

电能路由器的发展及其关键技术

赵争鸣, 冯高辉, 袁立强, 张春朋

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084)

The Development and Key Technologies of Electric Energy Router

ZHAO Zhengming, FENG Gaohui, YUAN Liqiang, ZHANG Chunpeng

(State Key Lab of Control and Simulation of Power System and Generation Equipment (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: With the rapid development of energy internet and also power electronics, the related concepts of electronic transformer, intelligent transformer, power electronic transformer, energy router and others have been proposed. In this paper, these concepts were sorted out and reviewed. Based on the demands for energy internet, the paper expatiated the background and basic concept of electric energy router from the view of both power system and power electronics, respectively. Furthermore, three key technologies of the electric energy router which include power conversion, communication and energy management were expounded. In the end, a typical network configuration with electric energy routers was introduced for energy internet applications.

KEY WORDS: electric energy router; energy internet; power electronics transformer

摘要: 随着能源互联网的概念和实践迅速发展,同时也伴随着电力电子技术的快速进步,人们相继提出电子变压器、智能变压器、电力电子变压器及能量路由器等相关概念。该文对这些概念进行综述和梳理,总结电能路由器的发展历程。根据对能源互联网的设想及对电能路由器的需求,分别从电力系统和电力电子技术的角度阐述电能路由器的基本架构和基本功能。针对其在能源互联网中的应用,进一步从电能变换技术、通信技术和能量管理技术 3 个方面对电能路由器中的关键技术和功能应用进行阐述。最后介绍电能路由器在能源互联网中的一种典型组网形式。

关键词: 电能路由器; 能源互联网; 电力电子变压器

0 引言

随着能源紧缺和环境污染问题的日益突出,大规模新能源发电、高渗透分布式发电、新能源交通

工具以及大规模储能系统等的发展趋势不可逆转。电力系统也正向“源-网-荷-储”协调优化运行的新阶段发展,并将成为未来能源互联网的核心和纽带^[1-2]。众所周知,传统电力系统是自上而下的树状结构;在其电源、电网、负荷、储能等各个环节中,可用于调控的一次装备主要是分段和联络开关、变压器分接头、投切电容器等非智能手段,且具有操作寿命有限、调节精度较低的缺点。而未来电力系统是由自下而上的电能自治单元通过对等互联形成的,是一个开放、互联、对等、分享的体系;这个体系要求信息和电能的高度融合,要求具备精确、连续、快速、灵活的调控手段;在这种背景催生下,基于电力电子技术的“电能路由器”概念应运而生^[3-4]。电能路由器(electric energy router, EER)具有信息流和电能流高度融合的特点^[5],可用于解决传统电网的节点关系严重不对等、节点自治能力差、各节点自由度严重不均衡等几个方面的问题,可提高电网的韧性、兼容性和经济性,使得电能的生产者、经营者和使用获得更多的价值^[6]。

近年来,电力电子技术的多元化发展为电能路由器发展奠定了技术基础。电力电子器件的发展以全控混合型模块器件和宽禁带器件为主,换流器的发展以多种模块组合的多电平结构为主,控制系统的发展则更多的走向多核控制技术。电力电子装置与系统已经可以满足广泛的应用需求,包括家用电器、不间断电源、工业生产、机车牵引及新型电力系统各个行业。面向这些应用的电力电子装置正朝着高功率密度、高能量密度、高效能及智能化、模块化的方向发展,并呈现出新的特点:1)更多的采用硅基功率半导体模块组合技术和宽禁带功

基金项目: 国家自然科学基金“重大项目”课题(51490683)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (51490683).

率半导体器件;2)更多的采用由多个变换单元灵活组合的方式构成的多功能变换器;3)更多的形成多端口、多级联、多流向和多形态的电能变换形式^[7-10]。这些特点都大大提高了电力电子装置的变换效率和路由能力,奠定了电能路由器的技术基础。由于能源互联网的形式多样,电能路由器的组网形式也呈现多样化的趋势^[11-15]。

信息技术是电能路由器中除了能量变换技术之外的另一项技术基础。基于传感器网络和数据分析技术的智能感知和智能测量技术,使得电网中的信息采集、汇集和提取更为全面和准确;基于 IPv6 协议的网络技术,为数据交换提供了可靠、高效的手段;云计算平台提供了数据存储、计算、分析和共享的基础网络资源。借助新型的信息技术,电能可在流动过程中将具有智能化的电子标签,便于实现智能调度和需求侧响应,从而实现多源互补和“源-网-荷-储”的协调优化,实现电网与用户的实时互动,提升电网的运营水平和用户的用电体验。

本文从电力电子技术发展的角度,追溯电能路由器的技术起源和发展,讨论电能路由器的概念,明确基本功能要求和架构,并综述变换单元组合技术、端口即插即用技术、多端口多级变换协调控制技术等在电能路由器中的重要作用。

1 电能路由器架构和功能

电能路由器的基本架构如图1所示^[16],它由通信单元、控制单元和功率单元3个功能模块组成。其中,功率单元由多级电力电子变换单元组合而成,具有交直流电压等级变换、交直流电流波形变

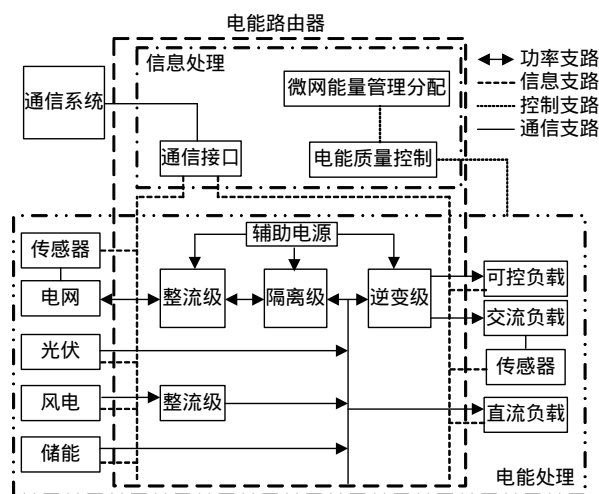


图1 电能路由器基本组成结构

Fig. 1 Basic structure of electric energy router

换、即插即用、电气隔离等功能;通信单元包括路由器内部通信接口和对外通信接口两部分,内部通信负责各组合单元与控制器之间的信息通信,对外通信接口通过多种形式的通信总线与外部系统(其他同级或上级节点设备)进行信息交换;控制单元接收通信单元的信息和功率单元反馈的信息,经过内部电能质量管理单元的控制,实现电能路由器内部以及微网内部的能量平衡^[7]。

