

智能配电变压器发展趋势分析

梁得亮^{1, 2, 3}, 柳轶彬^{1, 2, 3}, 寇鹏^{1, 2, 3}, 蔡生亮^{1, 2, 3}, 周堃^{1, 2, 3}, 张明康^{1, 2, 3}

(1. 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安交通大学, 陕西省西安市 710049;

2. 陕西省智能电网重点实验室, 西安交通大学, 陕西省西安市 710049;

3. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710049)

摘要: 智能配电变压器是智能电网快速发展背景下构建新一代配电网的关键部件。结合新能源分布式电源、交直流混联配电网的发展趋势,文中分析了智能配电变压器的主要功能,指出实现智能配电变压器的关键在于利用电力电子技术使配电变压器具备丰富的控制功能。在此基础上,分析指出电力电子变压器(PET)与混合式配电变压器(HDT)是智能配电变压器的两类可选方案。对PET与HDT的工作原理进行说明,列出基于PET, HDT及扩展型HDT的智能配电变压器的几种典型应用电路,并对其特点进行定性分析。基于一种具体的配电网应用场景,从工作原理、可靠性、经济性、可控性等方面对基于PET与HDT的智能配电变压器进行对比,并定性给出当变换功率比重增大时二者各项性能的变化规律。最后分析了智能配电变压器未来的发展趋势。

关键词: 智能电网; 智能配电变压器; 电力电子变压器; 混合式配电变压器

0 引言

近年来,能源危机、环境污染等问题日益突出^[1-3],构建能源互联网,实现各种形式能源的跨区域高效协调利用与综合调控成为人们关注的热点问题^[4-8]。能源互联网是在目前可再生能源发展背景下,以电力能源为基础,多种集中式与分布式能源并存、用户广泛参与的新型能源系统^[9-14]。

能源互联网的主体仍将是智能电网,而配电网是智能电网的关键组成部分,可看作能源互联网中的“能源局域网”^[6]。随着各类分布式电源和直流负荷在配电网中的渗透率不断提高,传统配电网在可靠性、适用性、可控性等方面均面临着巨大的挑战,其智能化程度亟需进一步提高。一方面,由于供电电源及负荷的种类发生变化,配电网中普遍存在的各类电能质量问题的表现形式也会发生不同程度的变化,从而给配电网电能质量的治理带来新的困难。另一方面,大量直流设备会接入配电网,未来配电网将成为复杂的交直流混联网络^[15-16],从而需要对各支路传输功率的优化控制等问题进行深入研究。此外,传统配电网中用于调控节点电压及线路

潮流的手段主要是联络开关、变压器分接头等非智能手段,难以实现“源-网-荷-储”的实时协调优化运行。

电能路由器是实现能源互联网的核心部件,广大学者对其进行了深入研究^[17-23],其显著特征在于能够实现集中式主网供电与多种分布式电能供电的协调互补,通常需包含多种类型的电气接口,具备多输入、多输出的电网互联能力。

智能配电变压器可看作电能路由器在配电网中的典型应用。为实现能源互联网发展背景下配电网的智能化升级改造,基于电能路由器的思想与概念构建新一代智能配电变压器往往更为方便。与电能路由器类比,智能配电变压器也应具有多个电气接口,各线路的电能够协调分配、多向流动,同时也具备无功补偿、谐波治理、电压调节、潮流控制等多种控制功能。

传统配电变压器虽然结构简单、效率高、运行可靠、经济性好,在长期的运行实践中显现出了巨大的优势^[24-26];但其可控性差,功能单一,难以满足智能配电变压器的相关需求。

近二三十年来,电力电子技术的进步有力地推动了智能电网的建设进程^[27-28],从而为智能配电变压器的实现奠定了良好的基础。构建智能配电变压器的关键在于利用电力电子技术灵活的电能变换能力,实现一种功能丰富的新型配电变压器。在此背

收稿日期: 2019-05-07; 修回日期: 2019-07-08。

上网日期: 2019-11-04。

陕西省2018年重点研发计划资助项目(2018ZDCXL-GY-07-05); 国家电网公司科技项目(SGSNKY00KJJS1900039)。

景下,电力电子变压器(power electronic transformer, PET)或称固态变压器(solid state transformer, SST)这种具备丰富控制功能的电能变换装备受到了国内外学者的广泛关注^[29-35]。PET是一种含有多级变换器单元并通过高频变压器实现磁耦合的新型变压器,其优点在于,高频化能大大减小变压器的铁芯与绕组的体积,从而可以降低电磁装备的制造成本^[36-40]。此外,各节点电压及支路电流可借助PET中的变流器单元进行实时控制,而且各变流器的直流母线十分便于接入各种形式的新能源。因此,诸多学者期望PET能够在未来配电网中获得广泛应用^[41-45],并将其作为智能配电变压器的主电路拓扑。但是PET属于级联结构,其中各级变换器必须承担全部的传输功率,而且接入配电网高压侧的变换器需要承受较高的电网电压,从而导致PET对于功率器件的要求较高,可靠性较低。

