

双主动全桥DC-DC变换器的 理论和应用技术

■ 赵彪 宋强 著



科学出版社

双主动全桥 DC-DC 变换器的 理论和应用技术

赵彪 宋强 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

双主动全桥 DC-DC 变换器具有模块化对称结构、高功率密度、双向功率传输能力、动态响应快、软开关实现容易等特点,适合于中大功率高频隔离功率转换应用场合。本书在概述双主动全桥变换器的发展背景和应用现状的基础上,系统论述了其基础理论及应用技术,包括双主动全桥 DC-DC 变换器的工作原理、控制方法、解析模型、运行特性、设计实现方法、衍生拓扑以及在柔性交直流输配电系统的应用等。

本书可为电力电子及相关专业高校师生和科研院所工程技术人员提供学术和工程应用参考。

图书在版编目(CIP)数据

双主动全桥 DC-DC 变换器的理论和应用技术/赵彪,宋强著. —北京:科学出版社,2017. 6

ISBN 978-7-03-052896-4

I. ①双… II. ①赵…②宋… III. ①变换器-研究 IV. ①TN624

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 113304 号

责任编辑:陈 婕 纪四穗 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017 年 6 月第一次印刷 印张:14 1/4

字数:280 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着智能电网和能源互联网的迅速发展,分布式电源及储能等的灵活接入、各类交直流输电网等的柔性连接成为重要发展目标。因此,在未来电网中,主要由变压器和开关构成的传统配电网方式将会改变,电力电子功率转换系统(power conversion system, PCS)将以更为核心的角色实现更为系统性的功能。双主动全桥 DC-DC 变换器(以下简称 DAB)具有模块化对称结构、高功率密度、双向功率传输能力、动态响应快、软开关实现容易等特点,适合于中大功率高频隔离功率转换系统(HFI-PCS),近年来吸引了国内外学者的广泛关注和研究。

虽然越来越多的关于 DAB 的研究论文见诸于国内外期刊,但是尚未见到有关专著问世。作者所在课题组较早地开展了 DAB 的理论和应用技术的研究,在 DAB 的工作原理、控制方法、解析模型、运行特性、设计实现方法、衍生拓扑以及在交直流输配电系统中的应用等方面进行了系统的研究。本书是对作者所在课题组在此方面取得成果的总结,共 13 章:第 1 章概述 DAB 的发展背景和应用现状,第 2 章介绍 DAB 的工作原理和基本运行特性,第 3 章分析 DAB 的控制方法,第 4 章提出一种 DAB 的统一解析模型,第 5~8 章分别探讨 DAB 的软开关特性、死区效应、暂态特性和损耗特性,第 9 章分析新型碳化硅器件在 DAB 中应用时的特性,第 10 章介绍几种典型的 DAB 衍生拓扑结构,第 11~13 章分别介绍以 DAB 为核心的不间断供电系统、直流变压器、交流电力电子变压器的系统级解决方案。

在撰写本书的过程中,作者参阅了不少国内外的书籍和相关论文,并将主要的文献列入本书的参考文献,在此向这些文献的作者致谢。在课题的研究中,清华大学的韩英铎院士、刘文华教授、姜齐荣教授、于庆广副教授、谢小荣副教授、陆超副教授、袁志昌副教授给予了很多的指导和关心,华北电力大学的李建国博士、深圳供电局赵宇明博士、刘国伟工程师给予了极大的帮助,曾作为博士后、博士生、硕士生的金一丁、孙伟欣、肖宜、王立雯、王裕、孙谦浩等为本书做出了重要贡献,在此一并致谢。

本书的研究工作得到了国家高技术研究发展计划(863 计划)(2013AA050104、2015AA050103)、国家自然科学基金面上项目(51077076)、国家自然科学基金青年科学基金项目(51507089)的资助,特此致谢。

本书内容主要是作者在此领域近期的研究成果,限于时间和水平,不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作 者

