多电平变换器得到了持续的发展。

在第12章中, M. A. Sofla、L. Wang 和 R. King 讨论了基于微网特征的 DC-AC 变换器的建模, 并基于电能的质量和微网稳定性方面, 对微网进行了性能测试分析。

这本书的编写者们来自于学术界和工业界。编写本书的首要目的是为了一些领域的专业人员, 包括可持续电力系统、可再生能源的并网、电力系统的监测与控制、广域测量与控制、电力系统的规划与运行、电力系统的可靠性与安全性分析、微网的建模与控制、储能系统、能源管理系统、混合电力系统、智能电网测试平台、电力系统优化、高性能计算在电力系统自动化中的应用、计算智能和智能控制在电网中的应用等。这本书包含的内容, 反映了现代电网中的建模与控制方法的当前发展状况。希望能有益于该领域里的研究人员和相关从业人员, 并帮助到对智能电网应用技术感兴趣的普通读者。

主编对所有为这本书贡献自己有价值工作的作者表示感谢。也感谢那些倾注了他们的时间来审查本书章节的评审员。另外, 编者也很感谢出版社员工的努力, 使整个出版过程变成一个愉快而又有益的经历。

王凌峰

2011年6月

俄亥俄州托莱多大学

目 录

译者序

前言

第 1 章 智能电网的实时建模与控制	1
1.1 简介	1
1.2 相量测量技术和装置概述	2
1.2.1 相量	2
1.2.2 相量测量装置 (PMU)	3
1.2.3 相量数据集中器 (PDC)	3
1.3 广域监测与控制 (WAMC) 测试平台	3
1.3.1 广域监测与控制	3
1.3.2 已有的广域监测与控制测试平台装置	4
1.4 相量设备的性能测试	7
1.4.1 RSCAD 中的电力系统	7
1.4.2 相量测量值显示	7
1.4.3 频率监测	8
1.4.4 非额定频率下的电压监测	8
1.5 基于相量测量的控制算法	9
1.5.1 基于 PMU 的控制测试实例	9
1.5.2 控制算法的实现	10
1.6 微网的建模与仿真	14
1.6.1 微网简介	14
1.6.2 微网控制	15
1.6.3 仿真结果	17
1.7 小结	21
参考文献	21
第 2 章 计及分布式发电和需求侧管理的智能电网运行	23
2.1 简介	23
2.2 智能电网基础设施	25
2.3 数学模型	26
2.3.1 离散变量的处理	28

2.3.2 约束条件	28
2.4 案例分析	29
2.4.1 示例系统	29
2.4.2 仿真结果	31
2.5 讨论	36
2.6 小结	37
参考文献	37
第3章 并网分布式发电系统的有功和无功功率控制	40
3.1 简介	40
3.2 系统描述	43
3.3 P 、 Q 控制方案	44
3.3.1 Clarke 变换	44
3.3.2 Park 变换	46
3.3.3 电压源变换器的建模	48
3.3.4 同步参考坐标系统中的电压方程式	49
3.3.5 一般控制方案	50
3.3.6 电流参考值的计算	50
3.3.7 直流电压调节器	51
3.3.8 电流回路控制	53
3.3.9 锁相环	54
3.3.10 电压调制	55
3.4 仿真结果	57
3.4.1 储能系统的仿真	57
3.4.2 分布式发电系统的仿真	58
3.4.3 在一个电压跌落期间可再生能源发电系统的仿真	61
3.5 小结	68
致谢	68
参考文献	68
第4章 孤岛运行下有源配电系统的建模与控制	70
4.1 简介	70
4.2 孤岛运行下有源配电系统的控制理念	73
4.2.1 孤岛运行下有源配电系统的频率控制理念	73
4.2.2 孤岛运行下有源配电系统的基于多代理技术的控制器	79
4.3 配有 RTDS 和用于 SCADA DNP3 的 MatrikonOPC 服务器的测试平台	82
4.3.1 测试平台的构成	82
4.3.2 RTDS 和用于 SCADA DNP3 的 MatrikonOPC 服务器之间的通信测试	84

