

面向交直流混合配电系统的多端口电力电子 变压器研究综述

李 凯¹, 赵争鸣², 袁立强², 高畅毓¹, 文武松², 游小杰¹

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘 要: 多端口电力电子变压器作为交直流混合配电系统的一种关键枢纽设备, 具备能量流动双向、潮流灵活调节、谐波无功可控和端口故障隔离等功能, 近年来得到越来越多的关注。针对面向交直流混合配电系统的多端口电力电子变压器, 层层深入推演了其拓扑结构的发展历程, 从图论的角度归纳出星型和串型结构, 从公共能量汇集环节形式的角度归纳出共直流母线结构和高频耦合的结构。然后, 对比分析了不同拓扑结构的优劣势, 并给出实际交直流混合配电系统不同需求下的拓扑结构选取原则。进一步地, 总结了多端口电力电子变压器在仿真、设计、控制与保护方面的应用挑战, 进而展望了未来的技术发展方向。

关键词: 电力电子变压器; 多端口; 共直流母线; 高频链; 交直流混合配电系统

Overview on Research of Multi-port Power Electronic Transformer Oriented for AC/DC Hybrid Distribution Grid

LI Kai¹, ZHAO Zhengming², YUAN Liqiang², GAO Changyu¹, WEN Wusong², YOU Xiaojie¹

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As a key hub device of AC-DC hybrid distribution system, multi-port power electronic transformer has the functions of bidirectional energy flow, flexible power flow regulation, harmonic and reactive power control and fault isolation, which has attracted more and more attention in recent years. Targeted at the multi-port power electronic transformer oriented for AC/DC hybrid distribution system, this paper deduces the development process of its topological structure. From the perspective of graph theory, the star-type and the series-type structures are catalogued. From the form of the energy pooling part, the common DC-bus structure and high-frequency-coupling structure are summed up. Then, the advantages and disadvantages of different topological structures are compared and analyzed, and the principle of selecting topologies for different practical requirements of AC-DC hybrid distribution system is provided. Furthermore, this paper summarizes the application challenges of multi-port power electronic transformer in simulation, design, control and protection, and its prospects in future technical development are provided.

Key words: power electronic transformer; multi-port; common DC-bus; high-frequency-link; AC-DC hybrid distribution system

0 引言

随着电网中大量分布式可再生能源、储能设备以及电动汽车等新型负荷的接入, 使得配电系统的源端和荷端呈现出较强的不确定性^[1]。传统交流配电系统由于开环运行条件的限制, 无法对分布式能源出力与负荷的变化进行快速的跟踪响应, 也不能对功率流动进行连续精准的调节, 使得系统电压偏

离成为配电网运行管理中日益突出的问题^[2]。引入直流配电技术, 构建基于电力电子变换器的交直流混合配电系统是应对这一挑战的重要手段。交直流混合配电系统能充分发挥电力电子装置的快速响应特性, 又能大量减少电能变换环节, 可实现在源荷双端强不确定性条件下对配电网络快速、灵活、连续和精准的功率与电压调控^[3]。

另一方面, 随着电力电子功率半导体器件和磁性材料的发展, 电力电子变压器(power electronic transformer, PET)成为工业界和学术界研究的热点

问题^[4]。2012年,ABB公司研制出1.2 MW的牵引用PET,并首次在瑞士铁路的电力机车上实现应用^[5]。然而,在交流配电系统中以PET取代传统AC/AC工频变压器仍然存在很多挑战,最突出的问题是PET的成本较高和损耗较大。例如1 MVA 10 kV/400 V的PET与传统工频变压器相比,前者成本是后者的5倍以上,而损耗是其3倍以上^[6]。事实上,单纯以PET替代传统工频变压器既不经济,也不可靠,其更适用的应用场合包括:质量和体积受限的舰船或机车牵引供电,以及有隔离需求的大功率AC/DC和DC/DC变换场合^[7]。交直流混合配电系统中存在多种形式的AC/DC和DC/DC变换,PET尤其是含多个交直流端口的PET,在其中有着广阔的应用前景。图1展示了一种以多端口PET为枢纽的交直流混合配电网的发展演化历程^[8]。

如图1所示,第1阶段的传统交流配电网在接入光伏和储能等分布式能源和直流负载后,使用了大量AC/DC变换环节,使得系统效率较低且成本较高。第2阶段配电网中增加了低压直流母线,其实质是通过AC/DC双向变流器构建出直流微电网,将直流负荷接入直流微电网中,从而减少很多电能变换环节。第3阶段以多端口PET为枢纽的交直流混合配电网

混合配电网则更进一步,多端口PET同时连接中压交流(medium voltage AC, MVAC)、中压直流(medium voltage DC, MVDC)、低压交流(low voltage AC, LVAC)和低压直流(low voltage DC, LVDC)4组母线,可实现各端口功率与电压的灵活调控、电能质量治理以及端口间能量互联互通和故障相互隔离。由此可见,多端口PET在交直流混合配电网中可扮演关键枢纽角色,在一些文献中也将其称作电能路由器^[9],对其进行研究具有十分重要的理论意义和工程实用价值。

近年来多端口PET已经受到广泛关注,美国北卡罗来纳州立大学^[4]、全球能源互联网研究院^[10]、清华大学^[11]、中科院电工所^[12]、特变电工^[13]等机构均已研发出多端口PET的试验样机,并完成初步的示范应用。在实际工程中,如何针对不同应用需求选择经济可行的拓扑结构,是设计多端口PET的首要任务。然而,现有多端口PET拓扑形式多样、结构复杂,具体表现在:(1)PET包含多个交直流端口,且各端口功率等级、电压等级和功能需求不同,使得各端口变换器的拓扑形式迥异;(2)为实现高频隔离的需求,PET包含工频交流-直流-高频交流等多级变换,使得系统中间变换环节繁多,甚至存

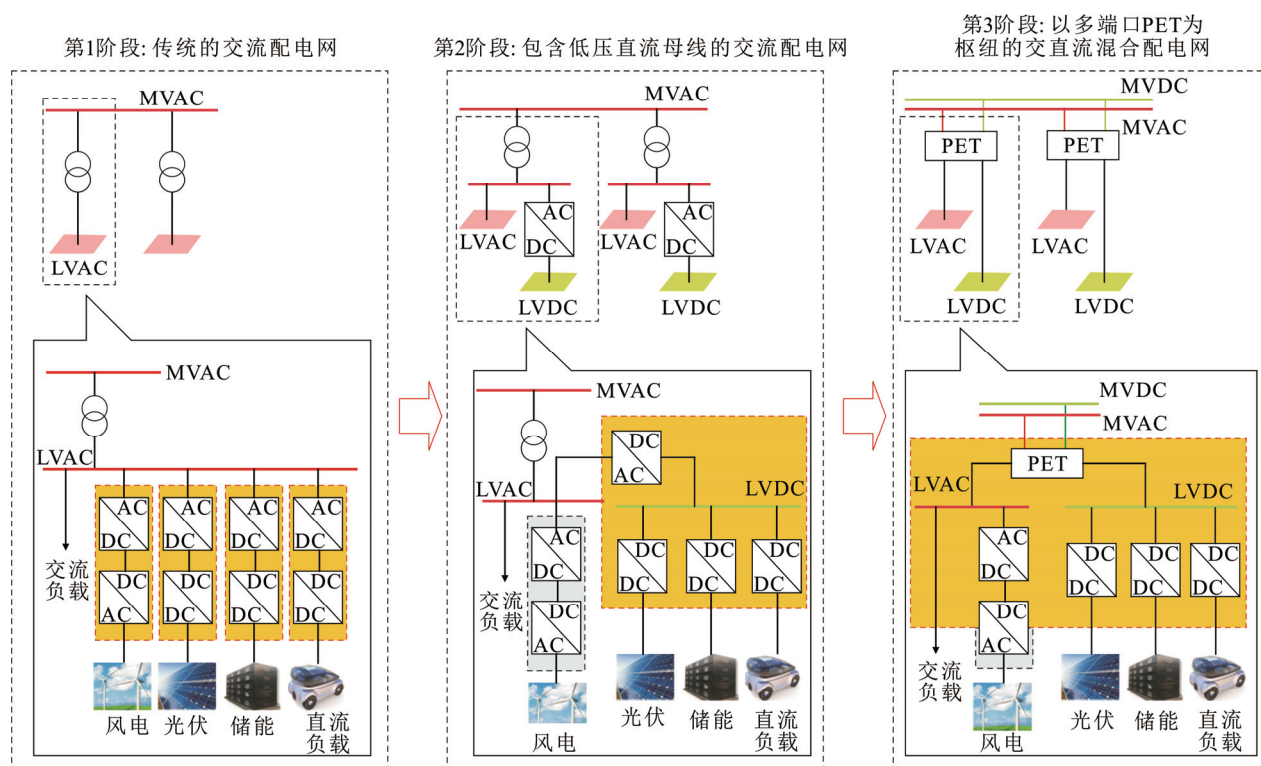


图1 以多端口PET为枢纽的交直流混合配电网的发展演化历程

Fig.1 Evolution process of AC/DC hybrid distribution grid based on multi-port PET

在冗余;(3)各端口是由多个功率模块通过串并联组合而成,而不同端口的模块拓扑也不尽相同。这些特点使得多端口 PET 的设计与控制面临着很多挑战。

本文首先梳理了面向交直流混合配电系统的多端口 PET 拓扑结构的发展脉络,对其进行归类、对比和优劣势评估,进而给出不同应用需求下拓扑结构选取的指导原则。进一步地,本文在总结多端口 PET 仿真、设计、控制与保护方面应用挑战的基础上,展望其技术发展方向,为后续研究提供思路。

1 多端口 PET 的拓扑结构发展脉络

PET 主要由电力电子开关器件和高压变压器构成,其概念的提出可追溯至 1968 年^[4]。近年来得益于功率半导体器件、拓扑结构和磁性材料的发展,应用于配电系统的中压 PET 才能推向实用化。典型的 PET 结构为如图 2 所示的三级式结构,包括整流级、隔离 DC/DC 级和逆变级。三级式 PET 每一级都可以采用不同拓扑以优化效率和体积,并且在实现 MVAC 到 LVAC 电压变换的同时可提供 MVDC 或 LVDC 端口以便直流电源或负荷的接入。三级式结构给多种功能集成和系统性能优化提供了很多空间,是目前被研究最多的 PET 结构^[14]。

1.1 串型多端口 PET

目前商业化开关器件的最高电压等级仅为 6.5 kV,更高电压等级的碳化硅(silicon carbide, SiC)器件如 15 kV 的金属-氧化物半导体场效应晶体管(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET)仍停留在实验室阶段,而开关器件的串联又受开关瞬态过程中不均压的掣肘。因此,10 kV 及以上的中压 PET,需要采用低压功率模块级联的形式形成 MVAC 端口^[7]。进一步地,有研究表明在现有开关器件条件下,采用 1 200 V 或 1 700 V 的器件来构建中压 PET,更有利于提高系统功率密度和效率^[15]。现阶段最常见的中压 PET 结构是基于级联 H 桥(cascaded H-bridges, CHB)拓扑的三级式结构,其单相结构如图 3 所示。该结构包含多个 H 桥模块级联的 AC/DC 整流环节、输出并联的 DC/DC 变换环节和两电平逆变环节。

图 3 中基于 CHB 的三级式 PET 包含有 MVAC、LVDC 和 LVAC 3 个端口,其中由低压直流母线构成的 LVDC 端口可作为光伏、储能等分布式能源和直流负荷的接口。该 PET 在中压端口和低压端口间

