



国际电气工程先进技术译丛



WILEY
www.wiley.com

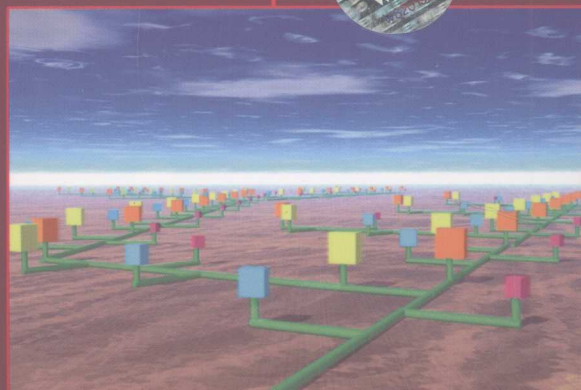
开关变换器动态特性： 建模、分析与控制

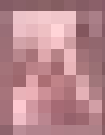
**Dynamic Profile of Switched-Mode
Converter: Modeling, Analysis and Control**

(芬) Teuvo Suntio 著
许建平 王金平 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





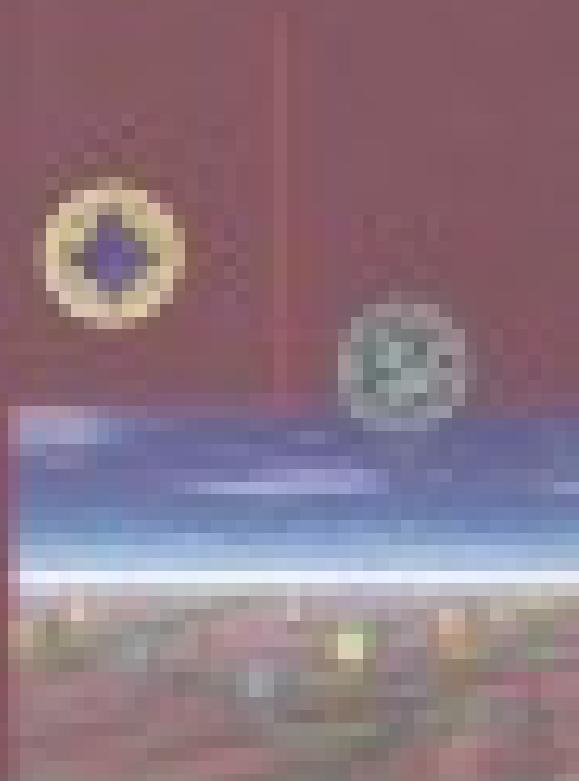
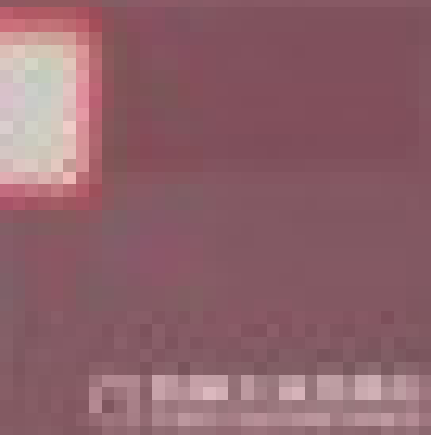
清华大学工程教育出版中心

上册

开关变换器动态特性： 建模、分析与控制

Practical Design of Power Electronics
Converters: Modeling, Analysis, and Control

陈兆军 著
2022 年 04 月



清华大学出版社
Tsinghua University Press

国际电气工程先进技术译丛

开关变换器动态特性：建模、分析与控制

(芬) Teuvo Suntio 著
许建平 王金平 等译

机械工业出版社

本书对开关变换器的建模、分析与控制进行了系统、深入的分析,针对各种基本的开关变换器拓扑和各种常规的控制方法,讨论了它们的建模方法、分析方法和动态特性。特别地,本书从变换器内部特性出发,讨论了外部电路对开关变换器动态特性和稳定性的影响,指出了设计开关电源及其系统时需要注意的问题。本书内容丰富、实用性强,通过大量开关变换器电路实验,揭示了各种开关变换器和控制方法的特性,验证了理论分析的正确性。