2017 年 3 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 双主动全桥变换器的发展背景	1
1.1.1 高频隔离功率转换系统的发展	1
1.1.2 宽禁带功率器件的发展	2
1.1.3 DAB 的发展	3
1.2 双主动全桥变换器的典型应用	5
1.2.1 电池储能并网系统	5
1.2.2 电力电子变压器及能量路由器	6
1.2.3 直流变压器	9
1.3 双主动全桥变换器研究中的关键问题	10
1.3.1 DAB 的高频特性和优化方法	10
1.3.2 先进器件的应用特性和优化设计	11
1.3.3 系统级应用方式和控制管理	11
1.4 本书的主要内容	12
第 2 章 双主动全桥变换器的工作原理	13
2.1 基本工作原理	13
2.2 移相控制方法	13
2.3 工作模态与开关特性	14
2.3.1 正向功率流	14
2.3.2 反向功率流	16
2.4 传输功率特性	19
2.5 本章小结	20
第 3 章 双主动全桥变换器的 PWM 移相控制方法	21
3.1 移相控制的功率回流现象	21
3.2 扩展移相控制方法	21
3.2.1 控制原理	21
3.2.2 工作模式与开关特性	22

3.2.3 传输功率特性	26
3.2.4 回流功率特性	27
3.2.5 电流应力特性	28
3.3 双移相控制方法	29
3.4 移相控制的优化开关策略	32
3.4.1 电流应力最优开关模型	32
3.4.2 电流应力最优控制模型	34
3.4.3 优化开关策略的扩展	34
3.5 实验研究	36
3.5.1 扩展移相控制实验	36
3.5.2 双移相控制实验	40
3.5.3 优化开关策略实验	41
3.6 本章小结	44
第 4 章 双主动全桥变换器的高频链统一模型	45
4.1 DAB 的高频链统一特性描述	45
4.1.1 移相控制的统一形式	45
4.1.2 高频链电压和电流统一描述	46
4.1.3 高频链传输功率统一描述	47
4.2 DAB 的高频链环流特性	48
4.2.1 高频链无功功率定义	48
4.2.2 环流功率统一描述	50
4.3 DAB 的高频链基波优化控制策略	50
4.3.1 基波环流最优模型	51
4.3.2 基波最优控制策略	52
4.3.3 基波最优控制策略表现性能	53
4.4 DAB 的工程化分析软件	53
4.5 实验分析	54
4.6 本章小结	57
第 5 章 双主动全桥变换器的软开关特性	58
5.1 DAB 的软开关行为	58
5.1.1 不匹配运行状态	58
5.1.2 开关行为分析	59
5.1.3 软开关运行范围	62

5.2 扩展移相控制对软开关行为的改进	63
5.2.1 EPS 控制不匹配运行状态	63
5.2.2 开关行为分析	64
5.2.3 软开关运行范围	69
5.3 谐振软开关方案	71
5.4 本章小结	73
第 6 章 双主动全桥变换器的死区效应与功率校正模型	74
6.1 电压极性反转和相位漂移现象	74
6.2 开关特性校正	75
6.2.1 升压状态	75
6.2.2 降压状态	79
6.2.3 匹配状态	81
6.3 传输功率特性校正	82
6.4 实验研究	85
6.4.1 开关特性实验	85
6.4.2 传输功率特性实验	91
6.5 本章小结	94
第 7 章 双主动全桥变换器的暂态特性与优化调制	95
7.1 暂态直流偏置和电流冲击效应	95
7.2 暂态特性描述	96
7.2.1 功率突增	96
7.2.2 功率突减	98
7.3 暂态优化调制	98
7.4 电流应力对比	100
7.5 实验研究	100
7.5.1 传统调制的暂态实验	101
7.5.2 优化调制的暂态实验	103
7.5.3 电流应力对比实验	103
7.6 本章小结	106
第 8 章 双主动全桥变换器的损耗特性分析方法	107
8.1 DAB 的特征电流描述	107
8.1.1 DAB 的开关函数定义	107
8.1.2 通态电流统一模型	109