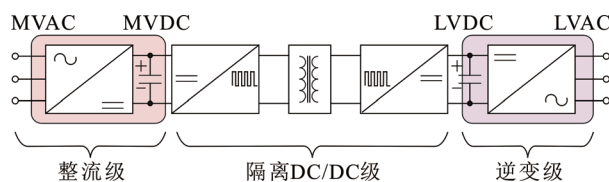


图 2 典型的三级式 PET 结构

Fig.2 Typical three-stage PET structure

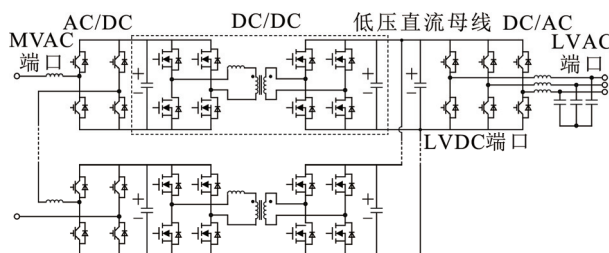


图 3 基于 CHB 的三级式 PET 结构

Fig.3 Three-stage PET structure based on CHB

进行隔离,隔离级可由非谐振的双有源桥(dual active bridge, DAB)变换器构成,也可由谐振式 LC、LLC 或 CLLC 变换器构成^[16]。然而,对于如图 1 所示有中压直流母线需求的交直流混合配电系统来说,图 3 的 PET 拓扑并不能满足要求。为此,可采用如图 4 所示的基于模块化多电平变换器(modular multilevel converter, MMC)的三级式 PET 结构^[17],该结构包含 4 个端口,其中 MMC 用于实现 MVAC 端口到 MVDC 端口的变换,而通过模块输入串联输出并联(input-series-output-parallel, ISOP)的隔离型 DC/DC 变换器实现 MVDC 端口到 LVDC 端口的变换,低压逆变器实现 LVDC 端口到 LVAC 端口的变换。对比基于 CHB 和基于 MMC 的两种 PET,有研究指出前者在同样的电压和功率等级下可使用较少的功率模块数,而后者更适合有 MVDC 端口需求的应用场合^[18]。

从图论的角度,图 3 和图 4 这两种 PET 可视为串型多端口 PET,其优势体现在能量在不同端口间依次流动,电能变换环节为不同端口所共用,从而节省电能变换环节。然而,这也使得 PET 不同端口间相互依存,一个端口的故障会引发其他端口退出工作。例如,图 4 中由 MVAC 端口向 LVAC 端口传递能量必须要经过两个直流端口,如果直流端口发生短路故障,则能量传递势必被阻断。当应用于对可靠性要求很高的交直流混合配电系统时,希望多端口 PET 各个端口间故障时能独立运行,这就决定了串型多端口 PET 推广应用存在局限性。

1.2 星型共直流母线多端口 PET

为实现端口间故障互不影响, 可将图 3 中的低压直流母线作为各端口间的内部能量汇集环节, 构成星型共直流母线多端口模块化 PET, 示意图如图 5 所示。公共低压直流母线作为装置内部的母线, 从结构设计上可规避其发生短路故障的风险。在图 5 中, MVAC 端口到公共低压直流母线的变换是通过模块的 ISOP 实现, 公共低压直流母线到 MVDC 端口是通过输入并联输出串联(input-parallel-output-series, IPOS)的隔离型 DC/DC 模块实现^[19], 公共低压直流母线到 LVDC 端口通过输入并联输出并联(input-parallel-output-parallel, IPOP)的隔离型 DC/DC 模块来提升功率等级, 而公共低压直流母线到 LVAC 端口通过非隔离的逆变器模块实现。

在图 5 的共直流母线星型多端口 PET 中, 任意两个端口间能量可以直接传递, 某个端口因发生故障而闭锁不会影响到其他端口的正常工作, 即端口间故障相互独立。进一步地, 图 5 中各端口是相互电气隔离的。MVAC 端口和 MVDC 端口与公共低压直流母线之间的电气隔离需求很直观, 而在低压供电网中为了安全起见 LVAC 端口和 LVDC 端口往往都存在着零线接地需求, 端口间相互电气隔离保证各端口均可独立接地, 互不影响。此外, 图 5 所示结构各端口变换器间通过直流母线进行耦合, 直流母线上往往并联有储能电容, 储能电容的缓冲作用使得各端口间近似解耦。因此, 共直流母线星型多端口 PET 可认为是各端口变换器的简单组合, 可分别进行硬件设计, 而端口间的控制策略上也可相互独立。

然而, 共直流母线星型多端口 PET 也存在明显缺点: 由于使用了大量中间电能变换环节, 例如图 5 中 MVAC 与 MVDC 或 LVDC 端口间均需经过两次隔离 DC/DC 变换, 这无疑会增加成本降低效率。

1.3 星型高频耦合多端口 PET

为减少多端口 PET 中使用的大量功率模块和元器件, 规避冗余的中间电能变换环节, 有学者在图 5 所示结构上进行改进。文献[20]提出一种基于多有源桥(multiple active bridges, MAB)变换器的四端口 PET, 如图 6 所示。各端口之间通过多绕组高频变压器进行连接, 与图 5 所示的结构相比可明显减少电能变换环节。2018 年在我国张北投运的世界首个柔性变电站中就使用到这种基于 MAB 变换器的结构^[10]。然而, 图 6 所示基于 MAB 的 PET 结构

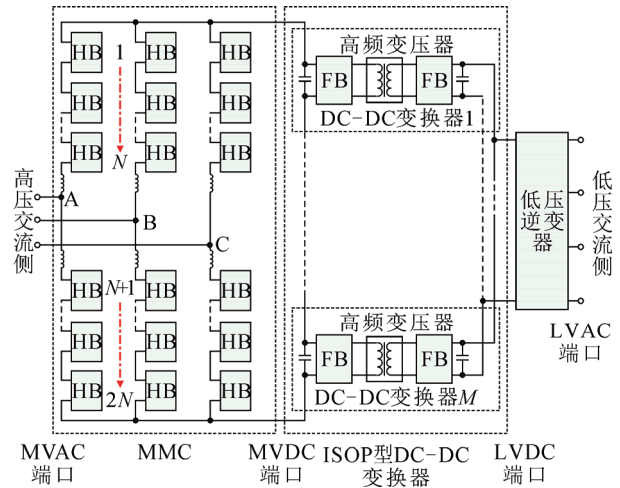


图 4 基于 MMC 的三级式 PET 拓扑结构^[17]

Fig.4 Three-stage PET structure based on MMC^[17]

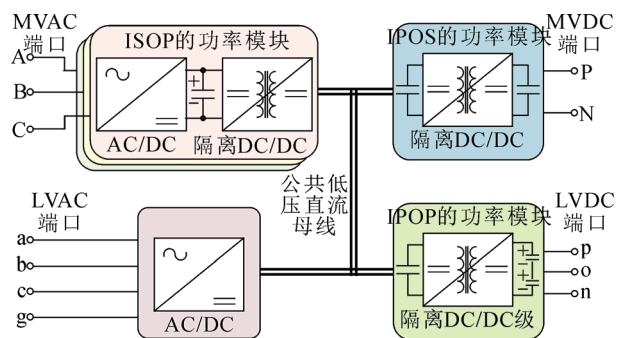


图 5 共直流母线星型多端口 PET 结构的示意图

Fig.5 Common DC-bus based star-type multi-port PET

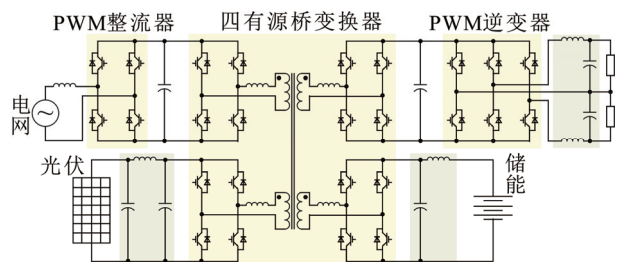


图 6 基于 MAB 变换器的星型四端口 PET 结构^[20]

Fig.6 Star-type four-port PET based on MAB^[20]

的推广应用受多绕组高频变压器制作工艺的制约, 其绝缘和散热问题相比于两绕组高频变压器要困难很多。

图 6 所示多端口 PET 的端口间是通过高频变压器进行高频磁耦合的, 借鉴这种思想, 文献[21]提出一种端口间通过中压高频链进行电气连接的直流 PET 拓扑结构, 如图 7 所示。该结构从 MVDC 端口到中压高频链的变换是通过四桥臂 MMC 实现, 中压高频链中串入多个两绕组高频变压器, 而各个

高频变压器的副边经 H 桥整流后并接在一起构成 LVDC 端口。

图 7 结构中 MMC 拓扑也用作工频 AC 到高频方波 AC 的变换, 这意味着该拓扑还可实现 MVAC 到 LVDC 的隔离变换, 这种理念最早在机车牵引 PET 设计中已被提及^[22]。类似地, 中科院电工所也提出一种含中压高频链的由三相 MVAC 变换到 LVDC 的 PET 拓扑^[23]。这类结构能起到减少电能变换环节的作用, 但由于中压高频链上多个高频变压器是串联接入的, 这使得故障模块闭锁对 PET 内其他模块的正常运行产生影响, 进而限制了该结构的可扩展性。

进一步地, 清华大学提出一种具有公共低压高频链的多端口 PET 拓扑结构^[24-25], 示意图如图 8 所示。这种结构的出发点是将图 6 中 MAB 变换器的多绕组高频变压器拆分为多个互联的两绕组高频变压器。虽然总成本可能会上升, 但其设计和制作难度下降, 而其最明显的优势在于很容易拓展到任意多个高频变压器的互联, 更有利于模块化设计。在图 8 中, MVAC 端口通过 ISOP 的功率模块和高频变压器变换到公共低压高频链, 公共低压高频链到 MVDC 端口和 LVDC 端口是分别通过 IPOS 和 IPOP 的功率模块和高频变压器来实现的, 而公共低压高频链到 LVAC 端口是通过 IPOP 的功率模块和高频电感实现的。

图 8 所示 PET 结构实现的功能与图 5 相同, 并且 LVAC 端口无需高频变压器即可保证各端口间相互电气隔离, 两者的本质区别在于后者消除了系统中冗余的中间电能变换环节。以 MVAC 端口到 MVDC 端口的能量传递路径为例对图 5 和图 8 进行对比: 前者依次经过 AC/DC 整流与两级隔离 DC/DC 变换, 且每级 DC/DC 变换环节均包括 DC 到高频 AC、高频变压器隔离和高频 AC 到 DC 环节, 共 7 次电能变换环节; 后者则依次经过工频 AC 到 DC、DC 到高频 AC、2 次高频变压器隔离、高频 AC 到 DC 环节, 共 5 次电能变换环节。由此可见, 与共直流母线的方案相比, 共高频链星型多端口模块化 PET 结构可明显减少电能变换环节。与图 7 所示基于串联结构的中压高频链 PET 结构相比, 图 8 结构中各端口模块是并联接入低压高频链的, 非常适合扩展到多模块以及多端口, 并且故障模块闭锁对 PET 内其他模块的正常运行影响很小, 这就保证了端口间故障相互独立。

