



开关变换器

建模、分析与控制

Modeling, Analysis and Control of Switching Converters

周国华 许建平 吴松荣 / 编著



科学出版社

开关变换器建模、分析与控制

周国华 许建平 吴松荣 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书涉及开关变换器建模、分析与控制方法的综合性理论和应用研究,具体内容包括:开关变换器的功率变换原理分析、开关变换器电路拓扑及其稳态特性、开关变换器的状态空间平均建模、开关变换器的时间平均等效电路、软开关变换器电路拓扑及其稳态特性、软开关变换器时间平均等效电路分析、软开关变换器广义状态空间平均建模、开关变换器调制与控制技术、电压型控制开关变换器分析与设计、电流型控制开关变换器分析与设计。

本书可作为高等院校电力电子、自动化等相关专业本科生、研究生的教材,也可作为电力电子领域工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

开关变换器建模、分析与控制 / 周国华, 许建平, 吴松荣编著.
—北京: 科学出版社, 2016.8
ISBN 978-7-03-049763-5

I. ①开… II. ①周… ②许… ③吴… III. ①开关-变换器
IV. ①TN624

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 206501 号

责任编辑: 杨 岭 华宗琪 / 责任校对: 葛茂香 贺江艳
封面设计: 墨创文化 / 责任印制: 余少力

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码: 100717
<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年8月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016年8月第一次印刷 印张: 15 1/4

字数: 360千字

定价: 59.00元

前 言

1948年,巴丁、布莱特和肖克莱发明了晶体管,引发了一场电子工业革命,使半导体工业、通信及信息处理、计算机技术等跨入了一个新世纪。晶体管的出现不仅对信息工业发生决定性的影响,还促进了其他新事物的产生与发展。1957年,在晶体管的基础上发展起来的晶闸管,也快速进入实用阶段,并在诸如电机驱动、调速、光控、温控、高压直流输电等传统电力工业领域内获得广泛应用。时至今日,由晶闸管派生出来的一系列电力电子器件(GTO、BJT、MOSFET、IGBT等)已经渗透到消费电子产品、电力系统、运输、国防、航空、航天及许多传统工业之中;与此相应,研究这类器件的开发及其在电路和系统中应用的一门崭新学科——电力电子学(power electronics),作为一门横跨电力、电子和控制的边缘交叉学科迅速崛起,引发了第二次电子工业革命。

开关变换器(switching converter)作为电力电子技术的核心,如DC-DC直流变换器、DC-AC逆变器、AC-DC整流器和AC-AC变频器,在各类电力电子系统中扮演着主要的角色,其共同的工作特点是,通过调节其中开关元件的工作状态,以求达到所要求形式的功率变换和一定的输入/输出特性。对开关变换器的工作原理、建模分析和控制技术进行系统、深入的论述,研究其功率变换关系,以及为实现这些变换所需的电路拓扑、元件的构成,对于正确认识和了解开关变换器,以及正确地进行开关变换电路的分析和设计具有重要的意义。

开关变换器的周期性开关工作特性导致其具有特殊的建模、分析和控制方法。本书对常用的开关变换器电路拓扑进行了讨论,系统论述了开关变换器的基本工作原理、建模分析以及控制方法,以对开关变换器电路的工作原理有一个系统、全面的认识和了解。

全书共分为10章。基于特勒根定理,第1章系统讨论了开关变换器(DC-DC、DC-AC、AC-DC、AC-AC)的工作原理及其功率转换关系,着重探讨了为实现所需的功率转换,开关变换器的元件构成及互连拓扑应满足的要求,得出了普遍的结论。第2章讨论了三种基本的非隔离型开关变换器(Buck变换器、Boost变换器、Buck-Boost变换器)及其工作模式,详细分析了它们的工作原理、主要电路波形和电压增益等特性,并简要介绍了Cuk变换器,SEPIC变换器和Zeta变换器等非隔离型开关变换器;讨论了常用的隔离型开关变换器(正激变换器、反激变换器、推挽变换器、半桥变换器、全桥变换器)的电路拓扑、工作原理及工作特性;讨论了开关变换器电路中磁性元件的工作特性。第3章讨论了开关变换器的状态空间平均建模方法。通过求解开关变换器的状态方程,针对实际开关变换器所满足的电路参数条件,推导了开关变换器的状态空间平均方程,并指出其适用范围,对于正确应用状态空间平均方法对开关变换器进行建模分析,具有指导意义。针对状态空间平均建模方法存在运算复杂、物理意义不清晰的缺点,第4章重点讨论了开关变换器的时间平均等效电路建模方法,并利用时间平均等效电路建模分析