8.1.3 开关电流统一模型	111
8.2 DAB 的通态损耗统一模型	111
8.2.1 开关管和二极管的通态损耗	111
8.2.2 变压器的通态损耗	112
8.2.3 电容的通态损耗	112
8.3 DAB 的开关损耗统一模型	113
8.3.1 DAB 的开关行为统一描述	113
8.3.2 DAB 的开关损耗	114
8.4 DAB 的损耗特性分析	116
8.4.1 分析计算参数	116
8.4.2 特征电流计算结果	116
8.4.3 DAB 的损耗分析	118
8.5 本章小结	120
第 9 章 基于 SiC 的双主动全桥变换器及其设计	121
9.1 Si-DAB 和 SiC-DAB 的比较分析	121
9.1.1 Si-DAB 和 SiC-DAB 损耗特性对比	121
9.1.2 Si-DAB 和 SiC-DAB 对比样机设计	122
9.2 SiC-DAB 安全工作区的定义	124
9.2.1 SiC 对 DAB 参数设计的影响	124
9.2.2 传输功率的有效工作区	125
9.2.3 电流应力的有效工作区	126
9.2.4 电流有效值的有效工作区	128
9.2.5 DAB 的安全工作区	129
9.3 SiC-DAB 的统一离散化设计策略	131
9.3.1 效率离散化特性	131
9.3.2 功率密度离散化特性	132
9.3.3 离散化参数设计	135
9.4 SiC-DAB 的优化设计和实现	136
9.4.1 参数优化设计	136
9.4.2 硬件优化设计	136
9.4.3 DAB 优化设计和实现的一般化流程和建议	137
9.5 实验研究	139
9.5.1 Si-DAB 和 SiC-DAB 的对比实验	139

9.5.2 SiC-DAB在高频隔离 PCS中的应用实验	142
9.6 本章小结	146
第10章 双主动全桥变换器的衍生拓扑	147
10.1 电流源型 DAB	147
10.2 三端口 DAB	148
10.3 三相 DAB	150
10.4 高频链多电平 DAB	152
10.4.1 三电平结构	152
10.4.2 模块化多电平结构	152
10.4.3 多重模块化结构	154
10.5 其他 DAB 衍生拓扑	156
10.5.1 器件串联型	156
10.5.2 直接型 AC-AC	156
10.6 本章小结	157
第11章 基于 DAB 的多功能模块化不间断供电系统	158
11.1 基于 DAB 的 IUPS 拓扑结构	158
11.2 IUPS 的运行方式	159
11.3 IUPS 的工作原理	162
11.3.1 整流馈电模块的工作原理	162
11.3.2 隔离充放电模块的工作原理	164
11.3.3 逆变模块的工作原理	164
11.4 IUPS 的控制和管理策略	165
11.4.1 分层控制管理体系	165
11.4.2 分散控制逻辑	167
11.4.3 分散逻辑控制策略	168
11.5 IUPS 的硬件设计与实现	171
11.6 实验研究	172
11.6.1 稳态实验分析	172
11.6.2 暂态实验分析	174
11.7 本章小结	177
第12章 基于 DAB 的直流固态变压器	178
12.1 基于 DAB 的 DCSST 拓扑结构	178
12.2 DCSST 的运行方式	179

12.3	DCSST 的工作原理	181
12.4	DCSST 的控制和管理策略	183
12.5	DCSST 的硬件设计和实现	184
12.6	实验研究	186
12.6.1	稳态实验分析	186
12.6.2	暂态实验分析	187
12.7	本章小结	188
第 13 章	基于 DAB 的交流固态变压器	190
13.1	基于 DAB 的 ACSST 拓扑结构	190
13.2	ACSST 的运行方式	191
13.3	ACSST 的工作原理	191
13.3.1	级联单元的工作原理	192
13.3.2	HFI 单元的工作原理	194
13.3.3	输出单元的工作原理	194
13.4	ACSST 的控制和管理策略	194
13.4.1	协调控制管理策略	194
13.4.2	分层控制管理体系	196
13.4.3	分散逻辑控制策略	198
13.5	ACSST 的硬件设计和实现	200
13.6	实验研究	201
13.6.1	稳态实验	201
13.6.2	暂态实验	202
13.7	基于 DAB 的 HFI-PCS 解决方案的统一策略探讨	205
13.8	本章小结	207
参考文献		208