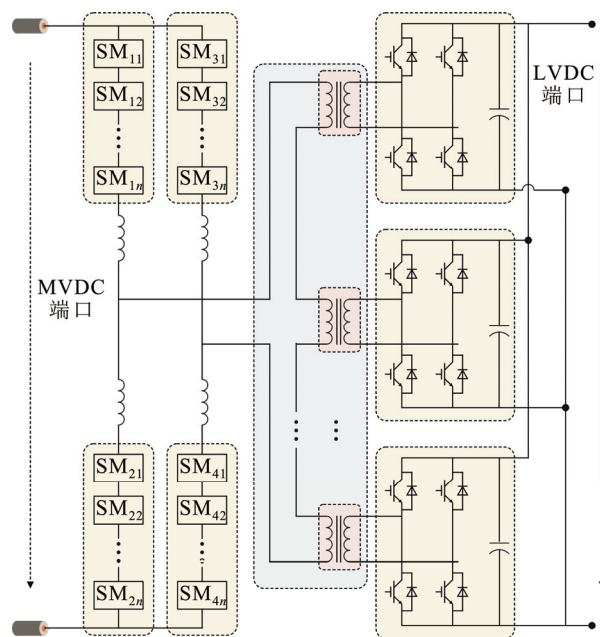


图 7 以中压高频链进行耦合的 PET 拓扑结构^[21]

Fig.7 MV high-frequency-link-coupling PET^[21]

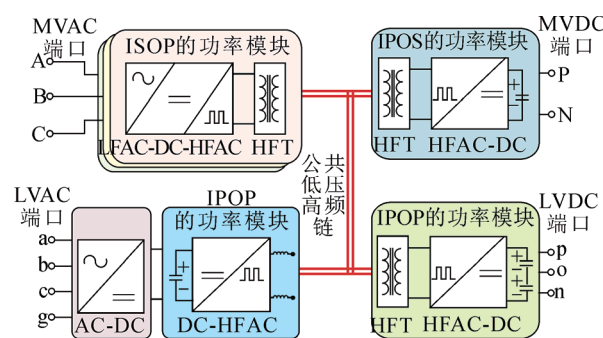


图 8 星型共高频链多端口模块化 PET 结构的示意图

Fig.8 Star-type high-frequency-link based multi-port PET

需要注意的是, 星型共高频链多端口 PET 端口间的能量汇集环节为高频链, 由于没有储能电容作为能量缓冲, 使得模块间和端口间存在强耦合^[25]。因此, 无论从主电路硬件还是各端口控制策略上, 都需要对多端口 PET 进行一体化统筹设计, 这无疑增加了设计的复杂度。

2 多端口 PET 的拓扑结构对比分析

在梳理面向交直流混合配电系统多端口 PET 拓扑结构发展脉络的基础上, 本文从图论的角度归纳出串型、星型以及混合型结构如图 9 所示。P₁—P₄代表各端口, 端口间以及端口到公共汇集点的线段表示变换器。前文中图 3 和图 4 的拓扑为串型结构, 图 5、图 6 和图 8 均为星型结构。星型结构多

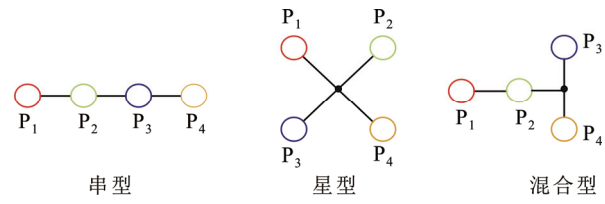


图9 多端口 PET 的分类示意图

Fig.9 Classification diagram of multi-port PET

端口 PET 的主要缺点在于使用较多电能变换环节，而其关键优势在于端口间相互电气隔离且故障相互独立。混合型结构是依据实际需求对串型结构和星型结构进行的折中，例如图 4 中 PET 的 LVDC 母线可分别通过隔离 DC/DC 变换和逆变环节形成对外输出的相互隔离的低压直流和低压交流端口。串型、星型和混合型结构 PET 的对比分析如表 1 所示。

星型结构的多端口 PET 包含共直流母线的结构和高频耦合的结构，其中高频耦合 PET 结构又包含基于 MAB 的结构和共高频链的结构。事实上，高频耦合这种思想不只体现在多端口间，在常规 MVAC 到 LVDC 两端口的 PET 中也可应用。如图 10 所示，与常规结构相比，基于 MAB 的结构和共高频链的结构分别通过多绕组变压器和公共高频交流母线的形式增加了一条中间能量汇集路径，从而为设计和控制提供了更多自由度。例如，在图 10(a) 的 PET 结构中隔离级两侧的 DC/AC 和 AC/DC 模块数需严格保持一致，而在高频耦合的 PET 结构中，无需满足这一要求，从而提供了优化设计的空间。

对共直流母线和高频耦合的星型多端口 PET 的对比分析如表 2 所示，高频耦合 PET 结构的显著优势在于减少电能变换环节，从而降低成本、提高效率。然而，由于高频耦合环节上没有储能电容作为能量缓冲，PET 多端口间和多模块间的强耦合问题给系统设计与控制带来很多挑战。此外，共直流母线 PET 的各端口变换器在空间上可分散布置，相互间通过直流母线连接，而高频耦合 PET 结构使得各端口变换器在空间上不能分散布置，否则杂散参数对能量变换和传递将起到不可忽视的影响。

根据以上分析，给出面向交直流混合配电系统多端口 PET 的拓扑选取原则如下：

- 1) 依据端口间故障是否要求独立，决定选择星型还是串型或混合型多端口 PET。
- 2) 依据各端口变换器是否可分散布置，决定选择共直流母线结构还是高频耦合的多端口 PET。

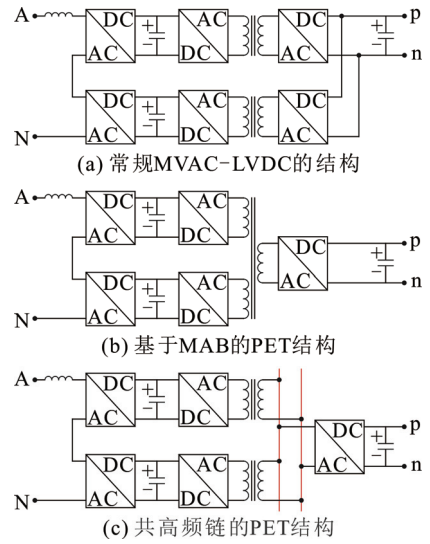


图 10 常规共直流母线 PET 与高频耦合 PET 结构对比

Fig.10 Structure comparison of conventional DC-bus based and high-frequency-coupling PET

表 1 串型结构和星型结构多端口 PET 的对比

Table 1 Comparison of series and star-type multi-port PET

PET 结构	特点	具体内容
串型结构	优点	不同端口间变换环节复用，整体环节较少。
	缺点	1. 部分端口间电气不隔离，影响接地；
		2. 某端口故障后影响其他端口，即端口间故障不能相互独立；
		3. 无公共能量汇集环节，扩展性较差；
星型结构	优点	4. 能量按顺序流动，端口启动需按次序。
		1. 所有端口间相互电气隔离，接地互不影响；
		2. 各个端口故障相互独立，某端口故障闭锁不影响其他端口；
		3. 有公共能量汇集母线，扩展性较好；
混合型结构	缺点	4. 能量在任意两端口间可直接流动，任意端口均可首先启动。
		端口间变换环节无复用，整体环节较多。
混合型结构	特点	拓朴结构依据实际需求配置，兼具串型和星型的特点。

3) 依据各端口是否有接地要求，决定选择全隔离型还是部分隔离型 PET。

4) 依据是否具有端口及模块的扩展性，决定选择共高频链的还是基于 MAB 的多端口 PET。

根据这些选取原则，给出多端口 PET 拓扑结构选择的二叉树如图 11 所示。

3 多端口 PET 的研究现状与挑战

面向交直流混合配电系统的多端口 PET 不仅结构复杂、元器件众多，还具有多形态——各端口恒压、恒功率等工作模式繁多，多流向——不同端

表 2 共直流母线和高频耦合星型多端口 PET 的对比

Table 2 Comparison of common DC-bus based and high-frequency-coupling multi-port PET

星型 PET 结构	特点	具体内容
共直流母线结构	优点	1. 直流母线上电容的解耦作用, 使得端口间相互干扰较小; 2. 可看作多个已有变换器的组合, 设计方法和控制策略较为成熟; 3. 各端口变换器空间上可分散布置。
	缺点	1. 变换环节较多, 系统损耗较大; 2. 使用元器件数量较多, 成本较高。
共高频链结构	优点	1. 减少了电能变换环节, 系统损耗较小; 2. 使用元器件数量相对较少, 成本较低。
	缺点	1. 没有电容的能量缓冲, 使得模块间和端口间强耦合; 2. 高频耦合的结构较少使用, 各端口的设计和控制需统筹兼顾, 存在挑战; 3. 各端口变换器在空间上需集中布置。

口间能量可任意流动等特征^[9], 因此在推广应用面临着诸多挑战, 以下从仿真、设计、控制与保护 4 个方面进行阐述。

3.1 离线提速仿真与实时仿真

在对多端口 PET 进行主电路参数及控制系统设计时, 离线仿真和硬件在环仿真为优化设计提供了验证工具。然而, 多端口 PET 高频化以及元器件众多的特征使得电力电子系统离线仿真时间很长, 而硬件在环仿真面临着建模实现困难的问题。

3.1.1 离线提速仿真

中压多端口 PET 由多个低压功率模块通过 ISOP、IPOS 和 IPOP 等形式组合构成, 使用了数量庞大的开关器件和高压变压器。文献[26]所提及的一台 10 kV/2 MW 多端口电力电子变压器由 578 个开关器件和 72 个高频变压器组成。对于包含元器件数量如此庞大的变换器, 如果在常规仿真软件如 MATLAB/Simulink 和 PSCAD 中进行完整模型的离线电磁暂态仿真时, 其仿真速度对于辅助开发设计来说将不可接受。对于共直流母线的多端口 PET, 各端口变换器间近似解耦, 尚可分别进行仿真。然而对于高频耦合的 PET, 各端口变换器通过高频量耦合在一起, 需研究提速仿真整体建模方法。

目前针对 CHB 或 MMC 这类单级模块化变换器, 通过简化建模进行提速仿真的方法已比较成熟^[27], 主要包括状态平均法、节点拆分法和戴维南或诺顿等效电路法等。状态平均法通过忽略开关特性建立系统的连续时域平均模型, 适宜做系统级稳态分析时使用, 但无法对故障闭锁状态和高频谐波

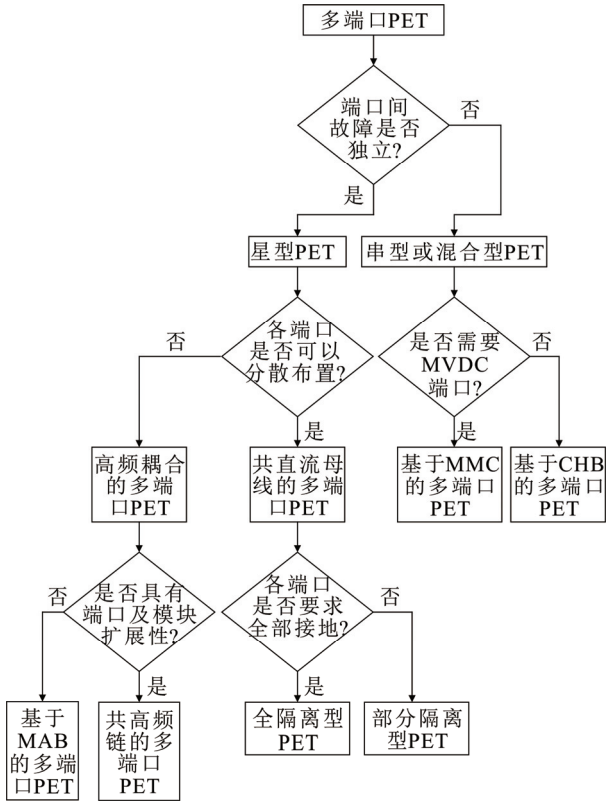


图 11 多端口 PET 拓扑结构选择的二叉树

Fig.11 Binary tree for topology selection of multi-port PET

行为进行仿真分析。节点拆分法将系统拆分为多个电气上解耦、只有二次信息传递的受控源子网络, 实现系统导纳矩阵的降阶处理, 在仿真过程中自动对多个低阶矩阵同时求解, 从而显著降低计算耗时, 但这种方法对于规模较大的系统提速效果有限^[28]。戴维南或诺顿电路法是基于等值电路模型进行的简化, 在简化中采用双电阻模型代替半导体开关器件, 并假设电容电压在单个仿真步长内不发生变化, 进而将电容视为理想电压源对电容两边进行解耦^[29]。文献[30-31]即采用戴维南或诺顿等效法对 PET 进行了简化仿真模型的搭建, 起到明显提速的效果。另外, 清华大学提出的基于状态离散-事件驱动的仿真算法有别于简化建模的思路, 是底层仿真算法的变革^[26,32]。与传统仿真算法对时间变量进行离散不同, 这种仿真算法对状态变量进行离散, 从而可自动实现对开关瞬态过程提高仿真步数, 而对开关稳态过程大幅缩减仿真步数, 进而显著提高仿真速度。目前这种仿真算法已形成商业化软件, 在多端口 PET 仿真中具有较好的应用前景。