方法对常规开关变换器进行了建模分析。开关变换器的时间平均等效电路建模分析过程表明,时间平均等效电路建模方法物理意义清晰,并大大简化了开关变换器的建模分析过程。

随着对开关变换器体积、重量、成本等要求的不断提高,开关频率的提高已成为开关变换器的重要发展趋势;为了实现高频率、高效率功率变换,需要采用软开关变换技术。第5章对常用的软开关变换器的电路拓扑和稳态工作特性进行了详细的论述,给出了软开关变换器的关键电路参数以及与常规开关变换器的区别与联系,以利于正确设计合理的软开关变换器电路。第6章以准谐振开关变换器为例,利用时间平均等效电路建模方法,对软开关变换器进行了分析。由于谐振开关变换器的谐振频率往往与开关频率是一个数量级的,状态空间平均方法所要求的开关变换器的开关频率远大于特征频率的条件已经不再成立,因此不能直接利用状态空间平均方法对谐振开关变换器进行建模分析,而必须对状态空间平均方法进行改进,以适用软开关变换器的建模分析。第7章建立了开关变换器的广义状态空间平均方程,降低了对开关变换器电路参数条件的要求,从而可以采用广义状态空间平均方法对软开关变换器的降阶状态方程进行状态空间平均等效。对于实际开关变换器(包括常规开关变换器和软开关变换器),广义状态空间平均方法所要求的前提条件很容易满足,因此可以采用广义状态空间平均方法对各类开关变换器进行建模分析,从而在数学上统一了开关变换器的建模分析技术。

开关变换器是通过调节开关元件的导通时间或关断时间来实现输出电压(或输出电流)的调整。为了使开关变换器输出电压(或输出电流)稳定,且不随运行条件(如输入电压或负载等)或环境条件、电路参数等变化而改变,必须对开关变换器进行控制。第8章对开关变换器的调制与控制技术进行了详细的论述与分类,以帮助读者对开关变换器的控制系统有一个全面的了解,并重点讨论了常用的调制方法和控制技术。第9章讨论了电压型控制开关变换器的分析与设计,包括环路增益、频域分析基础、补偿网络和设计实例。第10章讨论了电流型控制开关变换器的分析与设计,包括电流型控制开关变换器的精确模型、一阶近似模型,以及基于精确模型和近似模型的设计实例。

本书内容丰富、新颖,重点介绍了典型的开关变换器电路及其主要特性,详细论述了开关变换器电路的建模分析与控制方法;部分内容源自国家自然科学基金面上项目(61371033、51177140、50677056)的创新成果,是作者多年来部分科研成果的积累与总结。在本书的撰写过程中,学习并引用了国内外相关书籍、教材和重要文献,使作者受益匪浅,在此对所有文献的作者表示衷心的感谢!

本书第2章、第8章、第9章、第10章内容由周国华教授撰写,并对全书内容进行了规划和统稿;第1章、第3章、第4章、第7章内容由许建平教授撰写,并对全书内容进行了审核;第5章、第6章内容由吴松荣副教授撰写。博士研究生张希、陈一鸣、蔡亚萍,硕士研究生周述晗、李振华、何俊鹏、杨琦、刘啸天、冷敏瑞、殷刚、李兵兵、张建丰等参与了本书大量图形的绘制工作以及公式的推导及校对,在此一并表示感谢。

由于作者学识有限,参阅资料有限,书中难免存在不足与疏漏之处,恳请广大读者予以批评指正!

作者

2016年6月

目 录

第 1 章 开关变换器的功率变换原理分析	1
1.1 开关元件的功率变换	1
1.1.1 直流有源元件	2
1.1.2 交流有源元件	2
1.2 开关变换器的功率变换原理	4
1.2.1 整流网络(AC-DC)	5
1.2.2 逆变网络(DC-AC)	5
1.2.3 频率变换网络(AC-AC)	6
1.2.4 直流变换网络(DC-DC)	7
1.3 开关 DC-DC 变换器的基本性质及其基本拓扑的实现	7
1.4 开关 DC-DC 变换器电路中的功率转换关系——实例分析	9
1.5 本章小结	10
第 2 章 开关变换器电路拓扑及其稳态特性	11
2.1 非隔离型开关变换器	11
2.1.1 Buck 变换器	11
2.1.2 Boost 变换器	17
2.1.3 Buck-Boost 变换器	21
2.1.4 Cuk 变换器	24
2.1.5 SEPIC 变换器	25
2.1.6 Zeta 变换器	25
2.2 隔离型开关变换器	26
2.2.1 正激变换器	27
2.2.2 反激变换器	30
2.2.3 推挽变换器	32
2.2.4 半桥变换器	33
2.2.5 全桥变换器	33
2.3 磁性元件工作特性	34
2.3.1 磁性材料的磁滞回线	34
2.3.2 磁场强度	34
2.3.3 损耗和磁芯利用率	35
2.3.4 磁芯的三种工作状态	35
2.4 本章小结	37