在图1的基本架构中,电能路由器作为独立的电力电子装置能够完成电能的可控变换且具备与外部设备的通信功能。如何将电能路由器应用到现有电网中,包括如何与现有的保护装置融合和替代,与上层调度的通信协议兼容,以及自身的功能扩展与升级需要,还在继续研究之中。图2提供了一种电能路由器的扩展架构,分为能量处理模块、信息处理模块和用户管理模块^[17]。能量处理模块在信息模块的支持和控制下完成电能变换和路由功能;信息处理模块提供能量处理所需的控制信息外,还能结合现有的保护装置构成包含电能路由器在内的电网保护系统;用户管理模块提供电网监控、能源优化管理、网络安全防护和管理人员维护等功能。

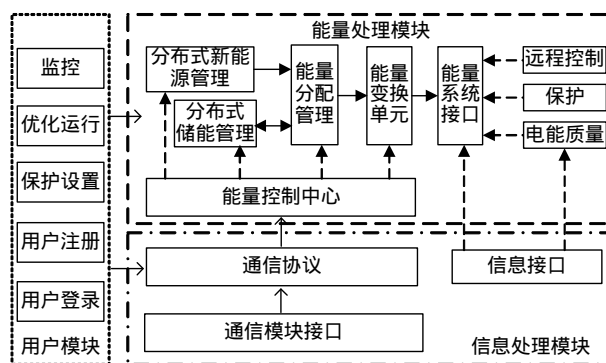


图2 电能路由器扩展架构

Fig. 2 Extended structure of electric energy router

电能路由器的结构和功能仍在发展之中,人们从不同的角度来看有不同的理解。从电力系统的角度来看,电能路由器是一种面向主动配电网及智能用电终端的电力管理调节器;从互联网系统的角度来看,电能路由器是物理系统与信息系统深度融合的网络节点装置,通过通信接口,实现信息流与能量流相互制约的作用;从电力电子的角度来看,电能路由器即为多端口、多级联、多流向和多形态的电力电子变换器;从用户的角度来看,电能路由器则是由全控型电力电子开关器件和高频变压器构

成的电磁能量变换装置,除了可以实现传统变压器的电压变换、电气隔离和能量传输等基本功能外,还可以实现无功补偿、谐波治理、电网互连、新能源装置并网、即插即用和电能路由等功能。归纳起来,电能路由器应具备以下基本功能^[7]:

1) 能够为新能源发电和分布式储能装置提供即插即用的交、直流接口。即满足电能路由器在不断电的情况下,通过设计合理的插接结构、通信接口、启动措施和运行模式,使得并网变换器实现方便快捷的投入和切除。

2) 能够实现电压变换、电气隔离、能量流向可控、提升电能质量。即通过优化设计内部器件参数和模块单元的组合形式,实现宽电压变比和电气隔离;通过合理选择无源元件参数,实现提升电能质量的同时,减小系统体积和重量;通过选用全控功率器件和合适的控制策略,实现能量双向流动,同时保证电能路由器的高效运行。

3) 能够根据故障情况或系统需要,自主地与主网分离和并网,提高电网的自愈性。即故障检测设备发送故障信息给电能路由器或上级控制系统,电能路由器识别后控制自身工作状态,进入离网运行状态;或者电能路由器根据自身内部的故障,自主与主网分离,保证电网不会因为电能路由器的接入导致新的故障。

4) 能够快速实施能量路由,保证各线路电能需求的快速匹配。即根据调度信息控制电能路由器,以实现各线路功率流向的快速调节;尽量保证最大限度的接纳新能源发电设备的输出,合理使用分布式储能设备,做到智能化能量管理。

5) 能够实时同步共享信息,实现信息流控制能量流,能量流制约信息流。即通过可靠快速的通信网络,实现网络中各个节点信息的共享,通过综合信息计算获得能量路径的优化结果,实际执行中遇到突发情况能够快速反应,重新获得有制约条件下的优化结果。

2 电能路由器的发展历程

电能路由器的主电路结构是从电力电子变压器演变而来,其发展过程经过几个阶段。

1) 高频变压:为减小工频变压器的体积,尝试向高频变压器发展。1968 年人们在传统电力变压器的基础上提出了一种高频环节电力变压器结构^[18],如图 3 所示。采用带中间抽头的高频变压器,

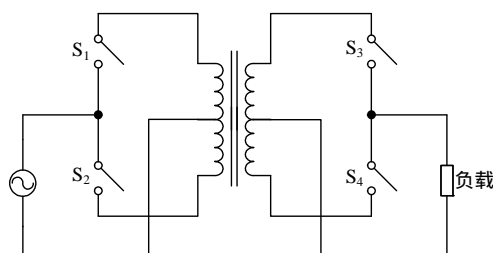


图 3 具有高频环节的电子变压器

Fig. 3 Electronic transformer with high frequency link

变压器两侧绕组各有两个功率电子开关,通过控制电子开关动作,实现基本的交流电压变换功能。该结构与传统电力变压器相比,在原、副边增加了控制电子开关,提高了交流电能的传输频率,减小了变压器体积。由于采用了功率电子开关器件与电力变压器结合,称之为“电子变压器”。该装置可以看作是从传统工频变压器走向可控高频变压器的一个开始,其变换功能和性能还是非常有限的。电能的传输通过变压器的铁芯和绕组进行,本质上还是以电磁感应为基本工作原理。

2) 全电子化变压:随着半导体功率器件的发展和控制技术的进步,人们推出了全部采用功率器件实现变压功能的全电子化变压器。1980 年出现了全部基于功率电子开关的交流变压器结构,它是一种直接 AC-AC 变换器。图 4 所示为一种典型的直接 AC-AC 变换器的拓扑形式^[19]。该结构中采用固态功率半导体器件取代汞弧整流器等液态开关,同时取消变压器铁芯和绕组,完全采用电力电子器件及其控制来实现交流电压的变化,故称之为“固态变压器”。该结构是从传统电力变压器向可控型变压器转变的重要转折点,为全部采用电力电子器件进行电能形式的直接变换提供了可能性。

3) 智能高频变压:由于“固态变压器”中没有隔离电力变压器,因此不具备输入端和输出端电

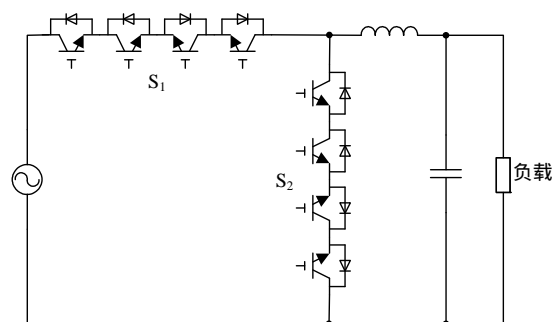


图 4 无隔离电力变压器的单级 AC-AC 固态变压器

Fig. 4 Single stage AC-AC solid state transformer without isolation power transformer