4.4 有源配电系统的模型	86
4.4.1 分布式发电系统	86
4.4.2 IEEE 9-bus 系统	90
4.5 有源配电系统频率控制的案例研究	94
4.5.1 分布式发电系统的案例研究	94
4.5.2 IEEE 9-bus 系统的案例研究	98
4.6 小结	104
参考文献	104
第5章 风力发电中不平衡运行条件下网侧逆变器的控制方法	106
5.1 简介	106
5.2 风电应用中不平衡网侧逆变器运行方面的研究进展	107
5.3 不平衡运行条件下的网侧逆变器	110
5.4 不平衡电网电压和平衡线路阻抗环境下网侧逆变器谐波完全消除的方法	112
5.5 电网电压和线路阻抗同时不平衡的条件下谐波消除的一般方法	116
5.5.1 理论方法	117
5.5.2 电网电压和线路阻抗同时不平衡的情况下网侧逆变器的谐波消除控制方法	119
5.6 算例	119
5.7 小结	124
参考文献	125
第6章 配电系统管理技术的研究进展	128
6.1 简介	128
6.2 配电系统的停电管理	129
6.2.1 基于本地的控制方法	130
6.2.2 计及短期负荷预测	135
6.2.3 基于应用管理中心的策略	137
6.2.4 利用智能电表数据的停电分析	138
6.2.5 讨论	140
6.3 在线智能电网分析的高性能计算	140
6.3.1 配电系统的状态估计	141
6.3.2 详解 CPU 和 GPU 结构	144
6.3.3 电力系统数值计算方法的特点	146
6.3.4 并行迭代法	149
6.3.5 评估多核 GPU 的应用	152
6.3.6 讨论	153
6.4 小结	154

参考文献	154
第 7 章 含有储能系统的电力系统排放控制	158
7.1 简介	158
7.2 电池储能系统	159
7.3 模型建立	160
7.3.1 目标函数	160
7.3.2 约束条件	160
7.4 一种基于 λ 迭代和遗传算法的混合优化方法	162
7.4.1 第一个阶段	163
7.4.2 第二个阶段	163
7.5 数据分析与结果	164
7.6 小结	169
参考文献	169
第 8 章 使用光伏阵列和质子交换膜 (PEM) 燃料电池的混合智能微网的建模与控制	171
8.1 简介	171
8.2 由 PEM 燃料电池构成的微网的建模与控制	173
8.2.1 燃料电池发电装置	173
8.2.2 仿真结果和模型对比	175
8.2.3 DC-DC 变换器	176
8.2.4 燃料电池发电装置和 DC-DC 变换器的测试	178
8.2.5 逆变器	178
8.2.6 燃料电池发电装置和带有控制器的电压源逆变器	181
8.2.7 具有电压源逆变器和控制器的系统测试	184
8.3 光伏系统的建模与控制	185
8.3.1 系统的总体配置和数学建模	185
8.3.2 建模和仿真结果	190
8.4 具有光伏阵列和 PEM 燃料电池的混合微网	194
8.4.1 连接到电网的微网 (孤岛模式)	194
8.4.2 连接到电网的微网 (当 P 、 Q 为正或负时)	195
8.4.3 作为用户驱动型微网系统的影响	200
8.5 小结	200
参考文献	200
第 9 章 基于多阶段最优潮流和遗传算法的有源配电网的风力机布点的优化问题	202
9.1 简介	202