此外, 现有 PET 的离线提速仿真研究中大多假定桥臂中开关管状态互补, 较少考虑启动时不控整

流以及故障闭锁的情况。因此,在戴维南等效电路法基础上,来实现对多端口 PET 的启动、稳态运行、停机、故障闭锁等全工况提速仿真简化建模,仍值得深入探索。

3.1.2 硬件在环实时仿真

传统 AC/DC 变换器的交流波形大都为工频正弦波,其典型的实时仿真步长 $>10\ \mu\text{s}$,而多端口 PET 隔离级的 DAB 或者 MAB 普遍采用频率为 10 kHz 及以上的高频方波,其实时仿真步长需设置为 $<1/20$ 的开关周期^[33],即 $<5\ \mu\text{s}$ 。又考虑到多端口 PET 中元器件众多,这些问题给实时仿真平台的设计带来很大困难。文献[33]针对串入并出的直流 PET 搭建了基于现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)的实时仿真平台,设置时钟周期为 5 ns 以精确反应原副边控制脉冲的移相比,然而其主电路采用平均模型,不能仿真高频开关行为。文献[34]采用开关模型,提出一种基于 FPGA 和多内核(central processing unit, CPU)的直流 PET 实时仿真平台,如图 12 所示,其控制系统在 CPU 中实现,仿真步长设置为控制周期 50 μs ,其主电路模型在 FPGA 中实现,仿真步长为 800 ns,两者通过 PCIe 总线进行控制和采样信号的交互。主电路和控制系统采用不同的仿真步长,达到了充分利用实时计算资源的目的。类似地,文献[35-36]初步搭建了基于 RT-Lab 的 PET 实时仿真平台和半实物仿真平台;针对苏州同里多端口 PET 示范工程,南京研旭开发了基于 RT-Lab 的硬件在环仿真平台^[37]。

随着多端口 PET 模块数以及元器件数的不断增加,考虑开关行为的离线仿真时长不断增加,甚至会出现不能仿真或仿真报错的情况,而实时仿真只要硬件资源充足实现仿真就不受限,同时半实物仿真又能对控制系统方案及各种故障工况进行预先验证,因此在面向交直流混合配电网的多端口 PET 系统设计中将广受青睐。

3.2 系统硬件优化设计

多端口 PET 由于各端口类型不同,使用了大量的元器件。在对多端口 PET 进行硬件优化设计时,其核心问题在于功率模块设计、高频耦合部分设计以及系统整体设计上。

3.2.1 功率模块设计

采用模块化的结构使得多端口 PET 系统易于设计、便于扩展、利于容错,因此被广泛采用。多端口 PET 的拓扑结构决定了功率模块的拓扑选择。

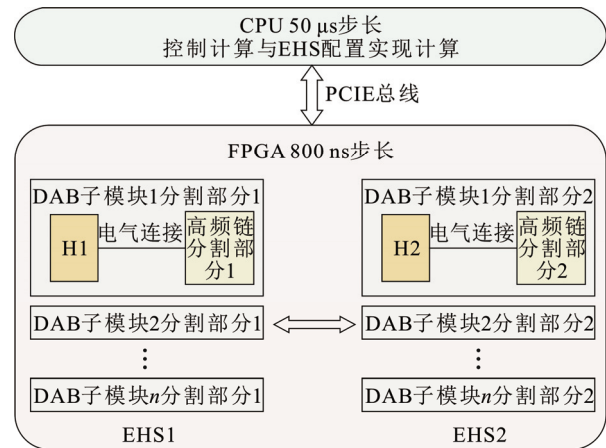


图 12 基于 FPGA 与多内核 CPU 的直流 PET 实时仿真平台^[34]

Fig. 12 Real-time simulation platform of DC/DC PET based on FPGA and multi-core CPUs^[34]

在如图 5 所示的共直流母线多端口 PET 中, MVAC 端口模块通常设计为 AC-DC-DC 变换器^[38], MVDC 和 LVDC 端口模块设计为隔离型 DC-DC 变换器。事实上这两个直流端口也可采用 DC-DC-AC 变换器,其中 DC-AC 部分在正常运行时只起通流的作用,当发生直流侧短路故障时又可闭锁以阻断故障^[13]。同时,不同端口模块都采用同样的拓扑结构也有利于系统设计与制造。此外,在由 MVAC 直接变换至 LVAC 的 PET 中,功率模块可设计为隔离型 AC-DC-DC-AC 的方案^[39-40],如图 13 所示,多个功率模块采用 ISOP 形式组合即可构成 PET。而在图 8 所示的共高频链多端口 PET 中,各端口功率模块需设计为 AC-DC-AC 或 DC-AC 变换器加高频变压器或高频电感的组合,各个模块间通过高频交流母线连接,这对连接母线的设计提出更高的要求,同时对后期功率模块的维护或更换也增加了一些困难。

在功率模块设计时,辅助供电的方式与 PET 的模块化设计、维护以及启动策略、冗余模块配置方案等紧密相关,需予以特别关注。现有辅助供电方案包括分布式供电和集中式供电,前者通过就近的直流母线电容取电,经过隔离降压后为模块控制器、驱动板以及传感器等供电^[41];后者从一个集中电源取电,为各个负载供电。集中式供电又包括公共电压母线供电、公共电流母线供电^[42]以及无线充电方案^[43]。由于分布式辅助供电有利于模块化集成以及维护,且对隔离的绝缘要求低,从多端口 PET 模块化设计的角度来说更倾向于选择分布式辅助供电。当然,对于面向交直流混合配电系统的多端口 PET,

希望各个端口均可首先启动, 分布式辅助供电的方案使得系统启动顺序和控制逻辑较为复杂, 需予以特别考虑。总之, 多端口 PET 的模块化设计希望实现模块内部功能的充分集成且对外接口简单, 从而便于实际制造和维护。

3.2.2 高频耦合部分设计

对于共直流母线、基于 MAB 和共高频链的多端口 PET, 高频耦合部分都是系统设计的关键。其中, 高频变压器是最核心的元件, 其性能决定了隔离级的效率、功率密度和隔离电压等关键参数。现有 PET 中高频变压器主要采用螺线管型结构和同轴电缆型结构^[17]。螺线管型结构将绕组以螺线管的形式绕制在磁芯上, 主要包括心式结构、外铁式结构和矩阵式结构^[44]; 同轴电缆型结构将同轴电缆的内外导电层分别作为变压器的原、副边绕组, 然后将同轴电缆绕制在磁芯上。螺线管型高频隔离变压器漏感较大且不容易精确控制, 变压器损耗也较大, 同时采用非圆型磁芯会导致边缘效应, 给散热处理带来困难。高频隔离变压器采用同轴电缆型结构时, 虽然很容易对漏感的大小进行控制, 但是处理原、副边之间的绝缘比较困难。此外, 同轴电缆型结构中低压线圈很难设计为多匝绕组, 限制了同轴电缆型变压器的变比。由于制造简单、成本低等优点, 现有大部分高频变压器都采用螺线管型结构。目前对此类高频变压器的研究集中在散热、绝缘、效率和体积的综合多目标优化上^[45-46]。

此外, 在常规 DAB 的高频耦合环节, 由于高频变压器的漏感与分布电容等杂散参数的影响, 会使得高频变压器两侧的准方波电压上叠加高频振荡, 如图 14 所示。这种高频振荡会增加损耗、产生电磁干扰(electromagnetic interference, EMI), 甚至会破坏开关器件和绝缘材料^[47]。通过增大驱动电阻、增加吸收电容等减缓开关速度的方法, 在一定程度上可选择性避开谐振点, 达到抑制高频振荡的效果。然而, 在基于 MAB 和共高频链多端口 PET 中杂散参数的分布更加复杂, 其影响更加严重。文献[48]对共高频链多端口 PET 的隔离级的高频振荡行为在不控整流和全控模式下进行了理论分析, 指出谐振的诱导因素, 然而并未提出切实可行的抑制手段。如何对高频耦合结构多端口 PET 隔离级杂散参数的影响进行深入分析, 从设计上抑制潜在的高频振荡问题, 目前仍是制约此类结构 PET 推广应用的重要因素。

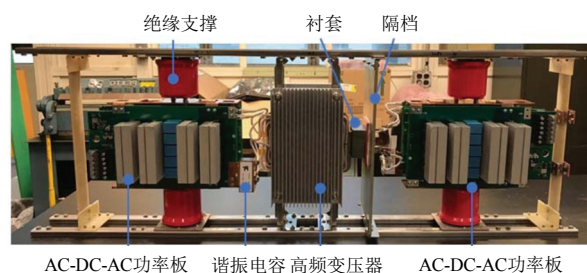


图 13 PET 中隔离型 AC-DC-DC-AC 的功率模块^[40]

Fig.13 Isolated AC-DC-DC-AC power modules in PET^[40]

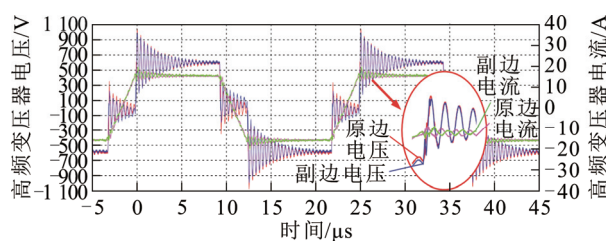


图 14 DAB 中由杂散参数引起的高频振荡现象^[47]

Fig.14 High frequency oscillation caused by stray parameters in DAB^[47]

3.2.3 系统整体设计

多端口 PET 系统整体设计中需要着重考虑冷却、绝缘、布局 and 安装等关键因素。冷却方面, 多端口 PET 的功率开关器件和高频变压器的损耗是热量的主要源头, 对其散热一般采用强迫风冷或水冷的方式。图 15(a)展示了张北柔性变电站的 5 MW 多端口 PET 的实物图^[49], 样机中功率开关器件和高频变压器采用水冷的散热方式; 文献[39]所述的 500 kW PET 中采用功率开关器件水冷, 高频变压器强迫风冷的冷却方式; 图 15(b)展示了东莞交直流混合示范工程的 2 MW 多端口 PET 的实物图, 其采用了强迫风冷的方案。绝缘方面, 多端口 PET 除了对高频变压器需着重设计以外, 对系统结构和散热通道也需全盘考虑, 例如为保证爬电距离, 通常将高压端口和低压端口隔开为高压室和低压室。从布局上来说, 基于 MAB 和共高频链的多端口 PET 需集中式布局, 以降低杂散参数的影响, 而共直流母线多端口 PET 则可分散式布局。安装方面, 可采用如图 15(a)所示的户内安装, 也可采用如图 15(b)和图 15(c)的户外集装箱式安装。此外, 大容量 PET 各端口均需配置隔离开关、断路器和避雷器等构成的开关柜, 开关柜的体积在系统体积中占比很大, 这也是制约多端口 PET 经济性和功率密度提升的主要因素。