气隔离的功能,为此重新加入高频变压器,并进一步提高控制性能。1996年人们在图3结构的基础上,采用两个全控型电力电子功率开关器件(如 IGBT)和两个二极管反向并联来构成一个双向开关结构,如图5所示。同时采用相位控制方法来实现功率因数校正等基本功能,采用高频技术有效减小了变压器的体积,且使该变压器功能及智能化水平大大提高,称之为“智能变压器”^[20]。该结构在电子变压器的基础上,通过变压器原、副边的移相控制实现更多的变换功能,是将电力电子变压器推向高频化和实用化的一个重要阶段。1997年人们又提出了一种改进型的电子变压器结构^[21],如图6所示。它在智能变压器结构基础上,取消了变压器的中心抽头,用双向开关H桥结构控制变压器的原副边,在实现高频化的同时,提高了变换器的承压等级和控制能力。应用结果表明:采用1kHz交流高频链接,这种固态变压器可以传输同等体积的传统电力变压器3倍的功率,能更有效地应用于交流配电网中。它可以看作是现代电力电子变压器的雏形。

为进一步提高变换器输送电能的能力,1999年人们提出了带隔离变压器的间接AC-AC电力电子变压器结构^[22],如图7所示。它是目前为止最为典型的AC-DC-AC三级式变换结构,由输入级整流级、隔离级和输出逆变级共同组成。该拓扑与直接

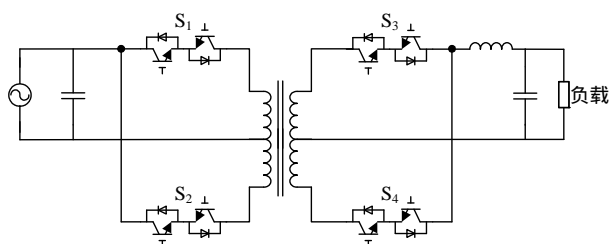


图5 带高频变压器的直接AC-AC智能变压器
Fig. 5 Direct AC-AC intelligent transformer with high frequency transformer

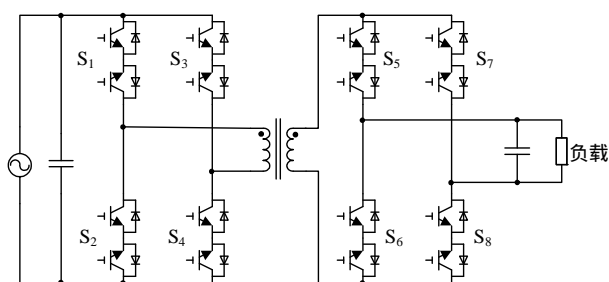


图6 改进型带隔离变压器的直接AC-AC电子变压器
Fig. 6 Improved direct AC-AC electronic transformer with isolation transformer

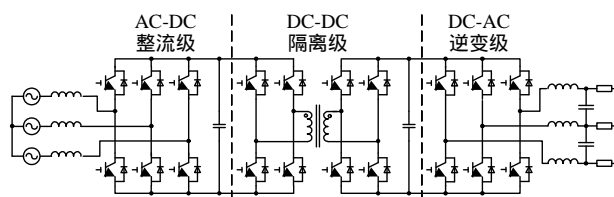


图7 带隔离变压器的间接AC-AC电力电子变压器
Fig. 7 Indirect AC-AC power electronic transformer with isolation transformer

AC-AC变压器相比,变压功能保持不变,隔离变压器的工作频率可以进一步提高,从而进一步减小变压器体积,大幅度提高变压器功率密度。同时,由于结构中多了两级直流母线环节,这两级直流母线可以向外引出直流端口,使得电力电子变压器具备了多端口的拓扑条件,使得电能的传输路径不再唯一,为能量路由的实现提供了可能性。

4) 高压高频变压:为提高电压等级,2000年之后人们又提出了适用于高压场合的串入并出的电力电子变压器拓扑结构。采用输入级为二极管整流桥叠加Boost升压电路的级联结构,隔离级采用多绕组变压器结构,输出级采用模块并联的结构,以适用于高压大容量场合^[23]。该拓扑结构与现在的电能路由器结构已经非常接近,不足之处是整流级采用二极管整流桥,使得该种结构不能实现电能双向传输,应用受限。对于无直流环节的直接AC-AC拓扑,提出了各种基于矩阵变换器电路的结构,能够省去直流母线电容^[24]。对于需要直流环节的拓扑,在输入级的整流电路中,采用模块化多电平电路和级联电路,配合适当的控制策略来满足高压大容量的电能变换要求^[25-27];针对电力电子变压器中可能出现的三相输入输出不平衡现象,提出输入级联、输出交叉并联的结构,在三相输入和三相输出任一端发生不平衡情况时,都不会影响到另一端,能够实现自动平衡^[28]。针对级联拓扑,需要进行级联均压控制时,可以在拓扑中接入多绕组高频变压器和不控整流桥,实现依靠硬件电路实现在较少模块下的均压控制^[29];当级联模块数量较多时,文献对比了4种均压控制的方法,得出在输入级联、输出并联形式的拓扑中的最优控制策略^[30],等等。可以说,进入21世纪以来,电力电子变压器已经进入了多元化的时代。

5) 多端口路由变压:随着能源互联网概念的提出,对电能变换和传输的多样化和灵活性要求进一步提高,人们希望在实施可控变压的同时还能够

实现电网中电能传输路径的主动选择和流向的主动控制,即电能的路由功能。因此,需要一种能够对电能进行大小和流向控制的装置,单输入输出的电力电子变压器就演变为多端口电力电子变压器,它可以根据内部的控制和上层的调度,实现电能路由的功能,当具备这样的电能变换、控制和通信功能后,电力电子变压器升级为电能路由器。以应用中低压配电网中的电能路由器为例^[31],在输入端需要采用多电平技术。目前典型的电能路由器拓扑结构有两种,即级联型 H 桥构成的串入并出的拓扑结构和模块化多电平技术构成的拓扑结构。其中,级联拓扑如图 8 所示,这种结构既能满足高压大容量的需求,又可以提供直流端口,具备了电能路由所需的多端口的基本需求,能够面向能源互联网形成灵活的组网形式,满足能源互联网的要求。