9.2 利用多阶段最优潮流算法评估有源配电网中风能的最大获取	204
9.2.1 有载分接开关的协调电压控制	205
9.2.2 弃风	205
9.2.3 发电机无功功率的协调控制	205
9.3 多阶段最优潮流	206
9.4 风力机优化配置的遗传算法-多阶段潮流的混合优化方法	208
9.5 系统描述	210
9.5.1 时变负荷及风力发电的建模	210
9.5.2 短路计算	212
9.5.3 电网运行约束	212
9.6 算例分析	212
9.7 讨论	214
9.8 小结	215
参考文献	215
第10章 计及风电不确定性的电网规划	219
10.1 简介	219
10.2 低电压穿越能力	224
10.2.1 概述	224
10.2.2 关键的建模要求	225
10.2.3 单台风电机组低电压穿越能力评估	229
10.3 无功功率支撑要求	234
10.3.1 概述	234
10.3.2 稳态评估	234
10.3.3 动态评估	237
10.4 惯性响应和频率控制要求	241
10.4.1 概述	241
10.4.2 DFIG 的频率控制和惯性响应——定性评估	244
10.4.3 频率控制和惯性响应——动态模拟	245
10.4.4 频率控制和惯性响应——其他的风力机技术	246
10.4.5 小结	248
参考文献	249
第11章 多电平变换器的拓扑结构和控制策略	251
11.1 多电平变换器的拓扑结构	252
11.1.1 单元级联型 (CM) 变换器	252
11.1.2 飞跨电容多单元型 (FCM) 变换器	255
11.1.3 层叠式多单元型 (SM) 变换器	257

11.2 多电平变换器的控制策略	259
11.2.1 基于载波的 SPWM 算法	259
11.2.2 空间矢量脉宽调制技术	265
11.2.3 特定谐波消除	268
参考文献	272
第 12 章 微网内分布式电源中 DC-AC 变换器的建模与控制	275
12.1 简介	276
12.2 微网中 DC-AC 变换器的建模	277
12.2.1 微网概述	277
12.2.2 微网控制过程	280
12.2.3 微网中含电力电子接口的分布式电源建模	280
12.3 微网中分布式电源的功率变换器的控制技术	282
12.3.1 线性控制方法	282
12.3.2 鲁棒控制方法	284
12.4 有关不同控制方法性能的讨论	287
12.5 微网中 DC-AC 功率变换器的性能测试	288
12.6 小结	294
参考文献	294

第 1 章 智能电网的实时建模与控制

Anurag K. Srivastava, Ramon Zamora, Noel N. Schulz,
Krishnanjan G. Ravikumar 和 Vinoth M. Mohan

摘要：智能电网在扰动情况下的实时建模与仿真对电力系统的分析与规划具有重要意义，可将潜在的危害最小化。另外，回路中包含硬件的实时建模与仿真能够测试智能电网的控制算法和新设备的性能。

本章围绕着两个方面来阐述智能电网的建模与仿真。第一个方面涉及广域监测与控制（WAMC）测试平台的开发，该平台包括相量测量装置（PMU）、同步矢量处理器（SVP）、相量数据集中器（PDC）和实时数字仿真器（RTDS）。WAMC 系统能够提供更可靠、更安全、更协调的控制作用，以减轻甚至阻止大范围的扰动。迄今为止，PMU 技术已被应用到世界各地不同的电网公司中，用于广域监测和控制。这些主要基于电压、电流时间同步测量的装置能够让控制器做出精确的决策和更实时的控制作用。RTDS 用来做电力系统建模与仿真；PMU 用来生成电力系统监控中所需的测量数据。PDC 和 SVP 接收测量数据，以做进一步的分析与控制。成熟的 WAMC 测试平台还能够用来测试控制算法和设备的性能。本章的第二个方面讲述了在 MATLAB/Simulink 上实现微网及其控制器的建模与仿真的方法。

1.1 简介

智能电网的范畴包括输电系统中基于相量的应用，以及分布式系统或微网中分布式发电/需求响应的融合。虽然 EMS（能量管理系统）/SCADA（监控与数据采

Anurag K. Srivastava · Ramon Zamora. 华盛顿州立大学电气工程与计算机科学系
Pullman, WA 99164, 509-335-2348
邮箱: asrivast@eecs.wsu.edu
Noel N. Schulz 堪萨斯州立大学电气与计算机工程系
Manhattan, KS