本书适合从事电源开发、设计和应用的工程技术人员阅读,也可作为高等院校相关专业高年级大学生、研究生的教学参考书。

Dynamic Profile of Switched-Mode Converter: Modeling, Analysis and Control/by Teuvo Suntio /ISBN: 978-3527407088

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with China Machine Press and is not the responsibility of Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

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01-2010-2923号。

图书在版编目(CIP)数据

开关变换器动态特性:建模、分析与控制/(芬)圣笛欧(Suntio, T.)著;许建平等译. —北京:机械工业出版社,2011.11

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Dynamic Profile of Switched-Mode Converter: Modeling, Analysis and Control

ISBN 978-7-111-36206-7

I. ①开… II. ①圣…②许… III. ①开关-变换器-动态特性
IV. ①TN624

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第215856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:张媛 封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2012年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·19.75印张·394千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-36206-7

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

销售一部:(010)68326294

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

门户网站:<http://www.cmpbook.com>

教材网:<http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

译者序

功率 MOSFET 的出现和广泛应用，极大地提升了功率开关器件的开关频率，将开关电源的开关频率提高到了数十千赫兹或数百千赫兹，甚至兆赫兹，使开关电源的功率密度发生了质的飞跃，极大地减小了开关电源的体积、重量和成本。开关电源因此得到了学术界和工业界的广泛关注，迅速取代线性电源，在计算机、通信设备、仪器仪表和办公设备等方面获得了广泛的应用。

开关电源的建模、分析与控制是开关电源理论和应用的核心问题。开关电源的建模和分析是系统、深入地认识和了解开关电源的工作原理和工作特性的基础，而开关电源的控制是开关电源设计不可或缺的重要部分。本书对开关变换器的建模、分析与控制进行了系统、深入的分析，针对各种基本的开关变换器拓扑和各种常规的控制方法，讨论了它们的建模方法、分析方法和动态特性。特别地，本书从变换器内部特性出发，讨论了外部电路对开关变换器动态特性和稳定性的影响，指出了设计开关电源及其系统时需要注意的问题。

本书介绍了变换器的动态建模以及控制电路设计的方法，介绍了各种变换器拓扑的动态特性，以及不同的控制方法和不同工作模式对变换器动态特性的影响。本书内容丰富、实用性强，通过大量开关变换器电路实验，揭示了各种开关变换器和控制方法的特性，验证了理论分析的正确性。

本书适合从事电源开发、设计和应用的工程技术人员阅读，也可作为高等院校相关专业高年级大学生、研究生的教学参考书。

全书译稿最后经西南交通大学许建平教授、王金平博士生译校完成。参加本书翻译工作的有博士研究生王金平、张斐、秦明、周国华、沙金、杨平、阎铁生、陈章勇、徐顺刚等。

由于译者水平有限，翻译不当之处，欢迎读者批评指正。

译者

前 言

我 25 年来从事开关电源及其系统设计遇到的各种问题说明，我们对开关电源及其系统设计还有很多未完全理解的知识。在开始学术研究后，我决定找出一些几乎每天都会遇到的问题原因。经过 10 年的研究后，我明白了许多问题的原因，但仍然被很多问题所困扰。现在最重要的是让开关电源设计者和学者相信，电路内部存在唯一的动态特性，这种动态特性决定了电路以及包含这些电路的系统的工作性能。这种唯一性可用来理解和预测电路的特性，特别是可以避免一些电路不良现象的发生，比如电路的不稳定性和电路瞬态特性的恶化等。本书介绍了变换器的动态建模以及控制电路设计的方法，介绍了各种变换器拓扑的动态特性，以及不同的控制方法和不同工作模式对变换器动态特性的影响。

在编写这本书的时候，特别是在理解问题的深度、如何解决问题方面，得到了很多人的支持和帮助。感谢顾问编辑 Dr. D. R. Vij 教授和 Wiley-VCH 的全体工作人员给予我出版本书的机会，以及在此过程中给我的耐心指导。尽管 Dr. Kai Zenger 在控制工程方面给了我很多指导，但我还是遗漏了许多这方面的工作。感谢我的博士毕业生 Dr. Idris Gadoura, Dr. Ander Tenno, Dr. Mikko Hankaniemi, Dr. Ali Altowati 和 Dr. Matti Karppanen 等在本书问题解答方面，尤其是在实验验证方面所做的贡献。非常感谢我的妻子 Sirpa 的爱，以及在整个过程中的细心照顾。