为了能够提供更高电压等级的直流端口,出现了如图 9 所示为采用模块化多电平结构的电能路由器拓扑结构。两种类型在应用中各有侧重,使用中

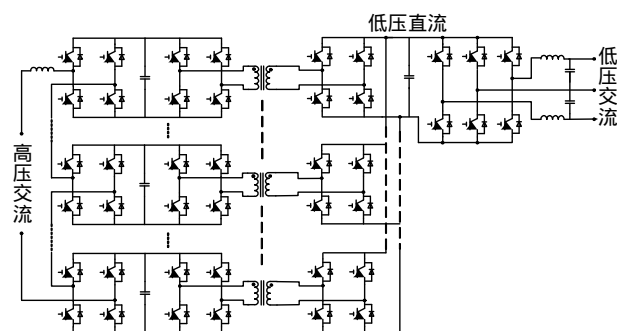


图 8 级联型结构的电能路由器拓扑

Fig. 8 Cascaded topology of electric energy router

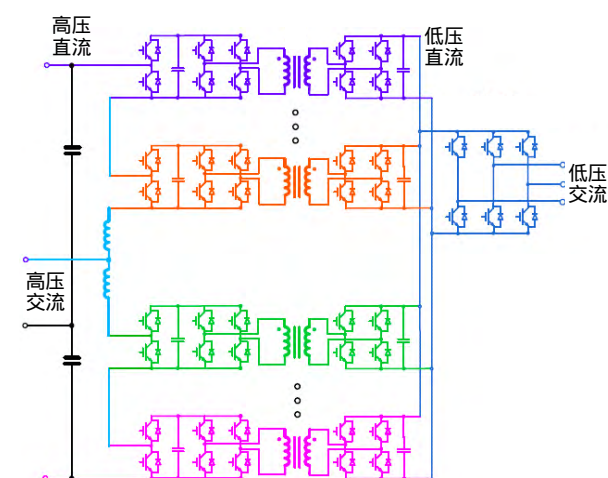


图 9 模块化多电平结构的电能路由器拓扑

Fig. 9 Modular multilevel topology of electric energy router

需要根据实际情况进行选择^[32]。

由上可见,电能路由器是从电力电子变压器结构演变而来的。但能源互联网的发展赋予了它许多新的概念和功能,它需要将分布式能源发电设备、储能设备与现有电力网络实施智能管理和控制;它除了需要具备电力电子变压器的电能可控变换功能外,还需具备多端口电能管理和装备之间的网络通信交流作用,以适应于能源互联网中的电能调度控制功能。为满足能源互联网发展的需求,电能路由器仍在发展之中。

3 电能路由器的应用及关键技术

目前,对电能路由器的应用研究主要集中在配电网中。以电能路由器作为并网节点设备,可以形成交直流混合的微网结构,电能路由器可以通过接收调度指令控制网络中的潮流方向和大小,也可以根据微网系统的实际情况,实现微网自治。当直接应用于 10kV 的中压配电网时,由于现有功率器件的承压能力有限,需要采用单元组合技术承受高压;同时电能路由器提供的直流端口应该满足即插即用的功能,使得在实际配网应用中,能够方便提供新能源发电设备和储能设备的并离网功能;同时通过合理规划交流、直流母线的连接关系,优化配网系统的资源配置和效率提升。通过对多级变换器的协调控制,提高电能路由器对电网潮流的快速调节能力。一种以电能路由器为节点的新型混合配电网的组网模型如图 10 所示。

其中 DG(distribution generation, DG)为分布式发电单元,DS(distribution storage, DS)为分布式发电单元,EER 为电能路由器,它具有高压交流端口、低压交流端口、高压直流端口和低压直流端口共 4 类端口,每类端口的输出可与其它电能路由器的相同端口的输出并联,组成各自电压等级和制式的网络结构,使得电能在各个电能传递的层面都构成网状结构,为电能的传输提供更灵活的路径选择。图 10 中显示向低压交流负载供电的多端网状路径与现有配电网中的单端或双端供电的传输路径相比,可靠性和灵活性都大大提高。

要实现电能路由器在能源互联网中的功能,其关键技术应包括:具有不同路由形式的变换单元组合技术,根据不同应用需求的即插即用技术,满足性能优化的协调控制技术及相应的通信技术和能量管理技术。

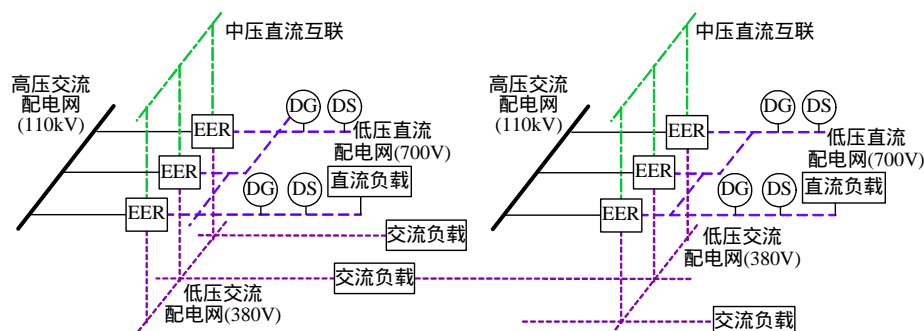


图 10 以电能路由器为节点的新型混合配电网模型

Fig. 10 A new hybrid distribution network model based on electric energy router

3.1 变换单元组合技术

采用变换单元的组合技术主要解决单元变换功能和有限功率与系统路由功能和容量不断增加之间的矛盾。随着对电能路由器功能要求的不断提高,单级变换器已经不能满足高压大容量和多端口路由的需求,需要采用多级变换器的单元组合。电能路由器的拓扑结构发展过程实际上是多种变换单元组合优化的结果。评价各种不同的组合形式除了需要满足系统规定的功能外,还要从系统整体的性能需求(包括损耗、成本、控制复杂程度和器件的利用率等指标)出发进行优化。

作为应用于能源互联网的关键设备,对电能路由器中的变换单元进行组合时需要考虑的主要问题有:路由器的承压通流能力、电气隔离、新能源高效接入、交直流混合微网的互连等问题,这些问题都可以通过采用不同的单元组合后得到解决。

以三相 AC-AC 变换器为例^[33],利用三相直接矩阵变换单元 U_1 、三相间接矩阵变换单元 U_2 和具有直流母线的背靠背变换单元 U_3 之间的两两组合,可以构成 9 种三相 AC-AC 变换器的组合形式,各个单元的拓扑和组合形式分别如图 11 所示。实际中,可以根据变换器的具体使用场合和成本等其它要求,选择合适的组合形式。其中,由 U_1 与高频变压器的组合,可以实现三相电压的变换,具备了电力电子变压器的功能;由 U_1 、 U_2 和

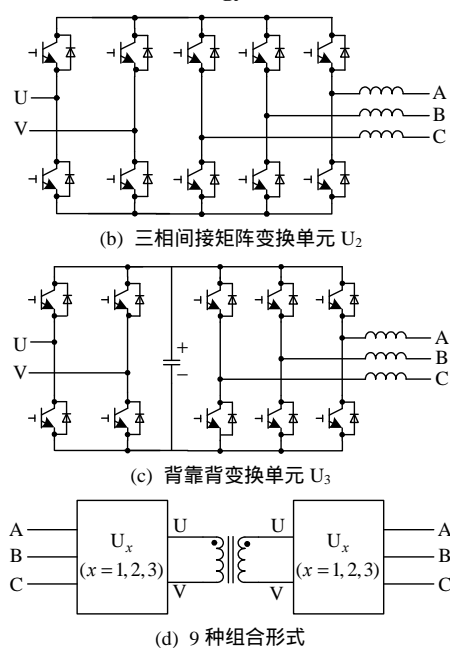
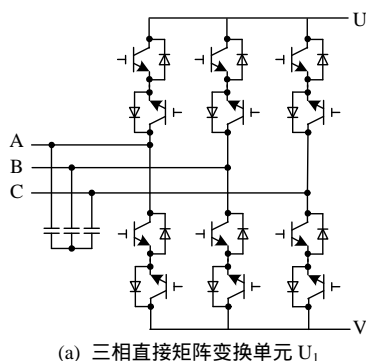