Krishnanjan G. Ravikumar
瑞士工程实验室, Pullman, WA

Vinoth M. Mohan
AREVA T&D, Redmond, WA

集系统)能够监控广域系统,但是不能做到实时性。引入相量测量装置(PMU)能够同步地监控广域系统,从而促进了电力系统实时监控的发展。另外,同步卫星、电力通信网、数字信号处理等技术的发展也为 PMU 技术的发展奠定了必要的基础。PMU 应用到广域监测与控制(WAMC)中,能够促进实时监控,改善状态估计,提高控制效果,验证模型,进行事后分析和改善环境感知^[1]。随着基于相量应用的发展,研究者已经提出了好几种技术去提高系统的环境感知和决策支持能力。这些技术在智能电网上实时安装启动之前,还需要有适宜的实时性。另外,智能电网设备,如 PMU、PDC,必须经过极端运行条件下的测试。本章讲述了 WAMC 测试平台的开发,该平台使用了 RTDS、SVP、PMU 和 PDC。通过回路中包含硬件的建模与仿真,成熟的测试平台能够用于极端环境下,基于相量的算法和 PMU/PDC 的测试。本章还详细地介绍了测试平台的开发、PMU 性能测试实例和暂态稳定控制。

微网是分布式能源的互联,如微型燃气轮机、风力机、燃料电池和带储能装置(如低压配电系统中的电池、飞轮和电力电容器)的光伏阵列。随着分布式发电渗透率的提高,电网需要智能控制和电力潮流管理将运行参数控制在一定的限额内。本章还用 MATLAB/Simulink 对微网进行建模与仿真,并评价了控制器的性能。

1.2 相量测量技术和装置概述

1.2.1 相量

相量测量值可用一个包含幅值和角度的量来表示。例如,电力系统中的电压、电流和功率就能够用这种包含幅值和相角的量表示,其中相角需要一个确定的参考。

图 1-1 给出了相量的波形表示。其中,相角是正弦曲线峰值点和时间基准 $t=0$ 点之间的相位差。在一个真正的电网中,不用任何的时间基准 $t=0$,而选择一根母线上的相角作为参考,其他不同母线上相应的相角都可以利用作为参考的初始母线的相角计算出来。

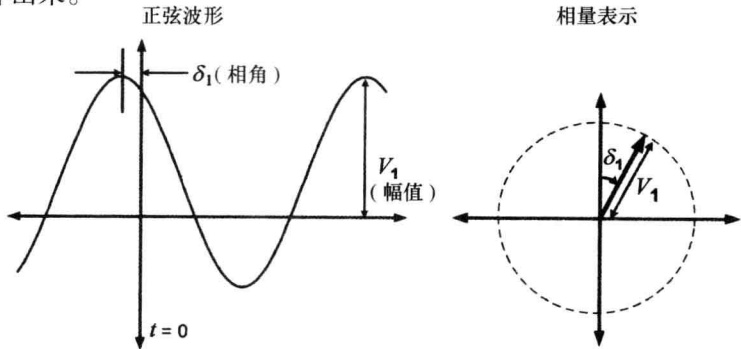


图 1-1 相量表示示意图

1.2.2 相量测量装置 (PMU)

PMU 是一个接收来自电流互感器 (CT) 和电压互感器 (PT) 的模拟电压、电流信号, 并对这些信号进行进一步处理, 再用特殊的算法 [通常是数字傅里叶变换 (DFT)] 计算其相角和线频率的电子装置。

图 1-2 引自参考文献 [2], 给出了 PMU 框图。其中, 来自 CT 和 PT 的模拟信号

通过一个抗混叠滤

波器, 过滤掉高于奈

奎斯特 (Nyquist) 率

上的频率。全球定位

系统 (GPS) 时钟每秒

钟发一个脉冲, 锁相

振荡器把这个脉冲分

割成定时脉冲序列。

A-D 转换器把模拟信

号转换成数字信号,

并送给微处理器, 而

微处理器利用 DFT 算

法处理输入的波形, 并

计算出相量测量值。这

些测量值通常利用传

输控制协议/网

间协议 (TCP/IP) 进

行传输。

1.2.3 相量数据集中器 (PDC)