第 1 章 绪 论

1.1 双主动全桥变换器的发展背景

1.1.1 高频隔离功率转换系统的发展

自 20 世纪 70 年代的能源危机后,能源短缺和环境污染一直是各国关注的焦点^[1]。分布式电源通常具有较高的供电可靠性、较低的初投资、较小的输电损失和适合可再生能源应用等大量优点,其发电能力使得配电网具有供电和发电的双向配电功能,灵活性增强^[2,3]。这些优势都使得分布式电源得到越来越多的重视,尤其是随着智能电网和能源互联网的迅速发展,分布式电源及储能的灵活接入成为智能电网和能源互联网建设中的重要发展目标之一^[4]。

然而,各种分布式电源和储能等都需要通过功率转换系统(power conversion system, PCS)才能接入电网;随着柔性直流配电网、微电网等的发展,各种高低压配电母线之间也需要通过 PCS 才能实现能量传递^[5,6],因此,在未来电网中,主要由变压器和开关构成的传统配电网方式将会改变。PCS 将作为更为核心的角色,不仅实现各种交直流电压转换和电压等级变换,还要实现功率流动的灵活控制和智能管理^[7,8];交直流输配电网、分布式电源、储能、负荷等将通过 PCS 形成一个能量变换网络。

在现有 PCS 的各种方案中,主要是通过工频隔离变压器来实现各类不同系统之间的电压匹配和电气隔离^[9-11]。而工频隔离变压器通常具有体积大、质量大、噪声大等缺点,这将阻碍 PCS 的普及。近年来,常采用高频隔离(high frequency isolation, HFI)变压器取代传统的工频隔离变压器,普遍认为这是 PCS 技术的必然发展趋势^[12,13]。图 1.1 给出了一种基于工频隔离和 HFI 的功率转换方案对比。采用 HFI 方案的优势在于:它使得 PCS 的体积小、重量轻、成本低,可避免传统工频变压器由于铁心磁饱和造成系统中电压电流波形畸变的问题;若将开关频率提高到 20kHz 以上,可大大减小 PCS 的运行噪声。尤其在 PCS 越来越普及的背景下,HFI-PCS 的应用前景广阔。

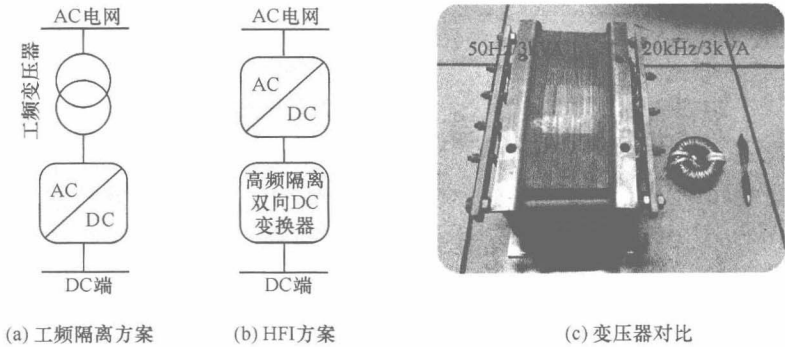


图 1.1 一种基于工频隔离和 HFI 的功率转换方案对比

1.1.2 宽禁带功率器件的发展

采用 HFI-PCS 技术取代工频隔离 PCS 技术可以大大提高 PCS 的功率密度，减小噪声等。但是，由于 HFI-PCS 通常包含双向 DC-DC 变换、DC-AC 变换等多级变换环节，高开关频率和多级变换将使损耗大为增加；并且传统的硅 (silicon, Si) 半导体功率器件已越来越接近其发展极限，特别是在高频率、高温度和高功率领域，这些原因使得目前 HFI-PCS 与大规模的实际应用尚有距离^[14]。

最近几年，碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 等新一代宽禁带 (wide band gap, WBG) 半导体器件越来越被人们所关注^[15,16]。表 1.1 列出了常见的 WBG 半导体材料与传统 Si 及砷化镓 (GaAs) 半导体材料的特性比较。相比于 Si 及 GaAs, 这些 WBG 半导体材料均具有更高的击穿场强、热导率及电子饱和速率，因此它们比 Si 及 GaAs 更适合制作高频率、高温度和高功率的半导体器件。在这些 WBG 半导体材料中，GaN 和 SiC 已经从材料研究阶段进入器件应用阶段^[17]。而相对于 GaN, SiC 的热导率、击穿场强更高，且 SiC 单晶材料更容易获得，价格相对要低，因此在高温和高压大功率领域，SiC 具有更多的优势。