图 11 AC-AC 变换器的子单元拓扑和组合形式

Fig. 11 Three unit topologies and combination forms of AC-AC converter

的组合中, U_2 存在一个可调制的直流环节,不需要直流电容,相对于 U_1 的调制策略和控制方法简单化;由 U_1 、 U_3 和高频变压器的组成中, U_3 中直流母线环节可以开放,从而形成新的直流端口,使得组合拓扑由两端口变为三端口系统;由 U_3 与高频变压器的组合,前后级中都有直流母线电容支撑,如图 7 的拓扑形式一致,可以扩展出两路新的直流端口,使得组合拓扑变为四端口系统,适用于更复杂的网络中。

在面向中高压的三相电能路由器中,需要采用串联拓扑增加装置的承压能力。选择不同的拓扑类型时,可以兼顾考虑中间高频变压器的形式,配合不同的前后级变换器单元,构成不同的组合形式。串联拓扑分为 3 种类型,如图 12 所示。利用这 3 种单元可以组合出多种高压 AC-AC 拓扑,图 13 为其中的 6 种形式。

(a) 三相直接矩阵变换单元 U_1

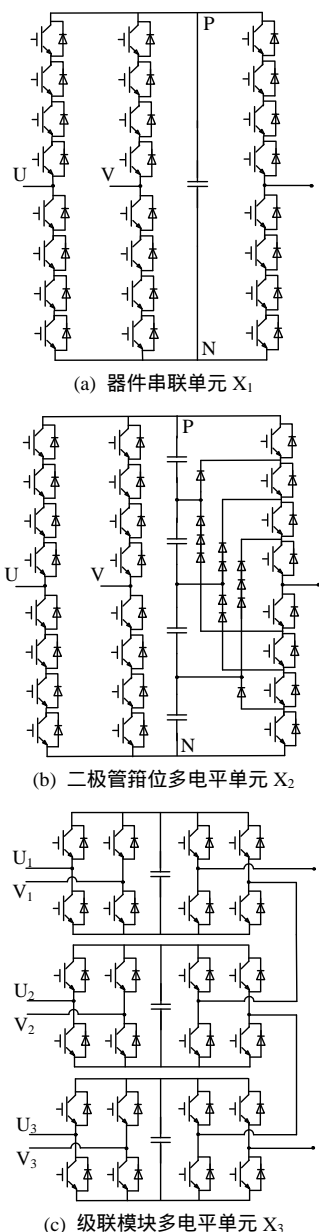


图 12 组合单元的 3 种拓扑形式

Fig. 12 Three topological forms of combination cells

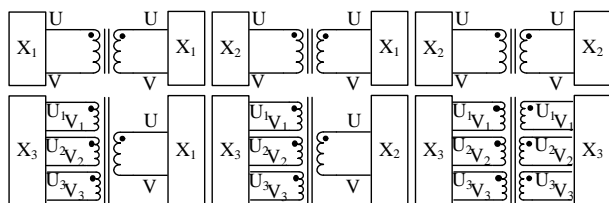


图 13 6 种高压 AC-AC 拓扑组合形式

Fig. 13 Six types of high voltage AC-AC topology combination

上述各种组合各有特点，选择时可以结合高频变压器的设计统一考虑。

3.2 端口即插即用技术

优良的端口即插即用能力可以保证电能路由

器接入源和荷的灵活性和实时性，更能满足能源互联网的复杂路由需求。即插即用技术是从 IT 行业发展而来的，原指计算机利用通用协议自行识别插接的外部设备，进行信息识别和相应的操作。当该技术从信息行业拓展到能源领域时，主体设备除了需识别插接设备的信息外，还要对插接设备的能量端口进行相应的识别和管理。

即插即用技术应用在电能路由器中，包括能量和信息两个方面的即插即用。即在电能路由器不断电的情况下，并网设备(新能源发电设备、储能设备以及负荷变流器等)与电能路由器的开放端口插接，按照通信协议，快速识别插接设备的类型和其它信息。在整个系统安全和稳定的前提下，电能路由器按照相应的设备类型进行控制，实现变换器并网的功能，电能路由器的管理系统将并网设备纳入管理范围，做到区域能源的优化运行。实现电能路由器即插即用的关键技术有：统一的通信协议；带有保护装置的统一插接端口；智能化的能量管理系统^[34]等。

一种直流装置即插即用能量端口的拓扑结构和接通过程如图 14 所示^[35]，并网变换器的直流母线通过即插即用插座与 EER 的直流母线连接，在插接过程中，利用机械装置触发控制，使得串联在负

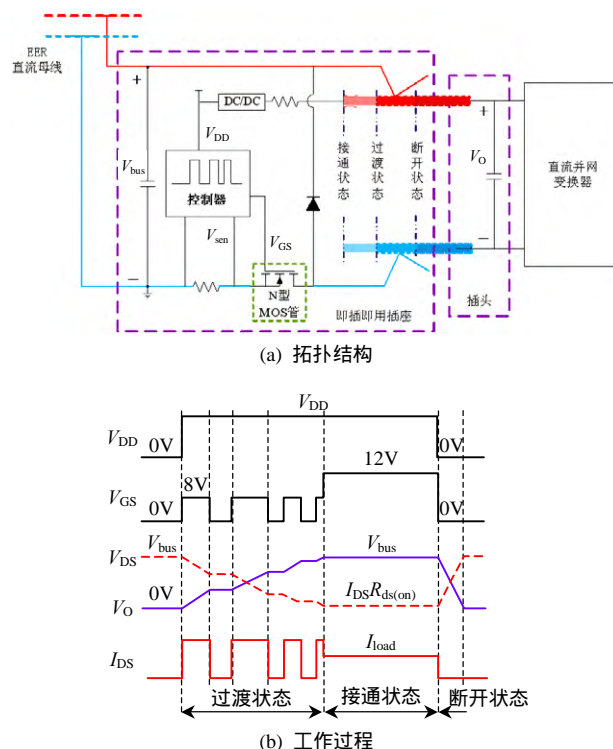


图 14 电能路由器的即插即用端口和工作过程

Fig. 14 Plug and play electric energy router port structure and operation modes

母线中的 N 型 MOSFET 功率器件经过多次部分开关, 将并网变换器中的母线电压逐渐升高至 EER 的母线电压值。

信息与控制技术结合实现即插即用的控制。当本地变换器通过硬件接口与 EER 建立能量连接后, 本地变换器与 EER 的通信也随之连接。根据规定的通信协议, EER 识别所连接的变换器类型, 结合自身能量需求, 控制本地变换器的输出类型, 实现 EER 与一个或多个本地变换器的协调控制^[36]。即插即用的信息实现过程如图 15 所示。