第 3 章 开关变换器的状态空间平均建模	38
3.1 CCM 开关变换器的状态空间平均模型	38
3.1.1 CCM 开关变换器的状态空间方程及其近似解	38
3.1.2 CCM 开关变换器的状态空间平均方程	39
3.1.3 CCM 开关变换器的直流稳态和交流小信号等效方程	41
3.2 DCM 开关变换器的状态空间平均模型	43
3.2.1 DCM 开关变换器的状态空间平均方程	43
3.2.2 DCM 开关变换器的直流稳态和交流小信号等效方程	44
3.3 Buck 变换器的状态空间平均建模分析	46
3.3.1 CCM Buck 变换器的状态空间平均建模分析	46
3.3.2 DCM Buck 变换器的状态空间平均建模分析	50
3.4 Boost 变换器的状态空间平均建模分析	56
3.4.1 CCM Boost 变换器的状态空间平均建模分析	56
3.4.2 DCM Boost 变换器的状态空间平均建模分析	60
3.5 Buck-Boost 变换器的状态空间平均建模分析	65
3.5.1 CCM Buck-Boost 变换器的状态空间平均建模分析	65
3.5.2 DCM Buck-Boost 变换器的状态空间平均建模分析	70
3.6 本章小结	75
第 4 章 开关变换器的时间平均等效电路	76
4.1 开关变换器的时间平均等效电路原理	76
4.2 CCM 开关变换器时间平均等效电路分析	77
4.2.1 CCM Buck 变换器时间平均等效电路分析	77
4.2.2 CCM Boost 变换器时间平均等效电路分析	81
4.2.3 CCM Buck-Boost 变换器时间平均等效电路分析	85
4.3 DCM 开关变换器时间平均等效电路分析	89
4.3.1 DCM Buck 变换器时间平均等效电路分析	89
4.3.2 DCM Boost 变换器时间平均等效电路分析	92
4.3.3 DCM Buck-Boost 变换器时间平均等效电路分析	96
4.4 隔离型开关变换器时间平均等效电路分析	100
4.4.1 CCM 正激变换器时间平均等效电路分析	100
4.4.2 CCM 反激变换器时间平均等效电路分析	103
4.4.3 DCM 正激变换器时间平均等效电路分析	107
4.4.4 DCM 反激变换器时间平均等效电路分析	111
4.5 本章小结	116
第 5 章 软开关变换器电路拓扑及其稳态特性	117
5.1 谐振变换器	117
5.1.1 传统谐振变换器	117
5.1.2 LLC 谐振变换器	119

5.2	ZCS/ZVS-QR 变换器	121
5.3	PWM 软开关变换器	123
5.3.1	ZCS-PWM 变换器	123
5.3.2	ZVS-PWM 变换器	125
5.3.3	ZCT-PWM 变换器	126
5.3.4	ZVT-PWM 变换器	127
5.3.5	三端软开关	128
5.4	有源钳位软开关变换技术	129
5.4.1	有源钳位正激变换器	129
5.4.2	有源钳位反激变换器	131
5.4.3	有源钳位反激-正激变换器	132
5.5	移相全桥 ZVS-PWM 变换器	132
5.5.1	工作原理	132
5.5.2	移相全桥 ZVS-PWM 变换器的几个问题分析	134
5.6	本章小结	135
第 6 章	软开关变换器时间平均等效电路分析	137
6.1	ZCS-QR Buck 变换器时间平均等效电路分析	137
6.1.1	ZCS-QR Buck 变换器工作原理	137
6.1.2	ZCS-QR Buck 变换器时间平均等效电路模型	140
6.1.3	ZCS-QR Buck 变换器直流稳态特性分析	141
6.1.4	ZCS-QR Buck 变换器交流小信号分析	142
6.2	ZVS-QR Boost 变换器时间平均等效电路分析	144
6.2.1	ZVS-QR Boost 变换器工作原理	144
6.2.2	ZVS-QR Boost 变换器时间平均等效电路模型	147
6.2.3	ZVS-QR Boost 变换器直流稳态特性分析	148
6.2.4	ZVS-QR Boost 变换器交流小信号分析	149
6.3	本章小结	151
第 7 章	软开关变换器广义状态空间平均建模	152
7.1	广义状态空间平均技术	152
7.2	ZCS-QR Buck 变换器 GSSA 分析	155
7.2.1	ZCS-QR Buck 变换器工作原理分析	155
7.2.2	ZCS-QR Buck 变换器的直流稳态特性	157
7.2.3	ZCS-QR Buck 变换器的交流小信号特性分析	159
7.3	ZVS-QR Boost 变换器 GSSA 分析	160
7.3.1	ZVS-QR Boost 变换器工作原理分析	160
7.3.2	ZVS-QR Boost 变换器的直流稳态特性	163
7.3.3	ZVS-QR Boost 变换器的交流小信号特性分析	164
7.4	本章小结	165