PDC 是一种把来自 PMU 的信号进行时间标注, 并根据时间对它们进行分类的

电子设备。两个或者更多的 PDC 能够和一个更高级的 PDC 连接起来。PDC 的输出

可以用于实时监测系统, 或者存档以便今后分析。

1.3 广域监测与控制 (WAMC) 测试平台

1.3.1 广域监测与控制

WAMC 系统的核心思想是集中/分布式处理采集来自电力系统不同位置的数据,

以便评估电力系统实际的运行状态和随后的控制行为^[3]。现在全世界的电力

设施都正在逐步安装 PMU。安装在电网中位置越好, 就能提供越全面的系统信息。

PMU 把状态估计测量转换成线性测量, 提高了状态估计效率。同时, 通过引入精

确的智能拓扑变化和控制行为, 在不利条件下, 保持了输电网的完整性, 这使得广

域控制具备一定程度的自愈性^[4]。

任何时候, 在传统的 SCADA 系统中, 只能得到特定时刻电力系统的瞬时稳定

状态值。由于不同点的数据到达控制中心的时刻不同, 人们很难用 SCADA 信息构

造一个电力系统潮流场景。因此, 在电网真实的运行环境下, 时间同步扮演着非常

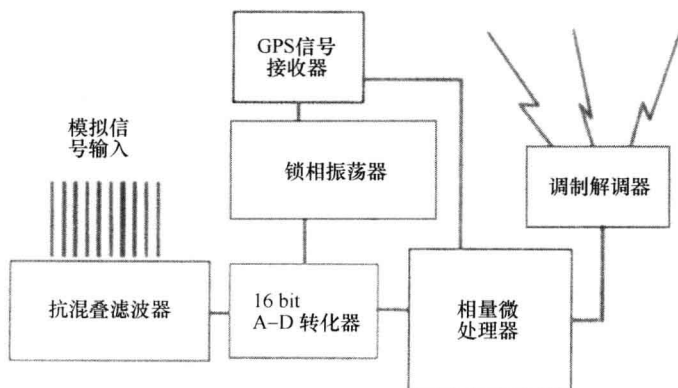


图 1-2 PMU 框图

重要的角色。

1.3.2 已有的广域监测与控制测试平台装置

图 1-3 给出了密西西比州立大学搭建的 WAMC 测试平台。该电力系统通过运行在 RTDS（实时数字仿真器）上的 RSCAD（实时计算机辅助设计仿真器）软件建模。对我们而言，RTDS^[5]用来仿真电力系统组件，如 CT 和 PT。来自 RTDS 小数量级的值直接提供给 SEL-421 相量测量控制装置（PMCU），但是在有 D60 和 N60 通用继电器的情况下，这些值要用 Omicron 放大器放大。PMCU 除提供相量测量值之外，还能够提供控制信号。所有的 PMU 用来自 GPS 时钟 SEL-2407 的时钟信号进行时间同步。来自 3 个 PMU 的信号传送到 SEL-3306 相量数据集中器（PDC）。来自两个 PMCU 的信号传输到 SVP 产生控制行为。SEL-5078 同步波形控制台用来监测在 RSCAD 上建模与仿真的原始电力系统的相量值。