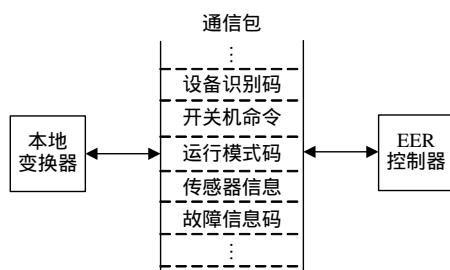


图 15 电能路由器的通信即插即用过程

Fig. 15 Plug and play communication process of electric energy router

3.3 多端口多级联变换器协调控制技术

电能路由器作为多级电力电子变换器的组合体, 采用协调控制可提高其瞬态性能。通过建立电能路由器的能量模型, 利用各个控制变量的能量关系进行协调控制。这种方式体现了能量传递的本质, 使得能量在各级之间快速稳定流通, 因而可减少动态过程的恢复时间, 降低母线电压波动, 从而减小母线电容大小, 增加系统的可靠性。按照协调控制方式的不同, 分为前馈控制和能量平衡控制^[7]。

按照前馈量的不同, 前馈控制分为电流前馈、功率前馈和能量前馈控制方法, 当采用能量前馈控制时, 与电流前馈和功率前馈相比, 同时考虑动态过程中电能路由器各级端口能量的变化和内部无源元件中的储能变化, 将其作为控制反馈量, 可以提高系统动态性能^[37]。

协调控制的第 2 种方式是直接利用能量进行控制, 即利用能量平衡原理建立各级变换器控制量之间的能量关系。当端口之间的能量在动态过程中发生变化时, 需要依靠内部储能元件平衡不同时间尺度下的能量冲突。在双母线拓扑结构中, 利用两级母线之间的不同时间尺度的能量平衡关系, 解耦两级母线中的能量波动在控制中的影响, 从而优化电能路由器的瞬态输出性能^[38]。如图 16 所示为一种

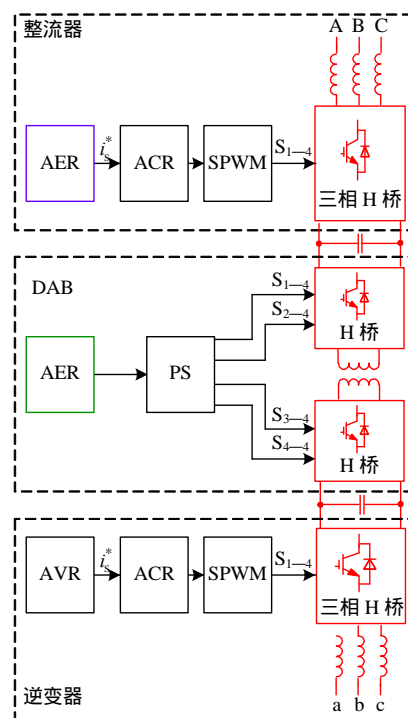


图 16 电能路由器中采用能量平衡控制

Fig. 16 Energy balance control in electric energy router

典型的基于能量平衡的电能路由器系统控制框图, 其中能量调节器(automatic energy regulator, AER)负责控制直流母线中的能量波动和电压波形, 电流调节器(automatic current regulator, ACR)用于控制输入输出电流的正弦波形, 电压调节器(automatic voltage regulator, AVR)用于控制电压性能^[7]。

3.4 分级通信技术

电能路由器要实现电能的准确调度, 不仅需要先进的电能转换技术, 还需具备充分的信息通信技术。电能路由器的通信接口分为两级, 分别是路由器内部的通信总线和与外部设备通信网络接口。

依托电能路由器的分级通信网络如图 17 所示^[16]。其中通信模块之间通过特定的格式实现电能路由器之间的信息通信, 电能路由器之间及电能路

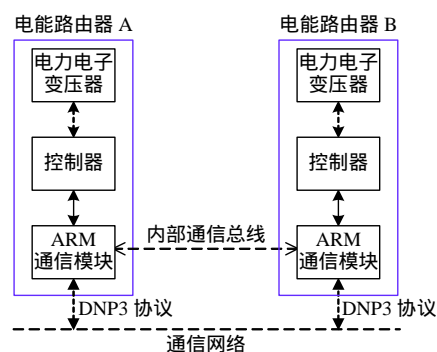


图 17 电能路由器的通信方式

Fig. 17 Communication mode of electric energy router

由器与上级能量管理系统之间的通信采用 TCP/IP 的通信协议实现。

在电能路由器中,能量变换和信息交互是相对独立的过程,两者的协调运行是确保电能路由器准确调控电能的关键。以储能设备为例,在网络中肩负着维持局域网络电压稳定、能量平衡的任务,是实现重要负荷不间断运行的基础,其工作状态对整体网络的可靠运行至关重要,因此储能设备与电能路由器通信的优先级和实时性相对较高。其次,在网络稳定运行时,电能路由器与电气节点的信息交换需要考虑通信带宽以及功率变化的复杂性,通信频率过快将导致通信的冲突增多和冗余带宽降低,不利于系统的扩展;而通信速率过低又难以实时反映系统节点的电气状态变化。另一方面,当发生并网节点的投入和退出、系统出现故障、节点功率过载等突发情况,电能路由器的能量管理单元往往立即动作以保证系统安全,而后续的系统能量重新分配则需要通信层的协助和电能路由器的决策。能否快速恢复系统故障,实现容错运行,瞬态情况下的通信方式尤为重要^[39]。

进一步,电能路由器的通信接口需要与其它设备的通信接口和能源互联网的上层通信系统进行互联,通过将通信网络分级布置到各级电能路由器、各个网络节点和终端设备中,利用能源互联网的通信系统对网中各类型设备数据进行高速、双向、可靠传输,实现在现有电力系统通信网络中,构建能源互联网所需的分级通信网络。能源互联网中采用的分层控制架构是对现有通信系统的新的挑战。同时,能源互联网的应用环境、成本、“即插即用”设备的动态变化等也会对通信技术的选取产生影响。因此,能源互联网中通信技术的选择,主要根据所传输的数据类型、通信节点数量、设备地理位置分布、能源局域网数量、各能源局域网运行目标以及能源互联网总体运行目标等因素综合决定。覆盖区域上,能源互联网通信网络需要考虑局域网、区域网、广域网 3 种网络架构,实现与数据中心、电力市场、调度中心等机构信息互联^[40]。

3.5 分层能量管理技术

在电能路由器实现便利快速地进行电能变换的基础上,覆盖多节点、多层次的电网通信网络,最终依靠电能路由器及分层的能量管理技术实现对电网中所有支路电能的主动控制和合理分配。分配各个支路功率大小的功能将根据通信网络得到

的实时节点信息和负荷信息,做出合理的调控而完成的。电能路由器作为执行装置需要满足正常运行时接受上层调度指令,实现能量的高效传输;故障运行时实现自主控制,保证装置和电网的安全可靠运行。