第 8 章 开关变换器调制与控制技术	166
8.1 开关变换器调制方法	166
8.1.1 PWM 调制	166
8.1.2 PFM 调制	169
8.1.3 PWM/PFM 混合调制	170
8.2 开关变换器控制技术分类	171
8.3 电压型控制	174
8.3.1 电压型 PWM 控制	174
8.3.2 电压型 PFM 控制	174
8.4 电流型控制	177
8.4.1 峰值电流控制	177
8.4.2 谷值电流控制	181
8.4.3 平均电流控制	183
8.4.4 其他电流型控制	183
8.5 电荷型控制	184
8.6 磁通型控制	185
8.7 V^2 型控制	186
8.7.1 峰值 V^2 控制	186
8.7.2 谷值 V^2 控制	189
8.8 V^2C 型控制	189
8.8.1 峰值 V^2C 控制	189
8.8.2 谷值 V^2C 控制	191
8.9 恒流输出控制	191
8.10 本章小结	193
第 9 章 电压型控制开关变换器分析与设计	194
9.1 环路增益与闭环传递函数	194
9.2 频域分析基础	196
9.2.1 稳定裕量	196
9.2.2 闭环系统的频域性能指标	198
9.3 补偿网络设计	201
9.3.1 超前补偿	201
9.3.2 滞后补偿	203
9.3.3 滞后-超前补偿	205
9.4 电压型控制开关变换器设计实例	207
9.5 本章小结	214
第 10 章 电流型控制开关变换器分析与设计	215
10.1 电流型控制开关变换器精确模型	215
10.2 电流型控制开关变换器一阶近似模型	221

10.3 基于精确模型的设计实例	225
10.4 基于近似模型的设计实例	227
10.5 本章小结	231
参考文献	232

第 1 章 开关变换器的功率变换原理分析

开关变换器是通过调整开关元件的周期性开关工作状态来实现功率变换。因此,认识和了解开关元件实现功率变换的原理,不仅有助于学习开关变换器电路拓扑及其电路的实现原则,还对于研究开关变换器电路的建模、分析和控制具有重要的意义。为此,本章在特勒根定理的基础上,对各种开关变换器(包括 DC-DC、DC-AC、AC-DC、AC-AC)中开关元件的功率转换关系进行探讨,详细分析了开关元件在开关变换器电路中的作用,以及开关变换器电路拓扑对开关元件的基本要求。最后,以 DC-DC 变换器为例,阐述了开关变换器中开关元件在功率变换中的作用,并结合具体的 Buck 变换器电路,验证了其功率转换关系。

1.1 开关元件的功率变换

开关变换器是一个通过开关元件无损耗地将输入电源功率转换为负载所需要的输出功率的一种功率变换网络。根据输入电源功率和负载所要求的输出功率的类型不同,可以将开关变换器划分为 DC-AC、AC-DC、AC-AC 和 DC-DC 变换器。

考虑一个由功率半导体开关元件和电抗性元件以及输入电源和负载构成的开关变换器,其中电抗性元件包括线性定常电容和线性定常电感,功率半导体开关元件包括功率场效应管、二极管等非线性无源电阻性元件。如果该开关变换器中的功率半导体开关元件以周期 T 进行周期性的工作,则当该开关变换器工作于稳态时,开关变换器中任意电路元件 k 上的电压 $v_k(t)$ 和流过电路元件 k 的电流 $i_k(t)$ 是一个周期为 T 的周期性函数,它们可以表示为

$$v_k(t) = V_k(0) + \sum_{n=1}^{\infty} v'_k(n) \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} v''_k(n) \sin(n\omega t) \quad (1.1a)$$

$$i_k(t) = I_k(0) + \sum_{n=1}^{\infty} i'_k(n) \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} i''_k(n) \sin(n\omega t) \quad (1.1b)$$

式中, $\omega = 2\pi/T$, 则电路元件 k 上损耗的功率为 $v_k(t) \cdot i_k(t)$, 其平均值可以表示为

$$P_k = P_k(0) + P_k(1) + \dots + P_k(n) + \dots = P_k(0) + \sum_{n=1}^{\infty} P_k(n) \quad (1.2)$$