表 1.1 几种半导体材料的性能对比

参数	Si	GaAs	4H-SiC	GaN
能带间隙/eV	1.1	1.43	3.26	3.45
击穿场强/(V/cm)	3×10^5	4×10^5	3×10^6	3×10^6
热导率/(W/(cm · K))	1.5	0.46	4.9	1.3
电子迁移率/(cm/s)	10^7	2×10^7	2.7×10^7	2.7×10^7
电阻系数/(Ω · cm)	10^3	10^8	$>10^{12}$	$>10^{10}$

由于晶体材料和外延设备的技术限制,我国 SiC 功率器件的制造技术相对落后。国外,量产化技术比较成熟的是 SiC 功率二极管,以美国 Cree 公司为代表生产的 SiC 开关器件已经进入市场,目前可以购买到 1200V/300A 以及 1700V/100A 等级的功率模块。

在 SiC 功率器件的应用研究方面,2008 年日本丰田公司开发出了 SiC 二极管逆变器,日本大阪的关西电力公司开发出 SiC 逆变器用于光伏发电。自 2008 年以来,在相关器件公司提供的 SiC-JFET、SiC-BJT 和 SiC-DMOS 样品的支持下,部分研究机构陆续对 SiC 开关器件进行了相关应用探讨。文献[18]~[21]研究了基于 SiC-JFET 的非隔离双向 DC-DC 变换器,应用于电动汽车储能电池的充放电管理;文献[14]、[22]~[25]探讨了基于 SiC-JFET 的 Buck/Boost 电路及逆变器等的应用特性;文献[26]对比了 SiC-BJT 和 Si-IGBT 功率器件的静态和开关特性;文献[27]~[29]分析了 SiC-DMOS 在五电平及升压直流变换器中的应用特性;文献[30]主要分析了 SiC-DMOS 在双主动全桥变换器中应用时的高频设计要素以及表现性能。文献[31]在 Rohm 公司 SiC-DMOS 样品的支持下,探讨了升压直流变换器的高频工作特性。另外,文献[32]还全面探讨了 SiC MOSFET 应用于分布式能源接口功率变换器的影响;文献[33]则对 SiC 器件的温度特性进行了深入的研究。

总体来说,相比于 Si 功率器件,SiC 具有高压、高温、高频、低损耗等大量优点,为解决 HFI-PCS 的技术瓶颈提供了新的途径,有望推动高压大功率 HFI-PCS 的实际应用。

1.1.3 DAB 的发展

根据前面的论述,在未来智能电网和能源互联网中,HFI-PCS 将会越来越普及。而相比传统的工频隔离 PCS,高频隔离双向 DC-DC 变换器(isolated bidirectional DC-DC converter, IBDC)将是 HFI-PCS 的关键环节。IBDC 的拓扑结构很多,而一般来说,各种 IBDC 均可以由对应的隔离单向 DC-DC 变换器(isolated unidirectional DC-DC converter, IUDC)演化得到。例如,反激式 IUDC 可以组成双反激式 IBDC,半桥式或推挽式 IUDC 可以组成双半桥式或双推挽式 IBDC,而全桥 IUDC 则可以组成双全桥变换器,或称双主动全桥(dual-active-bridge, DAB)。事实上,除了相同形式的 IUDC 可以组成上述对称式的 IBDC,不同形式的 IUDC 也可以组成不对称的 IBDC。例如,半桥式和推挽式 IUDC 可以组成半桥-推挽式 IBDC,由于半桥式和推挽式结构可以分别承受高低压端电压,所以这类 IBDC 较适合于宽电压调节范围和双向功率传输的应用场合。

与电力电子学科中传统 DC-DC 变换器的分类类似,基于开关管数量给出 IBDC 拓扑结构的一种分类方法,如表 1.2 所示。最简单的 IBDC 拓扑是双管结

构,如双反激式 IBDC^[34],三管结构如正反激式 IBDC^[35],四管结构如双推挽式 IB-DC、推挽正激式 IBDC、推挽反激式 IBDC 和双半桥式 IBDC^[36-39],五管结构如全桥正激式 IBDC^[40],六管结构如半桥全桥式 IBDC^[41],而八管结构主要指 DAB^[42]。