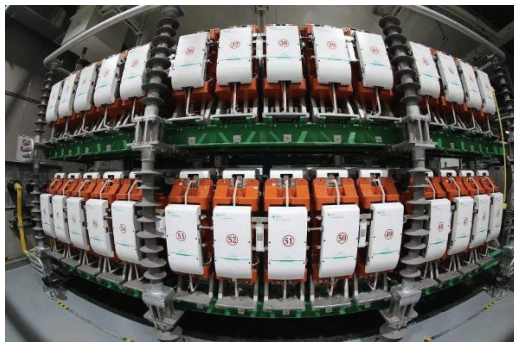
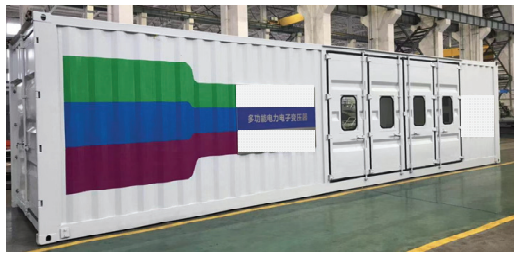
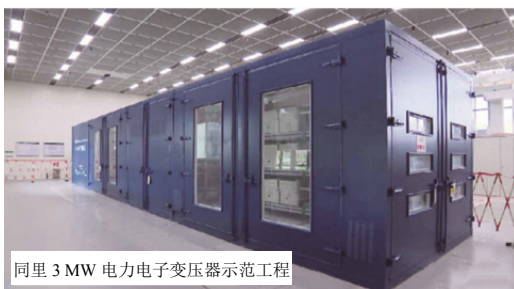
(a) 张北柔性变电站多端口 PET 实物图^[49](b) 东莞交直流混合示范工程多端口 PET 实物图^[26](c) 苏州同里交直流混合示范工程多端口 PET 实物图^[37]

图 15 国内典型示范工程中多端口 PET 实物图

Fig.15 Pictures of multi-port PET in domestic typical demonstration project

总之,多端口 PET 系统整体设计更多是从实际需求出发,冷却、绝缘、布局 and 安装等关键因素决定了整体的体积以及功率密度。

3.3 系统控制建模与协同控制

多端口 PET 其实质为多输入多输出系统,不仅多个端口间相互影响,同一端口内不同模块间也相互影响,这使得其控制策略较为复杂。对 PET 进行系统建模是优化设计控制策略和控制参数的基础,而协同控制是提高系统性能的关键。

3.3.1 系统控制建模

多端口 PET 系统控制建模的核心在于隔离级 DC-DC 变换器。针对两端口非谐振和谐振式 DAB 的建模方法已有很多研究^[50-52],包括时域平均建模、时域分段解析建模、基于傅里叶级数和基波近似的建模、考虑损耗的建模等。基于这些建模方法,文献^[50-51]给出的 DAB 变换器大信号和小信号模型,

可用于暂态行为分析和控制参数设计。文献^[52]给出将谐振式和非谐振式 DAB 统一考虑的时域解析模型,用于主电路参数设计。类似地,文献^[53-54]针对三端口和四端口 MAB 给出其时域平均建模方法。然而,这些建模方法大多针对单重移相等特定的调制策略以及简单几个模块构成的变换器而提出,不具有通用性。尤其是对共高频链多端口 PET 中含有多端口和大量模块串并联的隔离 DC-DC 变换器进行通用化的建模和控制的研究还不充分。其中的挑战在于大量模块带来的状态变量很多,而其移相控制的自由度也很多。

此外,多端口 PET 在控制上,不仅仅是隔离级与整流和逆变等常规变换器的简单组合,而是相互依赖的整体。例如同一个端口内不同模块间需进行平衡控制^[55],在不同端口间可采用解耦控制策略来抑制端口间的相互干扰^[20,53-54],不同级间可采用能量前馈等协调控制方法来提高系统暂态性能^[56]。进一步地,多台多端口 PET 之间又可通过集群控制^[57],实现综合性能协调优化,以下分别进行阐述。

3.3.2 模块层面均衡控制

在如图 3 所示基于 CHB 的 PET 中,ISOP 的功率模块中开关器件和高频变压器漏感等不可避免地存在差异,这就引发了模块电容电压和模块功率同时实现均衡的控制需求^[58]。为此,可采用 CHB 控制模块电容电压均衡、隔离级 DC/DC 变换器控制模块功率均衡的办法^[59],也可只采用隔离级 DC/DC 变换器同时实现均压和均功率的控制^[55]。对比分析发现后者在软启动性能、输入侧电流质量以及空载或轻载下均衡控制有效性方面具有明显优势^[60]。值得一提的是,这种实现模块均压以及均功率的需求在高频耦合多端口 PET 中同样存在,然而强耦合的特性使得模块层面均压和均功率控制更具挑战。

3.3.3 端口层面解耦控制

高频耦合类多端口 PET 不仅模块间强耦合,端口间也是强耦合。对于基于 MAB 的多端口 PET,多个端口间通过多绕组高频变压器进行联结,一个端口发生负载突变等扰动将传递给其他所有端口。针对这种耦合特性,文献^[53]提出基于端口间电流解耦矩阵的三端口 MAB 控制策略,但这种方法需要通过离线计算矩阵元素并在线查表来实现,较为复杂。类似地,文献^[20]根据四端口 MAB 不同端口接入电网、光伏、储能或负载等已知特性设置解耦矩阵参数,从而实现抑制端口间相互扰动的目的,

这种方法依赖已知信息, 不具有通用性。此外, 共高频链多端口 PET 中存在大量模块串并联组合的情况, 强耦合使得通用化解耦控制策略更加复杂。

3.3.4 多级之间联合控制

在图 2 所示三级式 PET 中, 能量依次流经整流级、隔离 DC/DC 级和逆变级, 如果各级变换器的控制相互独立, 某一级发生扰动不能被其他级快速感知并响应, 这将使整体暂态性能恶化。为此, 文献[61]在额外增加电流传感器的基础上, 实现不同级之间的电流前馈控制, 从而抑制了负载突变等扰动引起的中间直流母线电压暂态波动且缩减过渡时间。为规避电流传感器的使用, 文献[56]基于各级变换器的数学模型提出级间的能量前馈和直接前馈控制策略, 同样达到改善系统暂态性能的效果。此外, 在基于 CHB 的 PET 中, 通过整流级与隔离级的瞬时功率同步控制可以抑制模块电容电压的二倍频波动^[62-63], 进而实现降低模块电容值的目的, 这意味着级间的联合控制还可改善系统的稳态性能。类似地, 在高频耦合多端口 PET 中通过多级间联合控制也是整体稳态和暂态性能优化的关键。

3.3.5 多台之间集群控制

多端口 PET 既可单台运行, 也可以多台集群运行。图 16 展示了两台 PET 集群运行的实例^[64]。本文定义集群运行行为在一个区域电网内多台多端口 PET 同时投运, 各台 PET 的端口间有直接或间接的电气连接; 不同类型和容量的 PET 保证相同通信接口下, 均受到集群控制器的统一协调控制。集群运行与多台直接并联运行的区别是, 集群运行时多台 PET 即使隔开一定距离, 也可进行考虑线损及分布式能源和负载接入的综合能量管理, 提高系统整体效率^[65]。换言之, 多台 PET 直接并联运行行为为集群运行的一种典型运行模式。集群运行时多台多端口 PET 间互为备用, 有助于提高系统可靠性。目前, 对于多端口 PET 在交直流混合配电系统中的集群控制, 还主要采用交直流混合微网中接口变换器的协调控制策略^[56,66], 如何充分发挥多端口 PET 能量路由功能^[67], 实现交直流微网间以及与大电网间的柔性能量交换以提高综合能效, 值得深入探索。

3.4 保护设计与故障处理

多端口 PET 的应用场合主要为交直流混合配电系统, 而电力电子变换器过流能力差、直流断路器技术不够成熟、现有继电保护策略主要基于传统交流电网而设计等现状, 给多端口 PET 的保护设计

与故障处理带来了很多新挑战, 下面从模块层、端口层和系统层进行阐述。

3.4.1 模块层冗余模块设置和容错运行

对于模块化的 MMC 或 CHB 变换器, 设置冗余的备用模块并进行故障后容错控制是提高整体可靠性的关键^[68], 这些方法在基于 MMC 或 CHB 的 PET 中也可较为方便地予以实施。以基于 CHB 的 PET 为例, 常用的模块容错运行方案如图 17 所示, 包括故障子模块切除方案和备用子模块替代方案。第 1 种方案中, 子模块故障后被旁路, 剩余子模块电压和功率均需提升, 其容错能力有限; 第 2 种方案中, 故障子模块被旁路后, 备用子模块将由短路状态逐渐充电启动进入正常状态。为解决第 1 种方案中, 故障后三相运行模块数量不同, 导致故障相模块的有功功率高于正常相模块, 进而引发的散热问题, 文献[69]提出了一种功率平衡控制方法, 根据三相模块的数量计算注入系统的零序电压, 使得故障情况下所有模块的有功功率近乎相同, 并结合冗余模块设计, 规避了注入零序电压后可能出现的过调制现象。关于容错控制方法, 文献[70]将级联 H 桥单元与隔离 DC/DC 模块共同作为一个容错单元, 提出基于双零序电压注入的级联型 PET 的容错控制方法; 文献[71]提出一种基于 DAB 的反向充电容错控制方法, 利用 DAB 对冗余模块进行反向充

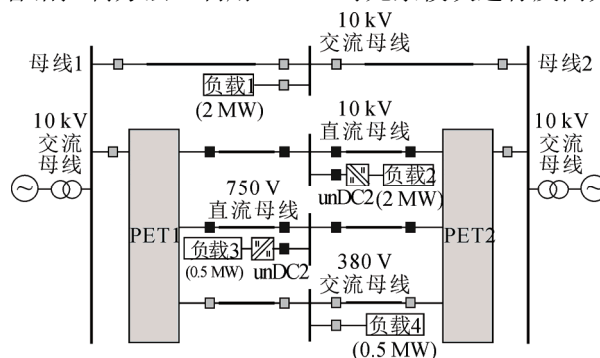


图 16 两台四端口 PET 集群运行的实例^[64]

Fig.16 Two four-port PETs in cluster operation^[64]

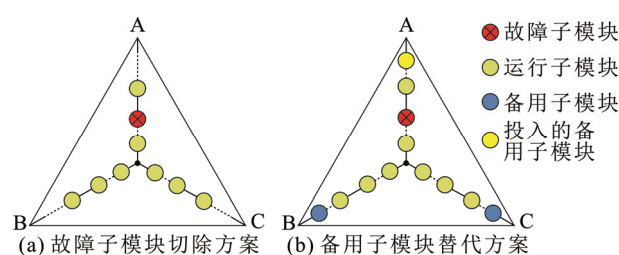


图 17 基于 CHB 的 PET 模块容错运行方案

Fig.17 Module fault tolerant scheme of CHB based PET

电,保持级联H桥模块的直流电容电压稳定,实现快速平稳地故障容错。文献[72]提出一种在单相中设置冗余模块同时实现三相PET故障后容错运行的方案。文献[73]提出一种MMC型PET的上下桥臂共享备用功率模块的方案,达到节省系统总成本的目的。