式中, $P_k(0) = V_k(0)I_k(0)$ 是电路元件 k 上损耗的直流功率,而

$$\sum_{n=1}^{\infty} P_k(n) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2} [v'_k(n)i'_k(n) + v''_k(n)i''_k(n)]$$

是电路元件 k 上损耗的交流功率, $P_k(n)$ 是频率为 $n\omega$ 时电路元件 k 上损耗的交流功率。

由电路元件 k 的元件特性可知, 对一个线性定常电抗性元件 k , 有

$$P_k = P_k(0) = P_k(n) = 0, \quad \forall n \in \mathbb{N} \quad (1.3)$$

而对于功率半导体开关元件，由于它们是以开关状态工作的，因此它们是无损耗性元件，即

$$P_k = P_k(0) + \sum_{n=1}^{\infty} P_k(n) = 0 \quad (1.4)$$

由式(1.4)可知，由于开关元件是无损耗的，所以它吸收的一部分直流或交流功率必须全部转换为其他频率成分的功率并释放给外接电路。由此可见，开关元件实质上可以看成是一个功率转换元件。特别地，如果对开关元件 k 有 $P_k(0) \geq 0$ ，则该开关元件将从网络中吸收部分直流功率，然后将它们全部以交流功率的形式释放出来；反之，如果对开关元件 k 有 $P_k(0) < 0$ ，则该开关元件将从网络中吸收一部分交流功率，然后将它们变成直流功率和其他频率成分的交流功率释放出去。

1.1.1 直流有源元件

对于图 1.1(a)所示的二极管元件及其所示的参考方向，当它工作在 $i-v$ 平面的第二象限，即对于理想二极管，则有

$$v(t) \leq 0, i(t) \geq 0$$

于是有

$$V(0) \leq 0, I(0) \geq 0$$

因此，二极管 D 上消耗直流功率为

$$P(0) = V(0)I(0) \leq 0$$

即二极管 D 从网络中吸收交流功率，然后将它们全部以直流功率和其他频率成分的交流功率释放出去，对于这样的元件，通常定义它为直流有源元件。

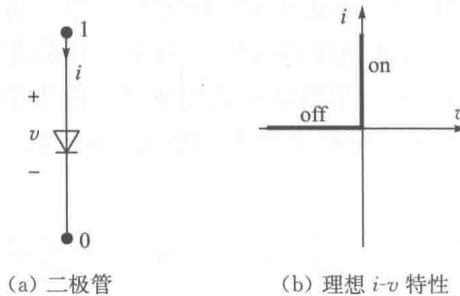


图 1.1 二极管示意图及其 $i-v$ 特性曲线

1.1.2 交流有源元件

对于图 1.2 所示的 BJT 和 IGBT 及其参考方向，当它工作在 $i-v$ 平面的第一象限时，即对于理想 BJT 和 IGBT 有

$$i(t) \geq 0, v(t) \geq 0$$

于是有

$$I(0) \geq 0, V(0) \geq 0$$

因此，BJT 和 IGBT 上消耗的直流功率为

$$P(0) = V(0)I(0) \geq 0$$

即 BJT 和 IGBT 从网络中吸收直流功率，然后将它们全部以交流功率的形式输出到网络的其他部分，对于这样的元件，将其定义为交流有源元件。

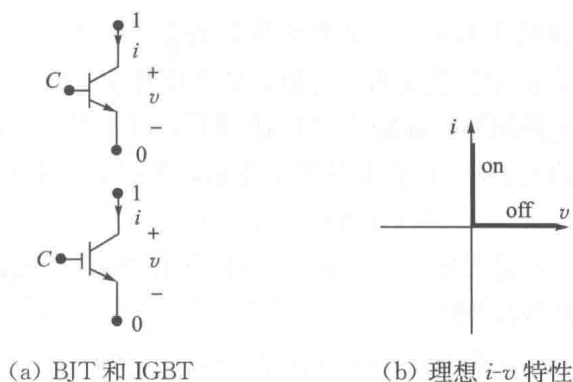


图 1.2 BJT 和 IGBT 示意图及理想 $i-v$ 特性曲线

对于图 1.3 所示的 MOSFET 及其参考方向，它通常工作在 $i-v$ 平面的第一象限，同时也可以工作在 $i-v$ 平面的第四象限。当 MOSFET 工作在 $i-v$ 平面的第一象限时，它具有与 BJT 和 IGBT 一样的功率作用，即 MOSFET 是交流有源元件，它从网络中吸收直流功率，然后将它们全部以交流功率的形式输出到网络的其他部分；而当 MOSFET 工作在 $i-v$ 平面的第四象限时，它具有与二极管一样的功率作用，即 MOSFET 也可以是直流有源元件，它从网络中吸收交流功率，然后将它们全部以直流功率和其他频率成分的交流功率释放出去。