Teuvo Suntio

目 录

译者序	
前言	
第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 开关变换器的动态建模	3
1.3 互联系统的动态分析	4
1.4 规范等效电路	5
1.5 基于负载响应的动态特性分析	7
1.6 内容概括	9
第2章 动态分析与控制动力学基础	15
2.1 引言	15
2.2 开环动态特性	15
2.2.1 状态空间	16
2.2.2 二端口模型	18
2.2.3 控制框图	19
2.3 闭环动态特性	20
2.3.1 电压输出型变换器	21
2.3.2 电流输出型变换器	23
2.4 负载和电源影响	24
2.4.1 电压输出型变换器	25
2.4.2 电流输出型变换器	26
2.5 <i>LC</i> 电路举例	28
2.5.1 电压输出型电路	28
2.5.2 电流输出型电路	30
2.6 基本的数学工具回顾	32
2.6.1 线性化	32
2.6.2 传递函数	33
2.6.2.1 单零点	33
2.6.2.2 单极点	34
2.6.2.3 二阶传递函数	34
2.6.2.4 举例	36
2.6.3 稳定性和性能	38

2.6.3.1	稳定性	38
2.6.3.2	与环路增益有关的动态指标	40
2.6.3.3	右半平面零点和极点	42
2.6.4	矩阵代数	42
2.6.4.1	矩阵加法	44
2.6.4.2	矩阵乘以一个标量	45
2.6.4.3	矩阵乘法	45
2.6.4.4	矩阵的行列式	45
2.6.4.5	矩阵的逆	46
2.7	变换器的工作模式和控制模式	46
第3章 直接导通时间控制开关变换器的平均和小信号建模		51
3.1	引言	51
3.2	直接导通时间控制	52
3.3	通用建模方法	54
3.3.1	Buck 变换器	55
3.3.2	Boost 变换器	57
3.3.3	Buck-Boost 变换器	58
3.4	恒频 CCM 工作模式	60
3.4.1	同步 Buck 变换器	61
3.4.2	Buck、Boost 和 Buck-Boost 变换器的动态描述	65
3.4.2.1	二极管开关 Buck 变换器 (见图 3.6a)	65
3.4.2.2	二极管开关 Boost 变换器 (见图 3.8a)	67
3.4.2.3	同步开关 Boost 变换器 (见图 3.8b)	68
3.4.2.4	二极管开关 Buck-Boost 变换器 (见图 3.10a)	69
3.4.2.5	同步开关 Buck-Boost 变换器 (见图 3.10b)	70
3.4.3	稳态和小信号等效电路	71
3.5	恒频 DCM 工作模式	74
3.5.1	Buck 变换器	75
3.5.2	Boost 和 Buck-Boost 变换器的动态模型	80
3.5.2.1	Boost 变换器 (见图 3.8a)	80
3.5.2.2	Buck-Boost 变换器 (见图 3.10a)	82
3.6	动态特性	83
3.6.1	Buck 变换器	83
3.6.1.1	控制-输出传递函数	84
3.6.1.2	输出阻抗	87
3.6.1.3	输入-输出传递函数	88
3.6.1.4	输入导纳	90
3.6.1.5	理想输入导纳	91