与共直流母线形式多端口PET特性不同,在高频耦合形式多端口PET中,所有模块与公共高频链或多绕组变压器相连,故障闭锁的模块仍然通过不控整流的形式维持电容电压,这对冗余模块方案设计和容错控制带来新的挑战。

3.4.2 端口层故障处理

多端口PET的多个端口类型迥异,需要根据不同端口的特点设计相应的故障保护措施,以下从直流端口和交流端口分别进行阐述。

首先聚焦多端口PET的直流端口,切除直流侧故障电流目前仍然是一个技术难题,现有手段包括:1)依赖交流断路器和直流隔离开关协同配合切除并隔离故障[74]。其弊端在于交流断路器断开且变换器闭锁后仍需等待较长时间直至直流故障电流衰减至零,才能断开隔离开关隔离故障线路,使系统重新投入运行。此方案易于实现、成本较低,但是在直流端口故障时整个系统会短时停运;2)依赖机械式、电力电子开关式或混合式的直流断路器在数毫秒内开断故障电流[75-79],目前已较广泛地应用于柔性高压直流输电中,然而在中低压直流配网场合中直流断路器投资较大,应用还较少;3)利用换流器自身动作实现直流故障电流的清除,这是一种较为有效的故障隔离方法[80]。当直流端口发生故障后,只需闭锁变流器内部开关器件即可实现直流母线上故障电流的快速清除,然后利用直流隔离开关即可隔离故障线路。此方案的原理以图18进行示意,直流端口通过H桥模块对外连接,正常工作时全桥模块只起到通流作用,检测到直流侧故障后全桥模块闭锁,短路电流通路中串入电容电压提供反电动势,短路电流不断衰减使得最终二极管反向截止,从而切断故障电流。然而,增加H桥模块的方案使变换器使用的开关器件增多,投资成本较高。类比于MMC的模块选择方法,也可将H桥模块改进为钳位双子模块、串联双子模块等新型模块[81-84],在阻断直流侧故障的基础上实现成本以及附加损耗的降低。

此外,对于图4所示基于MMC的多端口PET,针对MVDC端口发生短路时隔离级ISOP的DC/DC

变换器虽然闭锁开关器件,但仍然存在使串联电容快速放电进而可能烧毁线路和电容的问题,文献[85]通过改变隔离级DC/DC变换器输入侧的连接方式,规避了短路时快速放电的问题,这也是一种通过改变拓扑结构进行直流短路故障保护的措施。

接下来讨论多端口PET交流端口的故障处理。文献[86]仿照传统工频变压器,对PET的MVAC和LVAC端口故障情况进行了归类,如图19所示,主要包括PET内部故障、雷击浪涌、开关操作、中压侧短路、低压侧短路和非理想负载等。针对MVAC端口,相对地短路以及操作过电压是最严重的故障,其接地方式具有决定性的影响,而通过小电阻接地是一种过电压和过电流间折中的方案。进一步地,文献[86]给出一种通过避雷器(valve arrester, VA)、超快速固态断路器(solid-state breaker, SSB)和交流Crowbar电路(AC crowbar, ACC)实现中压侧快速故障保护的策略,从而规避了常规保护策略响应太慢

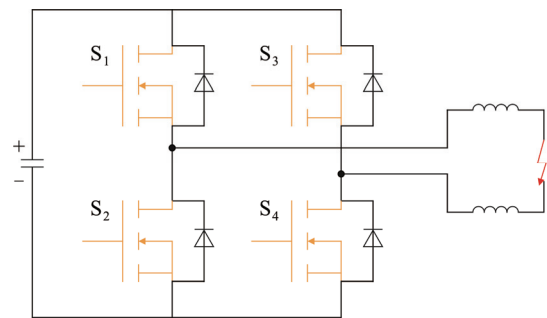


图18 通过H桥实现PET直流侧故障电流清除

Fig.18 PET DC-side fault current blocking through H-bridge

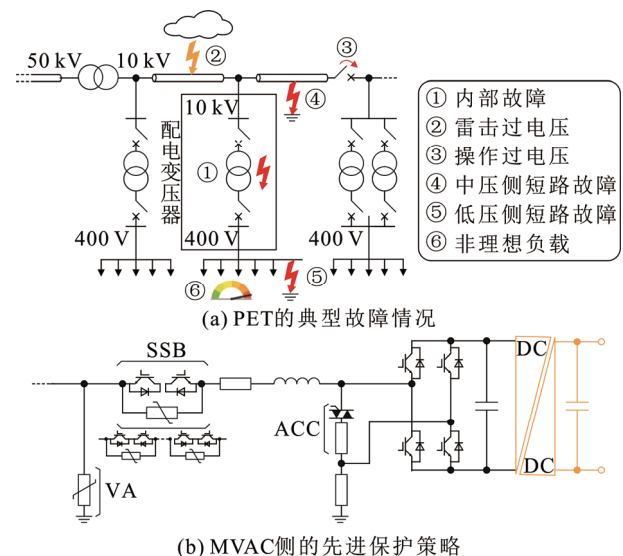


图19 PET的典型故障及中压侧保护策略[86]

Fig.19 Typical faults of PET and protection schemes[86]

的缺点。另一方面, LVAC 端口的关键问题在于如何保证保护开关动作的选择性, 从而尽可能缩小支路故障的影响范围。为此, 在某支路发生故障时, PET 的 LVAC 出口侧需耐受短路电流, 直至故障支路切除。

另外, 多端口 PET 交流端口需着重考虑 MVAC 端口的低电压穿越问题。当 MVAC 端口工作于无功补偿模式时, 其低电压穿越策略与 STATCOM 的控制策略^[87]相同。当 PET 用于为负载供电时, 文献^[88]给出一种使用超级电容支撑直流母线电压, 从而实现负载低电压穿越的方案。当 PET 用作风机并网接口变换器时, 文献^[89]提出一种实现 MVAC 侧低电压穿越的方案。当网压突降时, 风机输出功率不变, 能量无法完全送入电网将累积在级联 H 桥电容中导致过压。为此, 可在级联 H 桥模块电容上并联 Chopper 保护电路, 通过反复投切电阻, 从而消耗多余的冲击能量, 实现低电压穿越。针对多端口 PET, 上面两种情况分别对应了本地供电不足以及供电过多的情形, 在实现低电压穿越时对两种情况需分别予以考虑。

3.4.3 系统层故障穿越

当多端口 PET 构成交直流混合配电系统时, 利用 PET 灵活可控的特点可为重要负荷提供不间断供电, 实现局部故障下系统的故障穿越。针对一台并网多端口 PET, 所有端口无法同时工作于恒功率或者恒电压模式, 需设定其中一个并网端口处于自由跟随模式, 以保证输入输出端口的能量守恒。当工作于自由跟随模式的端口发生故障时, 各个端口需要协同进行工作模式的切换, 以保证非故障端口的正常工作。文献^[57]介绍了 3 台三端口 PET 互联交直流混合系统故障下不间断供电协调控制策略, 并给出了交流系统故障事故集, 如表 3 所示。PET 的交流端口工作于定电压或定功率模式, 当检测到某个定电压端口发生故障后, 将该端口变换器闭锁, 定功率端根据电压偏差情况自动切换为下垂模式提供电压支撑。当故障点隔离之后, 下垂端将重新切换至主从模式, 而故障端切换至电压/频率模式, 进而重新恢复供电。类似地, 其他故障情况下, 可依据表 3 的故障集可进行相应的操作。

4 总结与展望

4.1 总结

针对面向交直流混合配电系统的多端口 PET,

表 3 交流系统故障管理集^[57]

Table 3 AC system fault management set^[57]

序号	故障事件	协调控制措施
1	定电压站交流侧线路故障; 无定功率端进行紧急功率 支援	故障端切换电压/频率模式; 定功率端根据电压偏差自动切换为下垂模式; 进入新的稳态后下垂端重新切换为主从模式
2	定电压站交流侧线路故障; 有定功率端进行紧急功率 支援	故障后定电压站切换为电压/频率模式, 其余端自动切换为下垂模式; 进入稳态后选择容量裕度最大的端口切换为定电压模式, 其余端为定功率模式
3	定功率站交流侧线路故障	故障端配合继保装置切换为电压/频率模式, 其余端口模式不变
4	两端交流线路同时故障	剩余端口及低压直流端口切换为下垂模式供电; 交流负荷超过供电能力时考虑切负荷
5	三端交流线路同时故障	低压直流端口切换为下垂模式供电; 交流负荷超过供电能力时考虑切负荷

本文首先层层深入推演了其拓扑结构的发展历程, 从图论角度归纳出串型、星型和混合型结构, 从公共能量汇集环节形式的角度归纳出共直流母线结构和高频耦合的结构。经过对比分析可知: 1) 串型和混合型多端口 PET 适合于端口间故障无需相互独立的应用场合, 而星型 PET 可用于各端口故障相互独立以及相互隔离的场合; 2) 共直流母线多端口 PET 由于电容的解耦作用, 使得各端口间相互干扰较小, 各端口变换器可独立设计, 其控制策略和设计较为成熟; 而高频耦合多端口 PET 可明显减少电能变换环节, 但由于公共能量汇集环节上没有电容的能量缓冲作用, 使得端口间和模块间强耦合, 其设计和控制需整体统筹兼顾; 3) 相比于采用多绕组高频变压器的多端口 PET, 共高频链的结构易于模块化设计、有利于扩展, 并且避免了多绕组高频变压器在绝缘和散热方面的制作瓶颈; 但其挑战在于高频耦合部分的设计、端口间解耦控制以及模块的冗余配置和容错运行。总之, 串型、星型和混合型结构, 以及共直流母线结构和高频耦合结构具有各自的优劣势, 需依据不同的应用场合进行选择。

针对多端口 PET 结构复杂、元器件众多, 并具有多形态、多流向的特征, 本文从仿真、设计、控制和保护 4 个方面对研究现状和挑战进行了分析:

1) 在辅助设计的仿真方面, 通过简化建模和变革底层仿真算法为多端口 PET 设计提供离线快

速仿真工具仍值得深入探索,而硬件在环实时仿真可为系统级设计提供预先验证工具,但目前针对多端口 PET 开展的工作还不充分。

2) 在 PET 硬件设计方面,希望实现内部功能充分集成且对外接口简单的全模块化设计,而高频耦合部分设计的难点集中在散热、绝缘和杂散参数引发的高频振荡问题上;在系统整体设计方面,希望通过良好的绝缘、冷却、布局、安装和开关柜等关键因素的设计,综合优化系统体积和功率密度等。

3) 在 PET 的控制上,系统级控制建模、模块层面均衡控制、端口层面解耦控制和多级间联合控制是整体稳态和暂态性能优化的关键,已得到较多的研究,但旨在提高系统综合能效和可靠性的多台多端口 PET 的集群控制,仍需深入探索。

4) 在保护设计方面,模块层冗余模块配置和容错策略在共直流母线多端口 PET 中研究较多,在高频耦合结构 PET 中还较少关注;在直流端口的短路故障处理方面,通过变换器实现短路故障阻断,是较为经济的方案;而针对交流端口,中压交流端口的操作过电压和相对地短路是最为严重的故障,需特别予以处理,而低压交流端口的关键问题在于保证保护动作的选择性;在多台 PET 构成的系统保护层面,各端口的工作模式需要协调配合,以确保局部故障和短时故障的穿越,目前针对这部分的研究还较少,需深入探索。