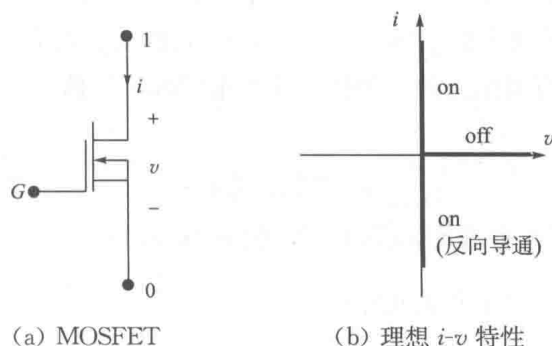


图 1.3 MOSFET 示意图及理想 $i-v$ 特性

利用类似的方法，也可以对其他功率半导体开关元件的功率转换原理进行分析。由上述分析可知，功率半导体开关元件实质上是功率转换元件，它将功率变换网络中的一部分交流功率(包括频率为零的直流功率)转换为其他频率成分的交流功率。二极管是一个将交流功率转换为直流功率的直流有源元件；BJT 和 IGBT 是将直流功率全部转换为交流功率的交流有源元件；而对于 MOSFET，根据它工作于正向还是反向导通状态，既可以是交流功率转换为直流功率的直流有源元件，也可以是将直流功率全部转换为交流功率的交流有源元件。

1.2 开关变换器的功率变换原理

对于一个由 r_d 个直流输入电源, r_a 个频率为 f_i 的交流输入电源, $r = r_d + r_a$, b_S 个工作频率为 f_s 的开关元件, b_C 个线性定常电容器, b_L 个线性定常电感器以及 b_R 个线性定常负载电阻器构成的功率变换网络, 在稳态工作条件下, 由于功率变换网络中除了开关元件以及输入电源外所有的 R, L, C 都是线性定常的, 因此, 在电路中只存在频率为

$$f(m, n) = mf_i + nf_s$$

的电压和电流, 其中 m, n 是满足 $f(m, n) \geq 0$ 的所有整数(包括负整数、0、正整数), 设 m, n 的取值构成集合 N_f , 即

$$\forall (m, n) \in N_f, f(m, n) \geq 0$$

则对于上述的功率变换网络, 由特勒根定理可得

$$\sum_{j=1}^r (u_{I,j}, i_{I,j}) = \sum_{j=1}^{b_S} (u_{S,j}, i_{S,j}) + \sum_{j=1}^{b_C} (u_{C,j}, i_{C,j}) + \sum_{j=1}^{b_L} (u_{L,j}, i_{L,j}) + \sum_{j=1}^{b_R} (u_{R,j}, i_{R,j}) \quad (1.5)$$

式中, $u_{k,j}$ 是第 j 个网络元件 k 上的电压, 其中 $k = I, S, C, L, R$; $i_{k,j}$ 是流过第 j 个网络元件 k 的电流; 网络元件 I, S, C, L, R 分别表示输入电源、开关元件、线性定常电容、电感及电阻。

由式(1.3)可知, 对于线性定常电容 C 和线性定常电感 L , 有

$$P_{C,j} = P_{C,j}(0, 0) = P_{C,j}(m, n) = 0, \forall (m, n) \in N_f$$

$$P_{L,j} = P_{L,j}(0, 0) = P_{L,j}(m, n) = 0, \forall (m, n) \in N_f$$

式中, $P(m, n)$ 表示频率为 $f(m, n) = mf_i + nf_s$ 的交流功率。

对式(1.5)中所有网络元件上的瞬时功率求时间平均值, 得到

$$\sum_{j=1}^r [P_{I,j}(0, 0) + P_{I,j}(1, 0)] = \sum_{j=1}^{b_S} \sum_{(m,n) \in N_f} P_{S,j}(m, n) + \sum_{j=1}^{b_R} \sum_{(m,n) \in N_f} P_{R,j}(m, n) \quad (1.6)$$