3.6.1.6	短路输入导纳	92
3.6.2	Boost 变换器	94
3.6.2.1	控制-输出传递函数	94
3.6.2.2	输出阻抗	96
3.6.2.3	输入-输出传递函数	97
3.6.2.4	输入导纳	98
3.6.2.5	理想输入导纳	101
3.6.2.6	短路输入导纳	102
第 4 章	峰值电流控制的平均和小信号模型	106
4.1	引言	106
4.2	峰值电流控制原理	106
4.3	CCM 模型	108
4.3.1	Buck、Boost 和 Buck-Boost 变换器占空比约束关系	110
4.3.1.1	Buck 变换器	110
4.3.1.2	Boost 变换器	110
4.3.1.3	Buck-Boost 变换器	112
4.3.1.4	CCM 基本传递函数	113
4.3.2	基本变换器的特殊传递函数	114
4.3.2.1	Buck 变换器	115
4.3.2.2	Boost 变换器	116
4.3.2.3	Buck-Boost 变换器	118
4.3.3	CCM 模式界限的起因与影响	119
4.4	DCM 模型	121
4.4.1	基本变换器的占空比约束关系	123
4.4.1.1	Buck 变换器	123
4.4.1.2	Boost 变换器	123
4.4.1.3	Buck-Boost 变换器	124
4.4.2	PCMC 变换器的小信号状态空间模型	124
4.4.3	DCM 模式界限的起因与影响	126
4.5	动态特性	127
4.5.1	Buck 变换器	128
4.5.1.1	控制-输出传递函数	129
4.5.1.2	输出阻抗	131
4.5.1.3	输入-输出传递函数	132
4.5.1.4	输入导纳	134
4.5.1.5	理想输入导纳	135
4.5.1.6	短路输入导纳	135
4.5.2	Boost 变换器	137

4.5.2.1	控制-输出传递函数	138
4.5.2.2	输出阻抗	140
4.5.2.3	输入-输出传递函数	142
4.5.2.4	输入导纳	143
4.5.2.5	理想输入导纳	144
4.5.2.6	短路输入导纳	144
第5章 平均电流模式控制的平均和小信号模型		148
5.1	引言	148
5.2	ACM 控制原理	148
5.3	全纹波电流反馈建模	150
5.4	ACM 控制动态特性综述	153
5.4.1	控制-输出传递函数	153
5.4.2	输出阻抗	156
5.4.3	输入-输出传递函数	158
5.4.4	输入导纳	160
5.5	电流环高频极点的影响	161
第6章 自激振荡控制的平均小信号模型		166
6.1	引言	166
6.2	自激振荡建模	166
6.2.1	平均直接导通时间模型	167
6.2.2	直接导通时间控制的小信号模型	169
6.2.3	PCM 控制的小信号模型	170
6.3	动态特性	173
6.3.1	Buck 变换器	173
6.3.1.1	控制-输出传递函数	174
6.3.1.2	输出阻抗	174
6.3.1.3	输入-输出传递函数	176
6.3.1.4	输入导纳	176
6.3.2	反激变换器	176
6.3.2.1	控制-输出传递函数	177
6.3.2.2	输出阻抗	179
6.3.2.3	输入-输出传递函数	181
6.3.2.4	输入导纳	181
6.3.2.5	理想导纳和短路导纳	182
第7章 电流输出变换器的动态建模和分析		185
7.1	引言	185
7.2	电流输出型变换器的动态模型	186
7.2.1	改进的状态空间平均法	186

7.2.2	通用动态模型	188
7.3	负载与电源的相互作用	189
7.4	级联电压-电流环	191
7.5	动态特性	191
第8章	互联系统	197
8.1	引言	197
8.2	互联理论	198
8.2.1	负载和电源的相互影响	199
8.2.2	内部稳定性和输入-输出稳定性	201
8.2.3	输出电压远端检测技术	203
8.2.4	输入EMI滤波器	205
8.3	减小交互影响的方法	206
8.3.1	输入电压前馈	207
8.3.2	输出电流前馈	208
8.4	动态特性实验	209
8.4.1	负载和电源间的相互影响	211
8.4.2	远端检测	216
8.4.3	系统稳态性	221
第9章	控制设计问题	227
9.1	引言	227
9.2	反馈回路设计限制	230
9.2.1	相位和增益裕量	231
9.2.2	右半平面零点和极点	231
9.2.3	最大和最小环路交越频率	233
9.2.4	运算放大器的内部增益	234
9.3	控制器实现	234
9.4	光耦隔离	237
9.5	基于稳压器的控制系统	237
9.5.1	动态模型	237
9.5.2	双环控制系统	243
9.6	简单控制设计方法	245
9.6.1	控制设计实例:VMC Buck 变换器	247
9.6.2	控制设计实例:PCMC Buck 变换器	251
9.6.3	控制设计实例:VMC Boost 变换器	255
9.6.4	控制设计实例:PCMC Boost 变换器	258
9.7	结论	261
第10章	四阶变换器-Superbuck	266
10.1	引言	266