表 1.2 IBDC 拓扑结构的分类

开关管数量	典型结构
双管	双反激式,双丘克式,瑞泰-塞皮克式
三管	正反激式
四管	双推挽式,推挽正激式,推挽反激式,双半桥式
五管	全桥正激式
六管	半桥全桥式
八管	双全桥式(双主动全桥)

虽然 IBDC 的拓扑结构众多,但总体来说,当开关管的电压和电流等级一定时,IBDC 的功率传输能力与开关管数量成正比,例如,四管 IBDC 的功率传输能力是双管 IBDC 的 2 倍,是八管 IBDC 的 1/2,因此 DAB 具有最大的功率传输能力。除了上述优点,DAB 还具有模块化对称结构、双向功率传输能力、动态响应快、软开关实现容易等大量优点,尤其适合于中大功率应用场合。随着 PCS 的发展,DAB 在最近几年吸引了越来越多研究者的关注。

2007 年,日本东京工业大学赤木泰文课题组提出 DAB 将作为核心电路被普遍应用在新一代的 HFI-PCS 中^[43],此观点被很多学者所接受。图 1.2 给出了 DAB 的拓扑结构,其主要由两个全桥变换器、两个直流电容、一个辅助电感和一个 HFI 变压器组成。HFI 变压器给电路提供电气隔离和电压匹配,而辅助电感作为瞬时能量存储环节。

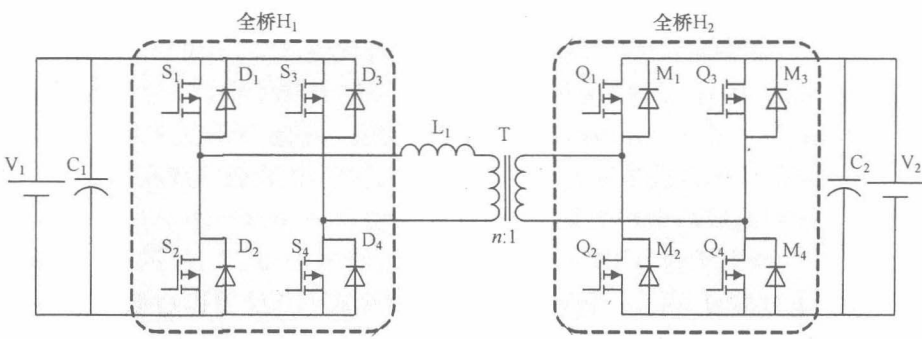


图 1.2 DAB 的拓扑结构

事实上,DAB早在1991年就被提出了^[44,45],但是受到当时功率器件和磁性材料等的限制,DAB的高频特性使得电路损耗较大,效率远达不到实际应用的需求,因此一直没有发展起来,相关文献的探讨也较少。而最近一些年,随着新兴功率器件以及磁性材料的发展(尤其是SiC功率器件的发展),DAB又吸引了很多学者的目光。

目前,国内外对该电路的研究主要集中在基本特性、软开关、拓扑结构及控制方法等方面。例如,文献[46]~[53]对DAB的传输功率、死区效应、动态模型等基本特性进行了研究;文献[54]~[63]提出了DAB的各种软开关方案及改进拓扑结构以减少元件损耗或改进软开关特性等;文献[64]~[70]提出了一簇混合移相控制算法以改善变换器特性、减小电流应力等;文献[71]和[72]对DAB在稳态状况下的基本工作原理、设计和控制方法进行了系统介绍;文献[73]提出了一种采用自然开关曲面的边界控制方案;文献[74]对暂态状况下的基本特性进行了讨论并提出了改进变换器鲁棒性的方法。

尽管如此,由于HFI-PCS技术得到重视的时间并不长,对于DAB很多方面的研究也还并不完善,一些基本特性和控制方法的探讨也仅仅停留在理论研究的范畴,对DAB在实际工作中的一些表现特性缺乏深入探讨。另外,由于DAB的高频特性,Si功率器件的应用已经接近极限,也使得基于Si功率器件的DAB表现性能有待提高。