在能量管理优化模型方面,从今后的电力系统来看,由于高渗透率的分布式能源的接入,配电网中的能量流动将从简单的辐射状变为复杂多向流动,能量管理优化建模的难度将大幅增加。与主动配电网中的优化指标类似,优化模型中除了要考虑电网运行的经济性外^[41],还要考虑环境的代价。优化模型中的约束条件将不仅包括能量平衡、各类发电设备的特性约束,还要考虑可再生能源的不确定性和间歇性,以及储能设备的荷电和容量限制等。目前电网采用完全吸纳可再生能源发电量的原则以降低全网发电的成本,但需要考虑其发电不确定性和间歇性给电网调度带来的影响,而储能设备可在局部吸纳过剩的电能,起到削峰填谷的作用。在电能路由器的控制下,各级以电能路由器为节点的微网均可实现并网运行和独立运行。并网运行时的能量管理优化除了经济性的考虑,还要考虑并网点的潮流变化对主干网的冲击和电能质量的影响。独立运行时,电能路由器的控制目标是维持微网的可靠运行。因此,在较高可再生能源渗透率的能源互联网中,利用电能路由器执行分层能量管理和优化调度对能源互联网的经济运行和安全稳定有着重要意义。通过对电能路由器的合理调度和其自身的控制,不但可以提高电网传输效率和装置利用率,还能提高网络的稳定性和可靠性^[39]。

分层能量管理技术在具体实施中,首先应通过能源互联网调度中心发挥全局协调和控制的作用,而各个能源局域网中的电能路由器采用分布式的能量管理技术进行局域网中的能量协调管理。这样每个局部所需处理的信息量不是很大,可以快速控制达到稳定,增强即插即用的功能,同时可降低与调度中心的通信量和调度中心的计算量。一种能源互联网的分层能量管理系统示意图如图 18 所示^[40]。

图 18 中,电能路由器作为能源互联网的节点设备,使得电能流向变成可控流动。除了包括电力电子变压器的已有功能外,赋予了电能路由器对新能源发电和储能设备的即插即用功能,在此基础上,融合信息通信技术和能量管理技术,将使得整个现有电网的架构、运行模式及电力交易市场都发

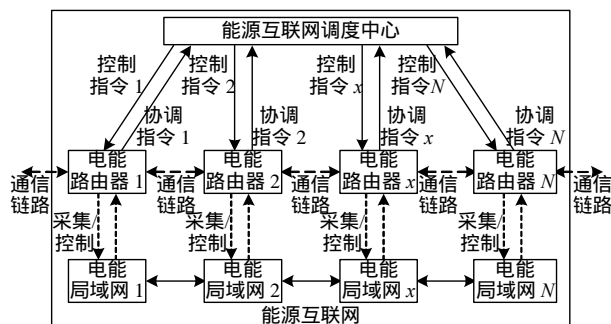


图18 能源互联网分层能量管理系统示意图

Fig. 18 Sketch of hierarchical energy management system in energy internet

生较大的改变，最终依靠能源互联网实现传统能源与可再生能源的多能互补，最大限度提高新能源的利用率。

4 结论

本文介绍了以电网为核心的能源互联网背景下的电能路由器基本概念和基本功能，从电力电子技术的发展角度追溯了电能路由器的发展历程，从应用的角度综述了电能路由器中的电能变换、通信和能量管理等关键技术。可以看到，电能路由器将成为能源互联网中的关键设备。随着能源互联网的概念和实践进一步发展，电能路由器的概念和结构也将会随之发生更多的变化，其功能也将由单一的电能变换和路由功能扩展到多种形式的能量变换和路由功能，进而发展到真正的“能量路由器”概念和结构。

参考文献

- [1] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.
Zhou Xiaoxin, Lu Zongxiang, Liu Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008(in Chinese).
- [2] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
Dong Zhaoyang, Zhao Junhua, Wen Fushuan, et al. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11(in Chinese).
- [3] 查亚兵, 张涛, 黄卓, 等. 能源互联网关键技术分析[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 702-713.
Zha Yabing, Zhang Tao, Huang Zhuo, et al. Analysis of energy internet key technologies[J]. Scientia Sinica: Informationis, 2014, 44(6): 702-713(in Chinese).
- [4] Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [5] Zhou Xuesong, Wang Fuzhi, Ma Youjie, et al. An overview on energy router based on various forms of energy[C]//Proceedings of IEEE Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Yinchuan, China: IEEE, 2016: 2901-2906.
- [6] Miao Jianqiang, Zhang Ning, Kang Chongqing, et al. Steady-state power flow model of energy router embedded AC network and its application in optimizing power system operation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, DOI: 10.1109/TSG.2017.2672821.
- [7] 冯高辉. 面向配电网的能量路由器多模式能量变换控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
Feng Gaohui. Research on multi-mode energy conversion control of energy router in distribution network[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017(in Chinese).
- [8] Lu Sizhao, Yuan Liqiang, Zhao Zhengming, et al. An energy-based multi-loops control strategy for modular multilevel converter[C]//Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Pattaya, Thailand: IEEE, 2015: 553-558.
- [9] Li Zixin, Gao Fanqiang, Xu Fei, et al. A simple electric energy router circuit for exchanging active power of AC grids[C]//Proceedings of the 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Florence, Italy: IEEE, 2016: 5201-5204.
- [10] Yin Lu, Weng Xing, Zhang Kai, et al. A new topology of energy router with multiple HVAC ports for power distribution networks[C]//Proceedings of the 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Chiba, Japan: IEEE, 2016: 1-5.
- [11] Guo Hui, Wang Fei, Luo Jian, et al. Review of energy routers applied for the energy internet integrating renewable energy[C]//Proceedings of the 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference. Hefei, China: IEEE, 2016: 1997-2003.
- [12] 徐梦超, 邹能灵, 黄文焘, 等. 基于社区能源网的电能路由器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 177-183.
Xu Mengchao, Tai Nengling, Huang Wentao, et al. Energy router design based on community energy network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 177-183(in Chinese).
- [13] 盛万兴, 段青, 梁英, 等. 面向能源互联网的灵活配