10.2	基本动态特性	267
10.2.1	平均模型	269
10.2.1.1	平均状态空间	269
10.2.1.2	稳态工作点	270
10.2.1.3	临界导电模式	270
10.2.2	小信号模型	270
10.2.2.1	小信号状态空间	270
10.2.2.2	传递函数	271
10.2.3	右半平面极点	273
10.2.4	设计考虑	275
10.3	耦合电感 Superbuck	276
10.3.1	小信号模型	277
10.3.2	右半平面极点	279
10.3.3	减小输入电流纹波	280
10.3.4	设计考虑	282
10.4	PCM 控制 Superbuck	283
10.4.1	小信号模型	283
10.4.2	设计考虑	287
10.4.2.1	电感电流反馈补偿	287
10.4.2.2	避免右半平面极点的方法	287
10.5	耦合电感 PCM 控制 Superbuck	288
10.5.1	小信号模型	288
10.5.2	设计考虑	292
10.6	动态特性分析	293
10.6.1	Superbuck I; 15 ~ 20V/10V/2.5A	295
10.6.2	Superbuck II; 6 ~ 9V/3.4V/12A	300
10.7	小结	303

第1章 绪 论

1.1 引言

根据输入电源的类型不同,开关变换器可分为如图 1.1 所示的电压源变换器和如图 1.2 所示的电流源变换器^[1]两大类,它们的输出电压(见图 1.1a 和图 1.2b)或输出电流(见图 1.1b 和图 1.2a)保持恒定^[2]。因此,存在四类具有不同动态特性的变换器:电压-电压变换器、电压-电流变换器、电流-电流变换器、电流-电压变换器。由于在实际应用中供电电源主要为电压源,而多数负载是电流吸收型负载(Current Sinks),因此,如图 1.1a 所示电压-电压变换器是应用最为广泛的开关变换器^[3]。当电压源变换器的输出端连接着蓄电池时,由于蓄电池的内阻值极低^[4-8],需要限制变换器的最大输出电流以避免损坏变换器,此时,工作于限流模式的电压-电压变换器变为如图 1.1b 所示电压-电流变换器。电流源变换器适

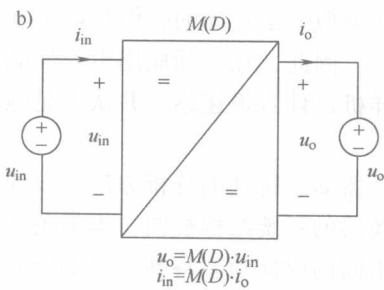
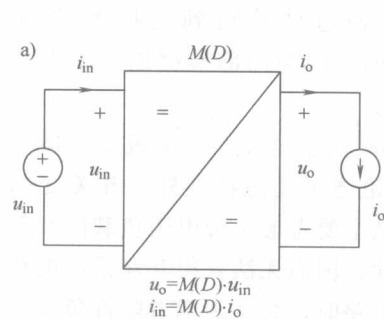


图 1.1 电压源变换器

a) 电压输出负载 b) 电流输出负载

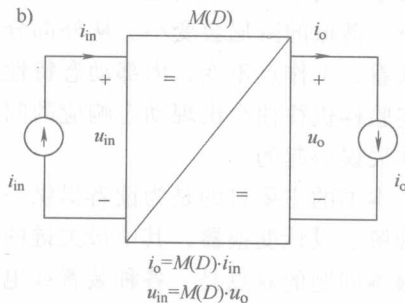
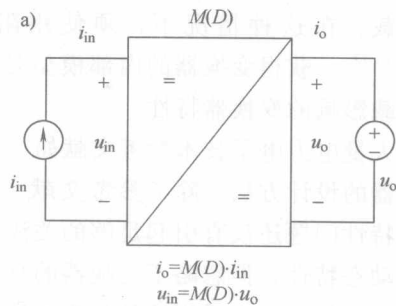