式中, $\sum_{(m,n) \in N_f}$ 表示对所有满足 $(m, n) \in N_f$ 的 m, n 求和。

由式(1.4)可知, 对于开关元件有

$$\sum_{(m,n) \in N_f} P_{S,j}(m, n) = 0 \quad (1.7)$$

对式(1.6)进行分解, 得到

$$\sum_{j=1}^r P_{I,j}(0, 0) = \sum_{j=1}^{b_S} P_{S,j}(0, 0) + \sum_{j=1}^{b_R} P_{R,j}(0, 0) \quad (1.8a)$$

$$\sum_{j=1}^r P_{I,j}(1, 0) = \sum_{j=1}^{b_S} P_{S,j}(1, 0) + \sum_{j=1}^{b_R} P_{R,j}(1, 0) \quad (1.8b)$$

$$\sum_{j=1}^{b_S} \sum_{(m',n') \in N'_f} P_{S,j}(m', n') + \sum_{j=1}^{b_R} \sum_{(m',n') \in N'_f} P_{R,j}(m', n') = 0 \quad (1.8c)$$

在式(1.8c)中, $(m', n') \in N'_f$ 是 N_f 中去掉元素 $(0, 0), (1, 0)$ 后, $(m, n) \in N_f$ 的

一个真子集, 即

$$N'_i \cup (0, 0) \cup (1, 0) = N_i$$

由式(1.7)可得

$$\sum_{j=1}^{b_S} [P_{S,j}(0,0) + P_{S,j}(1,0) + \sum_{(m',n') \in N'_i} P_{S,j}(m',n')] = 0 \quad (1.9)$$

式(1.8)和式(1.9)描述了功率变换网络中的基本功率关系, 根据式(1.8)和式(1.9), 下面将依次讨论各类功率变换网络的性质。

1.2.1 整流网络(AC-DC)

整流网络是将交流输入功率转换为负载所需要的直流功率的网络, 对于整流网络, 则

$$(1) \quad \sum_{j=1}^r P_{L,j}(0,0) = 0; P_{R,j}(0,0) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, b_R$$

即

$$\sum_{j=1}^{b_S} P_{S,j}(0,0) \leq 0$$

因此, 在整流网络中, 开关元件必须由直流有源元件(工作在 $i-v$ 平面第二象限的二极管或第四象限的反向导通状态的 MOSFET)和/或其他开关元件构成, 同步整流就是由 MOSFET 实现整流变换的典型应用, 但其不能全部由交流有源元件构成(工作在 $i-v$ 平面的第一象限的 BJT、IGBT 和正向导通状态的 MOSFET)。

$$(2) \quad \sum_{j=1}^{b_R} P_{R,j}(0,0) = 0$$

所以,

$$\sum_{j=1}^r P_{L,j}(1,0) = \sum_{j=1}^{b_S} P_{S,j}(1,0) = - \sum_{j=1}^{b_S} [P_{S,j}(0,0) + \sum_{(m',s') \in N'_i} P_{S,j}(m',n')]$$

即交流输入功率由开关元件转换为直流功率和其他频率成分 $f(m', n') = m'f_i + n'f_s$ 的交流功率, 并输出到网络的其余部分, 其中 $(m', n') \in N'_i$ 。

理想的整流网络要求对所有的开关元件, 有

$$\sum_{j=1}^{b_S} \sum_{(m',n') \in N'_i} P_{S,j}(m',n') = 0$$

即要求网络中的开关元件将从输入电源获得的交流功率全部转换为直流功率。

1.2.2 逆变网络(DC-AC)

逆变网络是将直流输入功率转换为频率为 f 的交流输出功率的网络。如果对理想的逆变网络, 选择输出交流流量频率为开关频率 f_s , 则

$$(1) \quad \sum_{j=1}^r P_{L,j}(0,1) = 0, \quad \sum_{j=1}^{b_R} P_{R,j}(0,1) \geq 0$$

即

$$\sum_{j=1}^{b_S} P_{S,j}(0,1) = - \sum_{j=1}^{b_S} P_{R,j}(0,1) \leq 0$$

由式(1.9), 得

$$\sum_{j=1}^{b_S} P_{S,j}(0,0) = - \sum_{j=1}^{b_S} P_{S,j}(0,1) - \sum_{n'>1} P_{S,j}(0,n')$$

对于理想逆变网络, 有

$$P_{S,j}(0, n') = 0, \quad \forall n' > 1, n' \in Z$$

所以,

$$\sum_{j=1}^{b_S} P_{S,j}(0,0) \geq 0$$

即在逆变网络中, 开关元件必须由交流有源元件和/或其他开关元件构成, 而不能全部由直流有源元件构成。

$$(2) \quad \begin{aligned} P_{L,j}(0,0) &> 0, \quad j=1, 2, \dots, r \\ P_{R,j}(0,0) &= 0, \quad j=1, 2, \dots, b_R \end{aligned}$$