4.2 展望

多端口 PET 以其灵活调控、电能质量治理以及端口间能量互联互通和故障相互隔离的卓越优势,在未来交直流混合配电网中可扮演关键枢纽角色,前景广阔。然而,目前来看大容量多端口 PET 的成本较高、设计和控制复杂、可靠性不高,在推广应用上面临着很多挑战。笔者对其未来发展趋势展望如下:

1) 面向交直流混合配电系统的多端口 PET 连接了多个交直流端口, PET 端口间的解耦控制、多台 PET 间的集群优化控制、PET 与电网和负荷间的故障保护配合,是多端口 PET 落地推广应用必须要克服的难题。

2) 多端口 PET 与传统变换器相比异常复杂,并且依据应用场合不同而有定制化的需求,这给传统人工设计带来诸多难题,基于遗传算法等智能算法的电力电子自动化设计有望在多端口 PET 的设计中崭露头角。

3) 当前电网中交流配电仍然处于主导地位,而多端口 PET 的核心优势在于同时提供交流和直流端口,这意味着多端口 PET 技术的发展与直流微电网以及直流配电技术相辅相成。随着光伏、储能等直流源以及电动汽车等直流负荷的大量涌现,作为中压交流和低压直流、低压交流的三端口 PET 有望率先得到推广应用,例如在数据中心、大型电动汽车充电站和交直流混合微网中得到应用。

4) 现有多端口 PET 中为实现相互隔离,往往需要 DC 到高频 AC、高频变压器和高频 AC 到 DC 环节,这使得元器件增多且成本明显提高,而传统工频器造价较低且可靠性较高。利用传统工频变压器与电力电子变换器组合的方案——由工频变压器承担电气隔离任务,电力电子变换器实现电能质量治理、电能形式变换等功能,有望以较低的成本实现 PET 的功能,是一种非常具有竞争力的解决方案。

总之,面向交直流混合配电系统的多端口 PET,其设计、控制和保护已不再局限为电力电子专业的工作,更是对整个电气工程学科的挑战,例如高频变压器的设计涉及高电压与绝缘技术, PET 直流端口的故障保护涉及直流断路器和继电保护的配合,而多台 PET 间正常工况下的协调优化控制和故障工况下的不间断供电控制更涉及电力系统的能量管理和调度。只有跨学科的通力合作共同攻坚,才能促进交直流混合配电技术以及多端口 PET 技术落地和推广应用。

参考文献 References

- [1] 康重庆,姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 1-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 1-11.
- [2] 苗键强,张宁,康重庆. 能量路由器对于配电网运行优化的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2832-2839.
MIAO Jianqiang, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Analysis on the influence of energy router on the optimal operation of distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2832-2839.
- [3] 刘向龙,刘友波,张宸宇,等. 基于电力电子变压器的交直流混合配电网功率-电压协调控制[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(2): 35-43.
LIU Xianglong, LIU Youbo, ZHANG Chenyu, et al. Coordinating voltage regulation for AC-DC hybrid distribution network with multiple power electronic transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(2): 35-43.
- [4] HUANG A Q. Medium-voltage solid-state transformer: technology for a smarter and resilient grid[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2016, 10(3): 29-42.

- [5] ZHAO C H, DUJIC D, MESTER A, et al. Power electronic traction transformer-medium voltage prototype[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3257-3268.
- [6] HUBER J E, KOLAR J W. Volume/weight/cost comparison of a 1 MVA 10 kV/400 V solid-state against a conventional low-frequency distribution transformer[C]//2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2014: 4545-4552.
- [7] HUBER J E, KOLAR J W. Applicability of solid-state transformers in today's and future distribution grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 317-326.
- [8] 蒲天骄, 李 烨, 陈乃仕, 等. 基于电力电子变压器的交直流混合系统优化运行控制关键技术及研究框架[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2752-2759.
PU Tianjiao, LI Ye, CHEN Naishi, et al. Key technology and research framework for optimal operation control of hybrid AC/DC system based on power electronic transformer[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2752-2759.
- [9] 赵争鸣, 冯高辉, 袁立强, 等. 电能路由器的发展及其关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3823-3834.
ZHAO Zhengming, FENG Gaozhui, YUAN Liqiang, et al. The development and key technologies of electric energy router[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3823-3834.
- [10] 张科科, 齐 磊, 崔 翔, 等. 多绕组中频变压器宽频建模方法[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 582-590.
ZHANG Keke, QI Lei, CUI Xiang, et al. Wideband modeling method of multi-winding medium frequency transformer[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 582-590.
- [11] 文武松, 赵争鸣, 莫 昕, 等. 基于高频汇集母线的电能路由器能量自循环系统及功率协同控制策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(11): 2328-2338.
WEN Wusong, ZHAO Zhengming, MO Xin, et al. Energy self-circulation scheme and power coordinated control of high-frequency-bus based electric energy router[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(11): 2328-2338.
- [12] 张宸宇, 袁宇波, 李子欣, 等. 四端口电力电子变压器效率测试方法[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(6): 10-17.
ZHANG Chenyu, YUAN Yubo, LI Zixin, et al. Efficiency testing method for four-port power electronic transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(6): 10-17.
- [13] 庞 博, 侯 丹, 李天瑞. 中压多端口电力电子变压器技术研究[J]. 高压电器, 2019, 55(9): 1-9.
PANG Bo, HOU Dan, LI Tianrui. Analysis of medium voltage multi-port power electronic transformer technology[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(9): 1-9.
- [14] SHE X, HUANG A Q, BURGOS R. Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(3): 186-198.
- [15] HUBER J E, KOLAR J W. Optimum number of cascaded cells for high-power medium-voltage AC-DC converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(1): 213-232.
- [16] ZHAO B, SONG Q, LIU W H, et al. Overview of dual-active-bridge isolated bidirectional DC-DC converter for high-frequency-link power-conversion system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 4091-4106.
- [17] 李子欣, 高范强, 赵 聪, 等. 电力电子变压器技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1274-1289.
- LI Zixin, GAO Fanqiang, ZHAO Cong, et al. Research review of power electronic transformer technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1274-1289.
- [18] BRIZ F, LOPEZ M, RODRIGUEZ A, et al. Modular power electronic transformers: modular multilevel converter versus cascaded H-bridge solutions[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2016, 10(4): 6-19.
- [19] 姜 山, 范春菊, 黄 宁, 等. 电力电子变压器直流端口极间短路故障特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1301-1309.
JIANG Shan, FAN Chunju, HUANG Ning, et al. Fault characteristic analysis of DC pole-to-pole fault in power electronic transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1301-1309.
- [20] FALCONES S, AYYANAR R, MAO X L. A DC-DC multi-port-converter-based solid-state transformer integrating distributed generation and storage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2192-2203.
- [21] ZHAO B, SONG Q, LI J G, et al. Modular multilevel high-frequency-link DC transformer based on dual active phase-shift principle for medium-voltage DC power distribution application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 1779-1791.
- [22] GLINKA M, MARQUARDT R, et al. A new AC/AC-multilevel converter family applied to a single-phase converter[C]//The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Singapore: IEEE, 2003: 16-23.
- [23] 高范强, 李子欣, 徐 飞, 等. 一种高频链模块化电力电子变压器[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(5): 51-58.
GAO Fanqiang, LI Zixin, XU Fei, et al. Power electronic transformer based on modular converter with high-frequency link[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(5): 51-58.
- [24] 张春朋, 李 凯, 赵争鸣, 等. 一种全隔离型多端口换流器: CN108667271B[P]. 2020-04-07.
ZHANG Chunpeng, LI Kai, ZHAO Zhengming, et al. Full-isolation type multi-port current converter: CN108667271B[P]. 2020-04-07.
- [25] LI K, ZHAO Z M, YUAN L Q, et al. Synergetic control of high-frequency-link based multi-port solid state transformer[C]//2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Portland, OR, USA: IEEE, 2018: 5630-5635.
- [26] 施博辰, 赵争鸣, 朱义诚, 等. 离散状态事件驱动仿真方法在高压大容量电力电子变换系统中的应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2053-2061.
SHI Bochen, ZHAO Zhengming, ZHU Yicheng, et al. Application of discrete state event-driven simulation framework in high-voltage power electronic hybrid systems[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2053-2061.
- [27] 许建中, 李承昱, 熊 岩, 等. 模块化多电平换流器高效建模方法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3381-3392.
XU Jianzhong, LI Chengyu, XIONG Yan, et al. A review of efficient modeling methods for modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3381-3392.
- [28] 许建中, 赵成勇, 刘文静. 超大规模 MMC 电磁暂态仿真提速模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 114-120.
XU Jianzhong, ZHAO Chengyong, LIU Wenjing. Accelerated model of ultra-large scale MMC in electromagnetic transient simulations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 114-120.
- [29] 肖子龙. 基于 H 桥的电力电子装置高效电磁暂态仿真建模[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
XIAO Zilong. Electromagnetic transient efficient modelling of power electronic device based on H-bridge[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [30] 易姝娟, 袁立强, 李 凯, 等. 面向区域电能路由器的高效仿真建