图 1.2 电流源变换器

a) 电流输出负载 b) 电压输出负载

用于对具有电流输出特性的电源进行变换，如太阳能电池板和磁能储存系统^[9-10]，构成如图 1.2a 所示电流-电流变换器。当限制其最大输出电压时，电流-电流变换器变为电流-电压变换器。

每种开关变换器都有其特有的动态特性或内部动态特性，这些动态特性决定了开关变换器的动态响应、鲁棒稳定性以及对输入电源和负载变化的敏感性^[11-13]。虽然通过调节内部反馈或前馈可以改变开关变换器的动态特性，但在实际应用中，通过反馈环的设计来改变动态特性的作用是有限的。根据变换器的输入电源和输出特性^[11-15]，可以用变换器的开环传递函数构成的一组二端口网络参数来描述开关变换器系统的内部动态特性：如图 1.1a 所示变换器的 G 参数，如图 1.1b 所示变换器的 Y 参数，如图 1.2a 所示变换器的 H 参数，以及如图 1.2b 所示变换器的 Z 参数。每一组二端口网络参数只适用于特定的变换器类型，但是变换器的主要参数 (G, Y, H, Z) 可以通过计算相互转换。若要获得全部的内部动态特性，除了开环传递函数外，还须定义导纳或者阻抗参数^[11]。

忽略输入源和负载阻抗的所有影响的传递函数称为内部传递函数。若已知正确的负载内部模型，则易得到变换器的分析模型（见图 1.1 和图 1.2）。虽然可以采用频域响应分析仪测量得到电压-电压和电流-电流变换器的动态参数，但由于某些内部控制模式可能会改变变换器的开环特性，使其不适用于某些特定的负载或理想的负载。在这种情况下，须使用阻性负载，通过计算得到变换器的内部模型^[11,16,17]。获得变换器的内部模型是极其重要的，因为内部模型描述了不受电源或负载影响的变换器特性。

大量电力电子技术参考文献如 [18-26] 都倾向于全面介绍交流变换器和直流变换器的设计方法。除了参考文献 [27, 28] 论述了动态特性外，开关变换器的动态特性问题还没有引起足够的关注。前述文献主要考虑了带电阻负载的开关变换器的动态特性，但忽略了变换器的真实动态特性，因而无法获得互联系统的相互影响关系。例如，当采用这种分析方法分析谐振电路时，会认为随着阻性负载电阻的变小，谐振的阻尼会变小。从外部分析，这种现象似乎是正确的，但从内部动态特性来看，工作点不变，内部动态特性就不会改变。因此，在实际应用中，性能良好的实验样机往往会出现动态响应的问题。这使样机设计者很迷惑，并认为是顾客的操作失误引起的。

本书的主要目的是为读者提供一种开关变换器动态特性的分析方法，以便更好地理解、设计变换器，其中最关键的是建立变换器的系统结构框图。本书关于这一最根本问题的观点是，各种装置或电路都具有不同的内部动态特性，就如同人们具有不同的心理状况：这一特性决定了该设备或电路在不同的外部影响下的行为，以及对系统的其它部分的影响。外部反馈控制并不能从根本上改变系统的内部动态特性，但可将输入、输出和（或）状态变量引入到内部反馈或前馈来改善变换器的

内部动态性能。在采用峰值电流控制的变换器中,用电感电流控制占空比就是很好的例证。与直接占空比控制或直接采用恒定斜坡电压产生占空比的电压模式控制(VMC)相比,峰值电流模式控制具有完全不同的动态特性,它消除了电压模式控制的不稳定性,大幅度抑制了输入噪声的影响,增加了内部开环输出阻抗,但并没有改变电压模式控制变换器的非最小相位特性。书中给出了大量例子,以证实这种动态特性的存在。

在撰写本书时,模拟控制还是主要的控制实现方式,但是数字控制的应用价值越来越明显,是未来变换器控制的主要趋势。若变换器的功率级电路不变,那么与功率级电路相关的基本动态特性也不会改变。数字控制所存在的分辨率和计算时间的限制,可能会引起更多的动态问题,这可以用本书中所介绍的连续时域法对此予以揭示和分析。