则

$$\sum_{j=1}^{b_S} P_{S,j}(0,0) = \sum_{j=1}^r P_{L,j}(0,0) > 0$$

即逆变网络中开关元件将输入直流功率全部转换为频率为 $f = n'f_s$ 的交流功率, 其中 $n' > 1$, 亦即

$$\sum_{j=1}^r P_{L,j}(0,0) = \sum_{j=1}^{b_S} P_{S,j}(0,0) = - \sum_{n' \geq 1} P_{S,j}(0,n')$$

1.2.3 频率变换网络(AC-AC)

频率变换网络是将频率为 f_i 的交流输入功率转化为频率为 f 的交流输出功率的网络。如果对理想的频率变换网络取 $f = f_s$, 则

$$(1) \quad \sum_{j=1}^r P_{L,j}(0,0) = 0, \quad \sum_{j=1}^{b_R} P_{R,j}(0,0) = 0$$

即

$$\sum_{j=1}^{b_S} P_{S,j}(0,0) = 0$$

亦即在频率变换网络中开关元件必须由交流有源元件和直流有源元件共同构成, 而不能单独由交流有源元件或直流有源元件构成。

$$(2) \quad \sum_{j=1}^r P_{L,j}(1,0) > 0, \quad \sum_{j=1}^{b_R} P_{R,j}(1,0) = 0$$

所以,

$$\sum_{j=1}^{b_S} P_{S,j}(1,0) > 0, \quad \sum_{j=1}^r P_{L,j}(1,0) = \sum_{j=1}^{b_S} P_{S,j}(1,0)$$

而

$$\sum_{j=1}^{b_S} P_{S,j}(1,0) = - \sum_{j=1}^{b_S} [P_{S,j}(0,0) + \sum_{(m',n') \in N'_i} P_{S,j}(m',n')]]$$

亦即在频率变换网络中, 开关元件将输入交流功率全部转换为频率为 $f=f_s$ 和 $f=m'f_i+n'f_s$ 的交流功率, 并输出到负载上去。对于理想的频率变换网络($f_i \rightarrow f_s$), 有

$$\sum_{(m',n') \in N'_i} P_{S,j}(m',n') = 0$$

1.2.4 直流变换网络(DC-DC)

直流变换网络是将直流输入电压或电流变换为负载所需要的直流电压或电流的一种网络, 也称为开关 DC-DC 变换器, 因此, 在直流变换网络中只存在频率为 $f=nf_s$, ($n=0, 1, 2, \dots$) 的电压或电流, 则对于直流变换网络, 有

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{b_S} P_{S,j}(0,0) &= \sum_{j=1}^r P_{L,j}(0,0) - \sum_{j=1}^{b_R} P_{R,j}(0,0) \\ \sum_{j=1}^{b_R} \sum_{(m',n') \in N'_i} P_{R,j}(m',n') &= 0, \quad \sum_{j=1}^{b_R} P_{R,j}(1,0) = 0 \end{aligned}$$

所以,

$$\sum_{j=1}^{b_S} \sum_{(m',n') \in N'_i} P_{S,j}(m',n') = 0, \quad \sum_{j=1}^{b_S} P_{S,j}(1,0) = 0$$

于是有

$$\sum_{j=1}^{b_S} P_{S,j}(0,0) = 0$$

因此, 在直流变换网络中, 开关元件所消耗的直流功率的总和为零, 即开关元件必须由交流有源元件和直流有源元件共同构成, 而不能单独由交流有源元件或直流有源元件构成。

1.3 开关 DC-DC 变换器的基本性质及其基本拓扑的实现

1.2 节从功率变换网络的一般功率关系出发, 讨论了 AC-DC、DC-AC、AC-AC 以及 DC-DC 变换器电路的基本功率关系, 并分析了实现所需的功率变换时开关元件必须满足的条件。本小节着重讨论开关 DC-DC 变换器电路的基本性质。

由 1.2 节可知, 对于 DC-DC 变换器电路, 它的开关元件必须由交流有源元件和直流有源元件共同构成, 即开关 DC-DC 变换器电路中必须至少有两个开关元件, 其中一个实现 DC-AC 变换, 另一个实现 AC-DC 变换。因此, 开关 DC-DC 变换器可以看作一个逆变网络再级联一个整流网络而构成。同时, 在逆变网络中, 开关元件必须由交流有源元件和/或其他开关元件构成; 在整流网络中, 开关元件必须由直流有源元件和/或其他开关元件构成。由此得到如下结论。

性质 1: 在开关 DC-DC 变换器电路中, 它的开关元件必须由工作在 $i-v$ 平面第一象限的开关元件和工作在 $i-v$ 平面第二象限或第四象限的开关元件共同构成。因此, 开关