1.2 双主动全桥变换器的典型应用

近几年,很多研究者纷纷开展了基于DAB的HFI-PCS的研究,这里介绍几个具有代表性的应用场景和研究项目。

1.2.1 电池储能并网系统

传统的电池储能并网系统(BESS),主要可以分为单步和双步两种结构^[75-77],如图1.3所示。其中,交流侧以单相变换为例。基于单步结构的BESS通过电压源变流器(VSC)直接接入电网,这种系统结构简单、功率损耗小,但是缺少直流电压管理单元,直流系统需要与电压源电压匹配,灵活性较低。相比单步结构,基于双步结构的BESS增加了DC-DC变换器(主要为Buck/Boost变换器)作为中间环节。以储能系统并网为例,DC-DC变换器可以减小蓄电池系统的电压等级,减小蓄电池串联数量,并且提高系统的电压稳定性。由于这些优点,双步结构的BESS在实际工程中得到了更广泛的应用^[78]。尽管如此,由于DC-DC变换器的加入,系统损耗和成本也相应增加。另外,为了保证直流单元的安全可靠运行,需要在直流单元和电网之间提供电气隔离,目前采用的方案主要是增加工频隔离变压器,而工

频变压器往往体积庞大、笨重、噪声很大并且电能质量差。

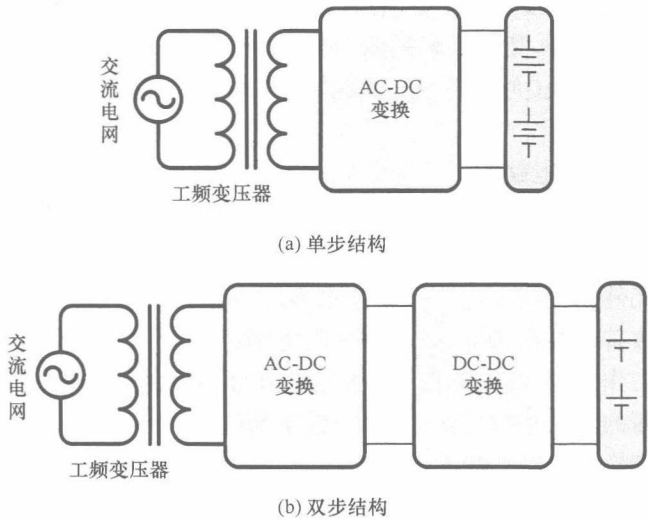


图 1.3 传统的电池储能并网系统的典型结构形式

图 1.4 给出了基于 DAB 的 BESS 的基本结构。在此结构中,采用 DAB 替代了传统的 Buck/Boost 变换器和工频变压器,因此 BESS 除了具有电压变换、电气隔离和功率传递的基本功能,还具有波形、潮流和电能质量控制功能,并且 HFI 变压器的使用使系统具有更高的功率密度和模块化程度以及更小的噪声。

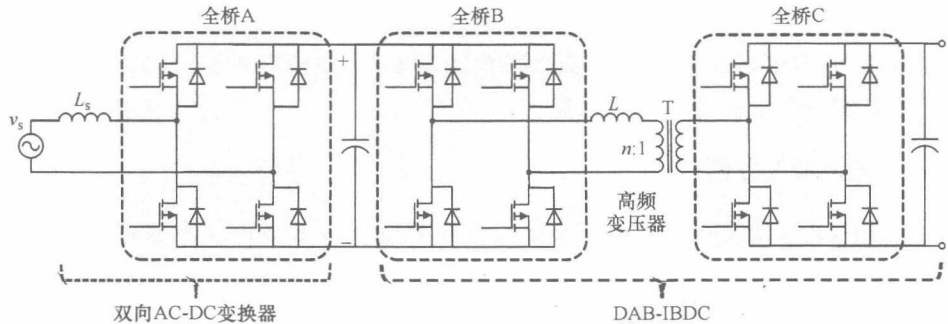


图 1.4 基于 DAB 的 BESS 的基本结构

1.2.2 电力电子变压器及能量路由器

1) 未来可再生能源传输和管理项目

在很短的时间里,计算机产业从大型集中的工业主机迅速转变成以分布式计算机为基础设施的全球互联网络。那么,随着可再生能源的大规模渗入,电力系统