为了让读者熟悉后面章节将要讨论的动态特性问题,下面将对这些问题进行简要的介绍。虽然我们在本章简单介绍了电流源变换器,但是在本书的后续章节,我们将主要讨论电压源变换器。

1.2 开关变换器的动态建模

电压输出开关变换器的动态分析可以追溯到20世纪70年代初期^[31],当时提出了状态空间平均法(SSA)的基本理论^[32]。状态空间平均法是在一个开关周期内,对工作于电感电流连续模式(CCM)的直接占空比控制或电压模式控制(VMC)变换器的变量进行平均,并对相应的状态空间平均方程进行线性化,得到其小信号模型。采用该方法,可以在低于1/2开关频率范围内,获得准确的小信号模型。变换器的动态特性可以用标准的等效电路来表示。图1.3所示是含有两个储能元件的变换器等效电路,其电路元件的取值取决于特定的变换器的类型。显然,图1.3的等效电路模型为变换器的动态过程提供了物理意义,因此提高了此模型理论的应用价值。也可以用类似的方法建立与图1.3类似的高阶变换器的等效模型。

参考文献[33]首次建立了工作于电感电流断续模式(DCM)的电压模式控制变换器的动态模型,但是由于缺乏对变换器内部动态过程的正确理解,它并没有正确地描述全阶动态特性。20世纪90年代提出了工作于DCM模式的变换器的准确小信号模型^[34]。在SSA方法的基础上,21世纪初提出了一种标准化建模的统一

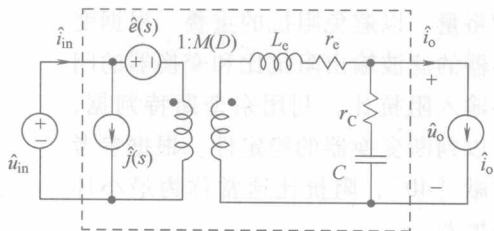


图 1.3 包含两个存储元件变换器的小信号规范模型

方法，适用于工作于定频和变频调制的 CCM 模式、DCM 模式及其混合模式变换器^[35]。当激励源为正弦信号时，脉冲宽度调制（PWM）仅在相对低频阶段（比如低于 1/10 开关频率）具有线性响应^[36-38]。因此，可以推测，通过 PWM 输入测量得到的响应（例如：控制-输入和控制-输出）比基于 SSA 建模得到的响应存在更多的相位滞后。为了得到接近 1/2 开关频率处变换器的准确动态特性，还需要进一步深入研究，随着期望的环路穿越频率越来越高，此项研究越来越重要。

不同控制模式有不同的占空比产生方式，基于 VMC 变换器的小信号模型，通过建立与控制变量相关的占空比，即占空比约束关系^[22]，并代入 VMC 变换器的状态空间表达式，即可得到相应的开关变换器的动态模型，因此 VMC 变换器的小信号模型非常重要。

在实际应用中，控制变量通常是变换器的主开关导通时间。在定频调制工作模式，因为周期是恒定的，用导通时间表示的动态信息也可以用占空比来表示；但是对于变频调制模式，占空比是非线性的，因此在 VMC 变换器中，必须用导通时间作为控制变量，参考文献 [39] 对这一建模问题进行了综合分析。

1.3 互联系统的动态分析

20 世纪 70 年代中期首次对包含 EMI（电磁干扰）滤波器和受控变换器的系统的动态特性进行了分析^[40]，基于这种分析方法制定了 EMI 滤波器的设计准则，如图 1.3 所示的等效电路就利用了这种分析方法。如果某些阻抗发生重叠，EMI 滤波器可能通过输出阻抗来影响变换器的动态特性。这种设计准则明确提出要留有充足的裕量，以避免阻抗的重叠。根据变换器的滤波输出阻抗比和变换器的闭环输入阻抗比，利用奈奎斯特判据，可以判断变换器的稳定性。根据参考文献 [40]，阻抗比通常称为最小环路增益。

对于级联受控变换器系统，一般采用最小环路增益方法进行分析^[41]。参考文献 [40] 的设计方法过于保守，采用这种方法将导致不必要的成本增加。特别地，这种设计方法给出了复平面上的禁止区域，为了避免系统的不稳定和动态性能的恶化，应该使最小环路增益在此禁止区域之外。