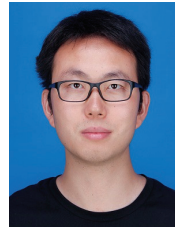
- 模方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(10): 796-806.
- YI Shuxian, YUAN Liqiang, LI Kai, et al. High-efficiency modeling method for regional energy routers[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2019, 59(10): 796-806.
- [31] 丁江萍, 高晨祥, 许建中, 等. 级联 H 桥型电力电子变压器的电磁暂态等效建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 7047-7055.
- DING Jiangping, GAO Chenxiang, XU Jianzhong, et al. Electromagnetic transient equivalent modeling method of cascaded H-bridge power electronic transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 7047-7055.
- [32] ZHU Y C, ZHAO Z M, SHI B C, et al. Discrete state event-driven framework with a flexible adaptive algorithm for simulation of power electronic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 11692-11705.
- [33] 尹平平, 王韦华. 基于 FPGA 的直流变压器实时仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 140-145.
- YIN Pingping, WANG Weihua. FPGA based real time simulation and research of DCSST[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 140-145.
- [34] 孙谦浩, 宋 强, 王 裕, 等. 基于 RT-LAB 的高频链直流变压器实时仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 80-87.
- SUN Qianhao, SONG Qiang, WANG Yu, et al. Real-time simulation research of high frequency link DC solid state transform based on RT-LAB[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 80-87.
- [35] 王 婷. 基于模块化多电平矩阵变换器的电力电子变压器研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- WANG Ting. Research of power electronic transformer based on modular multilevel matrix converters[D]. Jinan, China: Shandong University, 2015.
- [36] 刘京斗, 李小均, 吴学智, 等. 基于 RT-LAB 的 PET 中间级直流变换器半实物仿真平台设计[J]. 北京交通大学学报, 2017, 41(2): 117-122.
- LIU Jingdou, LI Xiaojun, WU Xuezhi, et al. Design of hardware-in-the-loop simulation platform for PET intermediate level DC/DC converter based on RT-LAB[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(2): 117-122.
- [37] 南京研旭电气科技有限公司. PET 电力电子变压器硬件在环创新实验平台[EB/OL]. 南京: 南京研旭电气科技有限公司, 2020 [2020-11-19]. <http://www.njyxdq.com/news/156.html>.
- Nanjing YanXu Electric Technology Co., Ltd. Innovative hardware-in-the-loop experimental platform for power electronic transformer [EB/OL]. Nanjing: Nanjing YanXu Electric Technology Co., Ltd., 2020[2020-11-19]. <http://www.njyxdq.com/news/156.html>.
- [38] ROTHMUND D, GUILLOD T, BORTIS D, et al. 99% efficient 10 kV SiC-based 7 kV/400 V DC transformer for future data centers[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(2): 753-767.
- [39] WANG D, YANG Y, TIAN J, et al. Design and implementation of 10-kV MW-level electronic power transformer (EPT)[C]//2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS). Portland, OR, USA: IEEE, 2018: 1-10.
- [40] DONG D, AGAMY M, BEBIC J Z, et al. A modular SiC high-frequency solid-state transformer for medium-voltage applications: design, implementation, and testing[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(2): 768-778.
- [41] LIU J Q, ZHONG S G, ZHANG J P, et al. Auxiliary power supply for medium-/high-voltage and high-power solid-state transformers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5): 4791-4803.
- [42] KADAVELUGU A, WANG G Y, BHATTACHARYA S, et al. Auxiliary power supply for solid state transformers[C]//2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Raleigh, NC, USA: IEEE, 2012: 1426-1432.
- [43] WUNSCH B, BRADSHAW J, STEVANOVIĆ I, et al. Inductive power transfer for auxiliary power of medium voltage converters[C]//2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Charlotte, NC, USA: IEEE, 2015: 2551-2556.
- [44] ORTIZ G, BIELA J, BORTIS D, et al. 1 Megawatt, 20 kHz, isolated, bidirectional 12 kV to 1.2 kV DC-DC converter for renewable energy applications[C]//The 2010 International Power Electronics Conference (ECCE ASIA). Sapporo, Japan: IEEE, 2010: 3212-3219.
- [45] ZHAO S S, LI Q, LEE F C, et al. High-frequency transformer design for modular power conversion from medium-voltage AC to 400 VDC[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 7545-7557.
- [46] 王威望, 刘 莹, 何杰峰, 等. 高压大容量电力电子变压器中高频变压器研究现状和发展趋势[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3362-3373.
- WANG Weiwang, LIU Ying, HE Jiefeng, et al. Research status and development of high frequency transformer used in high voltage and large capacity power electronic transformer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3362-3373.
- [47] CUI B, XUE P, JIANG X H. Elimination of high frequency oscillation in dual active bridge converters by dv/dt optimization[J]. IEEE Access, 2019, 7: 55554-55564.
- [48] 魏树生, 赵争鸣, 文武松, 等. 共交流母线多端口变换器高频振荡特性分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(9): 751-762.
- WEI Shusheng, ZHAO Zhengming, WEN Wusong, et al. Analysis of the high-frequency oscillation characteristics of a multi-port converter with an AC link[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2020, 60(9): 751-762.
- [49] 马明明. 技术创新引领张家口可再生能源示范区焕发“勃勃生机”[EB/OL]. 张家口: 张家口新闻网. (2019-03-11)[2020-11-19]. https://www.sohu.com/a/300376248_119930.
- MA Mingming. Technological innovation leads Zhangjiakou renewable energy demonstration zone to glow with “vitality” [EB/OL]. Zhangjiakou: Zhangjiakou News. (2019-03-11) [2020-11-19]. https://www.sohu.com/a/300376248_119930.
- [50] MUELLER J A, KIMBALL J W. An improved generalized average model of DC-DC dual active bridge converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9975-9988.
- [51] ZHANG K, SHAN Z Y, JATSKEVICH J. Large- and small-signal average-value modeling of dual-active-bridge DC-DC converter considering power losses[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 1964-1974.
- [52] SUN J N, YUAN L Q, GU Q, et al. Design-oriented comprehensive time-domain model for CLLC class isolated bidirectional DC-DC converter for various operation modes[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3491-3505.
- [53] ZHAO C H, ROUND S D, KOLAR J W. An isolated three-port bidirectional DC-DC converter with decoupled power flow management[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2443-2453.
- [54] RASHIDI M, ALTIN N N, OZDEMIR S S, et al. Design and development of a high-frequency multiport solid-state transformer with decoupled control scheme[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 7515-7526.

- [55] LIU J Q, YANG J X, ZHANG J P, et al. Voltage balance control based on dual active bridge DC/DC converters in a power electronic traction transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1696-1714.
- [56] GE J J, ZHAO Z M, YUAN L Q, et al. Energy feed-forward and direct feed-forward control for solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(8): 4042-4047.
- [57] 李鲁阳, 范士雄, 邓 卫, 等. 多电力电子变压器协调控制及不间断供电研究[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(2): 27-34.
LI Luyang, FAN Shixiong, DENG Wei, et al. Research of coordinate control strategy of power electronic transformer based AC/DC hybrid distribution system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(2): 27-34.
- [58] ZHAO T F, WANG G Y, BHATTACHARYA S, et al. Voltage and power balance control for a cascaded H-bridge converter-based solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1523-1532.
- [59] SHE X, HUANG A Q, NI X J. Current sensorless power balance strategy for DC/DC converters in a cascaded multilevel converter based solid state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(1): 17-22.
- [60] YANG J X, LIU J Q, ZHANG J P, et al. Research on different balance control strategies for a power electronic traction transformer[C]//2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). San Antonio, TX, USA: IEEE, 2018: 1821-1828.
- [61] WANG F, HUANG A, WANG G Y, et al. Feed-forward control of solid state transformer[C]//2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Orlando, FL, USA: IEEE, 2012: 1153-1158.
- [62] ZHAO T F, SHE X, BHATTACHARYA S, et al. Power synchronization control for capacitor minimization in solid state transformers (SST)[C]//2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 2011: 2812-2818.
- [63] ISOBE T, TADANO H, HE Z J, et al. Control of solid-state-transformer for minimized energy storage capacitors[C]//2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Cincinnati, OH, USA: IEEE, 2017: 3809-3815.
- [64] 杨艳艳, 李海波, 盛 超, 等. 多端口级联式电力电子变压器可靠性评估模型及其应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 41-49.
YANG Fenyang, LI Haibo, SHENG Chao, et al. Reliability evaluation model of cascaded multiport power electronic transformer and its application[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 41-49.
- [65] 肖 祥, 周永言, 赵 伟, 等. 一种电能路由器集群系统同类端口功率分配方法及装置: CN108923937A[P]. 2018-11-30.
XIAO Xiang, ZHOU Yongyi, ZHAO Wei, et al. Power distribution method and device of same kind of ports of electric energy router trunking system: CN108923937A[P]. 2018-11-30.
- [66] NEJABATKHAH F, LI Y W. Overview of power management strategies of hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 7072-7089.
- [67] YU X W, SHE X, ZHOU X H, et al. Power management for DC microgrid enabled by solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 954-965.
- [68] 李 探, 赵成勇, 李路遥, 等. MMC-HVDC 子模块故障诊断与就地保护策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1641-1649.
LI Tan, ZHAO Chengyong, LI Luyao, et al. Sub-module fault diagnosis and the local protection scheme for MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1641-1649.
- [69] ZHAO T, ZHANG X, WANG M D, et al. Module power balance control and redundancy design analysis of cascaded PV solid-state transformer under fault conditions[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(1): 677-688.
- [70] 刘 巍. 级联型固态变压器故障检测与容错技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
LIU Wei. Research on fault detection and fault-tolerance technology of cascaded solid state transformer[D]. Nanjing, China: Southeast University, 2015.
- [71] LIU J Q, ZHAO N. Improved fault-tolerant method and control strategy based on reverse charging for the power electronic traction transformer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 2672-2682.
- [72] TIAN J, MAO C X, WANG D, et al. A short-time transition and cost saving redundancy scheme for medium-voltage three-phase cascaded H-bridge electronic power transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9242-9252.
- [73] ZANG J J, WANG J C, ZHANG J W, et al. A global redundancy scheme for medium-voltage modular multilevel converter based solid-state transformer[C]//2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2019: 2329-2334.
- [74] TANG L X, OOI B T. Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1877-1884.
- [75] FRANCK C M. HVDC circuit breakers: a review identifying future research needs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 998-1007.
- [76] LI W L, WANG Y F, WU X L, et al. A novel solid-state circuit breaker for on-board DC microgrid system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5715-5723.
- [77] 何俊佳. 高压直流断路器关键技术研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2353-2361.
HE Junjia. Research on key technologies of high voltage DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2353-2361.
- [78] 王渝红, 王 媛, 曾 琦, 等. 阻容式直流断路器及其在柔直系统中的应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 1-11.
WANG Yuhong, WANG Yuan, ZENG Qi, et al. Resistor and capacitor based DC circuit breaker and its application in flexible DC system[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 1-11.
- [79] 王渝红, 傅云涛, 曾 琦, 等. 柔性直流电网故障保护关键技术研究综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2362-2374.
WANG Yuhong, FU Yuntao, ZENG Qi, et al. Review on key techniques for fault protection of flexible DC grids[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2362-2374.
- [80] 李 帅. 柔性直流电网极间短路故障穿越策略与关键技术研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
LI Shuai. Research on fault ride-through strategy and key technologies of pole-to-pole short circuit in flexible DC grid[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2019.
- [81] 李 斌, 何佳伟. 多端柔性直流电网故障隔离技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 87-95.
LI Bin, HE Jiawei. Research on the DC fault isolating technique in multi-terminal DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 87-95.
- [82] 张建坡, 赵成勇, 孙海峰, 等. 模块化多电平换流器改进拓扑结构及其应用[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 173-179.
ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong, SUN Haifeng, et al. Improved topology of modular multilevel converter and application[J]. Transac-

- tions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 173-179.
- [83] ZHAO Z M, LI K, JIANG Y, et al. Overview on reliability of modular multilevel cascade converters[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2015, 1(1): 37-49.
- [84] 李国庆, 宋祯子, 王国友. 具有直流故障阻断能力的 MMC 不对称型全桥子模块拓扑[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 12-20.
- LI Guoqing, SONG Zhenzi, WANG Guoyou. Asymmetric full bridge sub-module topology of MMC with DC fault blocking capability[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 12-20.
- [85] 马大俊, 陈武, 薛晨扬, 等. 低压直流母线 AC-DC 电力电子变压器及其短路故障穿越方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 158-166.
- MA Dajun, CHEN Wu, XUE Chenyang, et al. AC-DC power electronic transformer with low-voltage DC bus and strategy of short-circuit fault ride-through[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 158-166.
- [86] GUILLOD T, KRISMER F, KOLAR J W. Protection of MV converters in the grid: the case of MV/LV solid-state transformers[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(1): 393-408.
- [87] OTA J I Y, SHIBANO Y, AKAGI H. A phase-shifted PWM D-STATCOM using a modular multilevel cascade converter (SSBC)—part II: zero-voltage-ride-through capability[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(1): 289-296.
- [88] 杨 韬. 配电网模块级联型电力电子变压器研制[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- YANG Tao. Development of module cascaded power electronic transformer in distribution network[D]. Changsha, China: Hunan University,

2015.

- [89] 关金萍. 基于电力电子变压器接口的 DFIG 系统建模与控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
- GUAN Jinping. Research on modeling and control strategy of power electronic transformer interfaced DFIG system[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2019.



LI Kai
Ph.D.



YOU Xiaojie
Ph.D., Professor
Corresponding author

李 凯

1988—, 男, 博士, 讲师
研究方向为电力电子变压器、模块化多电平变换器、电气化铁路等
E-mail: kaili@bjtu.edu.cn

游小杰(通信作者)

1964—, 男, 博士, 教授, 博导
研究方向为电力电子变压器、电能质量治理、电力牵引、开关电源等
E-mail: xjyou@bjtu.edu.cn

收稿日期 2020-09-03 修回日期 2020-10-10 编辑 程子丰