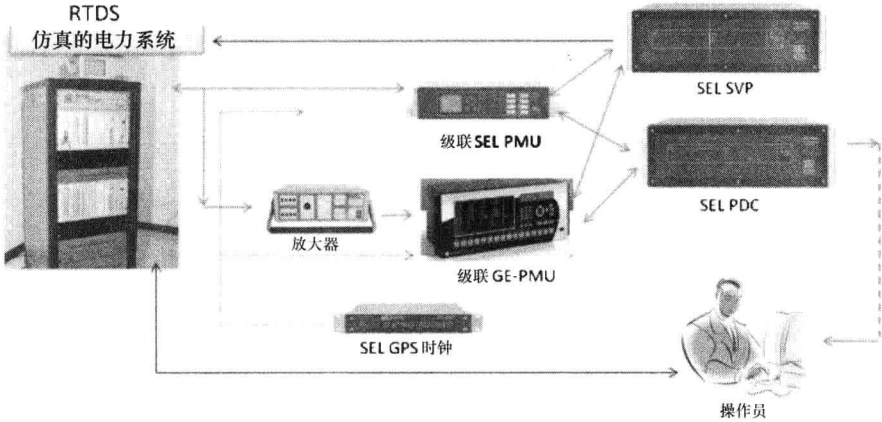


图 1-3 已有的 WAMC 测试平台

通过若干通信链路，组建了 RTDS、PMCU、PMU、PDC 和 SVP 之间的连接界面。表 1-1 显示了用来连接个体设备的不同电缆^[6]。

表 1-1 在测试平台中使用的连接电缆

到达设备	起始设备	电 缆
SEL-421（PMCU）	计算机（指令集）	C234 A
SEL-421（PMCU）	PDC	C276
GE-D70（PMCU）	PDC（数据）	以太网
GE-N60（PMCU）	PDC（数据）	以太网
SEL-3306（PDC）	计算机（指令集）	C235
SEL-3306（PDC）	计算机（数据）	以太网
SEL-2407（时钟）	SEL 421	C953
SEL-2407（时钟）	GE 继电器	C953

SEL-421 是一个带有 PMU 功能的距离保护继电器。通过在全局使能“Y”下，发出 EPMU 命令，让 PMU 使能。当高质量的时钟信号传到 PMU 时，设置继电器的 TSOK 和 TIRIG 位，让继电器工作在高精度的时间保持模式下。SEL-2407 时钟设定成格林尼治标准时间。为了检查继电器是否工作在 PMU 模式下，需要使用 MET PM 命令。PMU 将显示在特定实例中的同步相量测量值。为了与以太网上的 PDC 相连，首先要给它分配一个 IP 地址。用命令 STA 来检查设备的状态。SEL-3306 有两个以太网接口，第一个接口使能。另外，通过登录已经分配好的 IP 地址，可以在浏览器上进一步改变 PDC 设置。

SEL-3306 配置

PDC 常规数据	
PDCSTN	MSU-1
PDCID	1
HID	密西西比州电力实验室 SEL-3306
NFREQ	60
MRATE	60
MWAITP	1000
T_OUT	5
REQPASS	N
IRIGTYPE	DEMOD
DATE_F	MDY
网络配置	
网络 01	
ETHEN	Y
ETDHCP	Y
ETIPAD	130.18.65.130
ETSNMK	255.255.254.0
ETGTWY	130.18.64.1
ETDNS	130.18.65.11
ETDOMA	ece.msstate.edu
ETHOST	变电站

图 1-4 SEL-3306 配置

图 1-4 给出了 SEL-3306 的配置^[6]。其中，需要将 IP 地址、子网掩码、网关地址和主计算机的 IP 地址提供给 PDC 配置。此外，还需要用浏览器设置信息传送速率、频率、等待周期、超时、IRIG-B 型和日期格式。

来自 SEL-421 的 C276 串行电缆与 PDC 上的第十个串口相连。图 1-5 给出了一些特殊端口的设置。这些串口需要使能，报文格式设置成 C37.118 标准，信息传输速率设置为 57600。这两个 GE PMU 通过以太网电缆与 PDC 相连。图 1-6 显示了这两个 GE PMU 的以太网设置。

串口 10	
SPEN	Y
SMFMT	C37.118
SNAME	10SP
SPMUID	0x0001
SPHFMT	P
SVCOMP	0.00
SICOMP	0.00
SSPEED	57600

图 1-5 SEL-421 和 SEL-3306 串口连接的设置