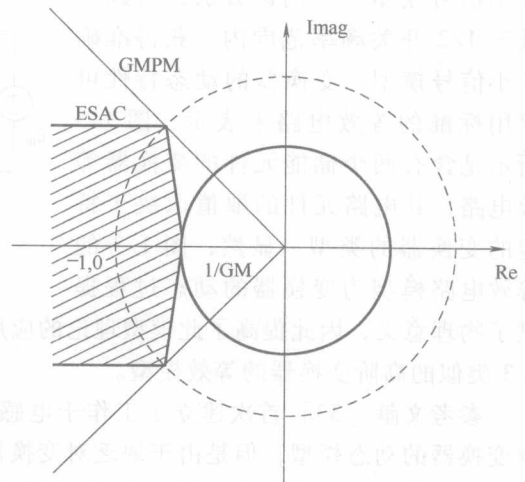


图 1.4 禁止区域

如图 1.4 所示, 为保证系统稳定, 应保证最小环路增益在阴影部分之外, 此阴影部分是最小非稳定区域。这个规则称为 ESAC 准则^[41]。参考文献 [40] 的设计方法定义的禁止区域为大于半径为 $1/GM$ 的外环区域, 其中 GM 代表与最小环路增益相关的增益裕量。

实际上, 仅避免最小环路增益进入上述禁止区域并不能确保变换器瞬态特性不受影响, 还需要有更多的考虑^[42-43]: 实际的功率系统由多个最小环路增益系统组成, 例如, 图 1.5 中的接口 $A_1 \sim A_N$, 它包含整个系统的不同动态特性信息。参考文献 [40] 指出, 变换器功率级的输入或输出端的系统接口特性包含了最有用的信息。基于系统的最小环路增益, 可以推导系统的稳定性^[44]。但是具有良好裕度 (比如无阻抗重叠) 的稳定系统并不能确保变换器的瞬态特性是符合要求的^[42,43]。

通常, 变换器输入侧的 EMI 滤波器或电容使变换器的性能分析变得更复杂, 因为这些组件会影响系统的测量信息^[43]。支持输出电压远端检测功能的变换器模块极大地影响了变换器的性能^[45]。参考文献 [46] 指出, 输出电压远端检测电路的无源器件与变换器内部器件相连接将极大地改变相关变换器的动态特性 (见图 1.6)。

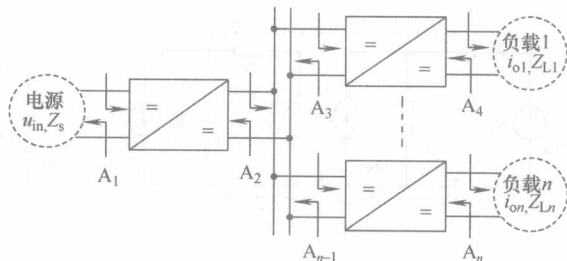


图 1.5 不同系统接口

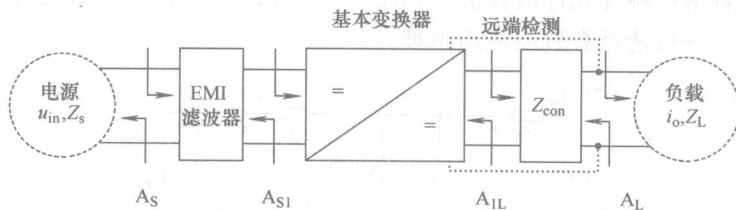


图 1.6 变换器的内部系统接口图

总之, 互联系统的稳定性分析是可以进行的, 但是判断系统的瞬态特性是否令人满意, 是一个非常复杂的问题, 很难获得准确的信息, 这个问题是值得深思的。参考文献 [47-50] 解释和说明了减少、甚至消除互联系统相互影响的重要性。

1.4 规范等效电路

图 1.3 所示的规范等效电路并不是真正的规范等效电路, 因为它只代表了工作在 CCM 模式的、含有 2 个储能元件的 VMC 变换器的动态特性。图 1.7 所示的二端口等效电路才是表征电压输入-电压输出变换器动态特性的规范等效电路^[11,51], 它