- 系统关键装备与组网形态研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3760-3769.
- Sheng Wanxing, Duan Qing, Liang Ying, et al. Research of power distribution and application grid structure and equipment for future energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3760-3769(in Chinese).
- [14] 李洋, 蔡志远, 刘海涛, 等. 一种面向能源互联网的“云-端”自主配电系统研究[J/OL]. 中国电机工程学报, 2016, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20161129.1704.016.html>.
- Li Yang, Cai Zhiyuan, Liu Haitao, et al. Research on “cloud-client” autonomous distribution system oriented energy internet[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2016, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20161129.1704.016.html>(in Chinese).
- [15] Mustafa Y S A, Brunelli D. Home energy router for smart consumer grids[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST). Vienna, Austria: IEEE, 2015: 505-509.
- [16] Xu Yi, Zhang Jianhua, Wang Wenye, et al. Energy router: architectures and functionalities toward energy internet [C]//Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Brussels, Belgium: IEEE, 2011: 31-36.
- [17] 曹军威, 孟坤, 王继业, 等. 能源互联网与能源路由器[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 714-727.
- Cao Junwei, Meng Kun, Wang Jiye, et al. An energy internet and energy routers[J]. Scientia Sinica: Informationis, 2014, 44(6): 714-727(in Chinese).
- [18] McMurray W. Power converter circuits having a high frequency link: USA, 3517300[P]. 1970-06-23.
- [19] Reischl P. Proof of principle of the solid-state transformer: the AC/AC switchmode regulator[R]. EPRITR-105067, Research Project 8001-13, Final Report. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, 1995.
- [20] Harada K, Anan F, Yamasaki K, et al. Intelligent transformer[C]//Proceedings of the 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Baveno, Italy: IEEE, 1996, 2: 1337-1341.
- [21] Kang M, Enjeti P N, Pitel I J. Analysis and design of electronic transformers for electric power distribution system[C]//Proceedings of Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference. New Orleans, LA, USA: IEEE, 1997, 2: 1689-1694.
- [22] Sudhoff S D. Solid state transformer: USA, 5943229[P]. 2017-01-26.
- [23] Ronan E R, Sudhoff S D, Glover S F, et al. Application of power electronics to the distribution transformer[C]//Proceedings of the Fifteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2000, 2: 861-867.
- [24] Liu Yupeng, Wang Wencheng, Liu Yushan, et al. Control of single-stage AC-AC solid state transformer for power exchange between grids[C]//Proceedings of the 2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Application (ICIEA). Hefei, China: IEEE, 2016: 892-896.
- [25] 李彬彬, 周少泽, 徐殿国. 模块化多电平变换器与级联 H 桥变换器在中高压变频器应用中的对比研究[J]. 电源学报, 2015, 13(6): 9-17, 27.
- Li Binbin, Zhou Shaoze, Xu Dianguo. Comparative study about application of modular multilevel converter and cascaded H-bridge in medium-high voltage converter[J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(6): 9-17, 27(in Chinese).
- [26] 韩继业, 李勇, 曹一家, 等. 一种新型的模块化多电平型固态变压器及其内模控制策略[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(5): 518-526.
- Han Jiye, Li Yong, Cao Yijia, et al. A new modular multilevel type solid state transformer with internal model control method[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2016, 46(5): 518-526(in Chinese).
- [27] 李建国, 赵彪, 宋强, 等. 适用于中压直流配网的多电平直流链固态变压器[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3717-3725.
- Li Jianguo, Zhao Biao, Song Qiang, et al. DC solid state transformer based on multilevel DC link for medium-voltage DC distribution application[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3717-3725(in Chinese).
- [28] 王丹, 毛承雄, 陆继明. 自平衡电子电力变压器[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(6): 77-83.
- Wang Dan, Mao Chengxiong, Lu Jiming. Auto-balancing electronic power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(6): 77-83(in Chinese).
- [29] 葛俊杰, 赵争鸣. 级联型电压自平衡固态变压器[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2013, 53(4): 459-464.
- Ge Junjie, Zhao Zhengming. Cascaded voltage self-balancing solid state transformer[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2013, 53(4): 459-464(in Chinese).
- [30] Wang Gangyao, She Xu, Wang Fei, et al. Comparisons of different control strategies for 20kVA solid state transformer[C]//Proceedings of 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Phoenix, USA: IEEE, 2011: 3173-3178.
- [31] Yuan Liqiang, Weng Xing, Ye Xiuxi, et al. Scenario simulated experimental platform of AC-DC hybrid multi-port energy router for power distribution

- networks[C]//Proceedings of the 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Chiba, Japan: IEEE, 2016: 1-6.
- [32] 李子欣, 王平, 楚遵方, 等. 面向中高压智能配电网的电力电子变压器研究[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2592-2601.
- Li Zixin, Wang Ping, Chu Zunfang, et al. Research on medium-and high-voltage smart distribution grid oriented power electronic transformer[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2592-2601(in Chinese).
- [33] Kolar J W, Ortiz G. Solid-state-transformers: key components of future traction and smart grid systems [C]//Proceedings of IEEE International Power Electronics Conference. Hiroshima, Japan: IEEE, 2014: 22-35.
- [34] Yu Xunwei, Wang Fei, Huang A Q. Power management strategy for plug and play DC microgrid[C]//Proceedings of the 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe). Berlin, Germany: IEEE, 2012: 1-7.
- [35] Tan Kai, Song Xiaoqing, Peng Chang, et al. Hierarchical protection architecture for 380V DC data center application[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Milwaukee, USA: IEEE, 2016: 1-8.
- [36] 艾芊, 刘思源, 吴任博, 等. 能源互联网中多代理系统研究现状与前景分析[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2697-2706.
- Ai Qian, Liu Siyuan, Wu Renbo, et al. Research and prospect of multi-agent system in energy internet system [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2697-2706(in Chinese).
- [37] 葛俊杰. 基于能量平衡的固态变压器控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- Ge Junjie. Research on the control of solid state transformer based on energy balance[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015(in Chinese).
- [38] Feng Gaohui, Zhao Zhengming, Yuan Liqiang, et al. Combined DC Voltage control scheme for three-port energy router based on instantaneous energy balance [C]//Proceedings of 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Milwaukee, USA: IEEE, 2016: 1-7.
- [39] 宗升, 何湘宁, 吴建德, 等. 基于电力电子变换的电能路由器研究现状与发展[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4559-4570.
- Zong Sheng, He Xiangning, Wu Jiande, et al. Overview of power electronics based electrical energy router[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4559-4570(in Chinese).
- [40] 张涛, 张福兴, 张彦. 面向能源互联网的能量管理系统研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 146-155.
- Zhang Tao, Zhang Fuxing, Zhang Yan. Study on energy management system of energy internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 146-155(in Chinese).
- [41] Hambridge S, Huang A Q, Yu Ruiyang. Solid state transformer (SST) as an energy router: economic dispatch based energy routing strategy[C]//Proceedings of 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Montreal, Quebec, Canada: IEEE, 2015: 2355-2360.



赵争鸣

收稿日期: 2017-01-26。

作者简介:

赵争鸣(1959), 男, 博士, 教授, 从事大容量电力电子技术和光伏并网发电应用的相关研究;

冯高辉(1980), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为高压大容量电力电子变换器技术, 本文通讯作者, fgh1980fgh@163.com;

袁立强(1976), 男, 博士, 副研究员, 从事大容量电力电子技术、新能源发电、功率半导体器件的相关研究;

张春朋(1974), 男, 博士, 副教授, 从事柔性交直流输电、可再生能源和电能质量的相关研究。

(责任编辑 吕鲜艳)