鉴于PET以上缺陷,另有部分学者认为在配电网场合,只须对一部分功率采用电力电子变换器进行调控便足以实现智能配电变压器的诸多功能,从而提出了混合式配电变压器(hybrid distribution transformer, HDT)的概念^[46-48]。HDT是对传统配电变压器进行改造,然后将其与配电网中研究较为成熟的各种电能补偿装置,如有源滤波器(active power filter, APF)^[49-52]、动态电压调节器(dynamic voltage restorer, DVR)^[53-55]、统一电能质量调节器(unified power quality conditioner, UPQC)^[56-59]等相结合而实现的一类新型配电变压器。文献^[60-65]分析指出HDT的调控能力虽然略弱于PET,但足以满足配电网的各类控制目标,此外,HDT能同时发挥传统工频变压器高效可靠与电力电子装置高可控性的优点。

本文首先结合配电网的应用场景对智能配电变压器的功能特点进行概括分析。其次,结合适用于配电网的PET电路拓扑对其性能进行分析说明,并对HDT的基本原理及扩展型拓扑进行介绍。然后,综合比较分析PET与HDT各项性能的差异。最后,对智能配电变压器的未来发展趋势进行讨论分析。

1 智能配电变压器的功能需求

随着新能源分布式电源、大容量储能装置、电动汽车等新兴产业的快速崛起,配电网的整体架构将发生很大变化,系统整体将从无源网络转变为有源网络^[66-70]。图1所示为以智能配电变压器为核心的未来配电网整体结构示意图。图中智能控制系统外

围功能包括状态监测和继电保护,控制功能包括电能质量治理和功率优化控制,基本功能包括电压等级变换、电气隔离和电能传输。

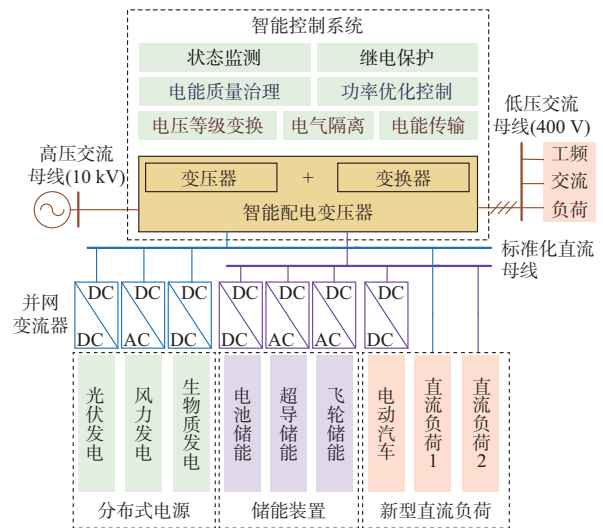


图1 未来配电网结构示意图
Fig. 1 Diagram of future distribution network structure

从图1可以看出,除了传统工频交流负荷之外,分布式电源、储能设备等新型直流装备将接入配电网之中。此时,配电网遭受的扰动类型会明显增加,从而对于各类电能质量问题的治理难度会有所加大,配电系统整体在稳定性、可靠性等方面将面临新的挑战。智能配电变压器基于智能控制系统实现各项控制功能与外围功能,其基本特点说明如下。

1)具备交直流2种类型的电能接口,除了传统的低压交流母线,还需提供若干条标准化的直流母线,以接入各种类型的分布式电源、储能设备、直流负荷,并实现即插即用。理论上讲,在各分布式电源、储能设备、直流负荷的并网变流器之后再配置相应的三相逆变器,然后并入低压交流母线,虽然也能实现并网,但与采用标准化的直流母线进行直流并网相比,交流并网需要增设大量的逆变装置,投资较大并且效率低。因此在智能配电变压器中设置若干条标准化直流母线,实现交直流混合配电具有重要意义。

2)除电压等级变换、电能传输、电气隔离等基本功能外,还应具备丰富的控制功能,总体包括电能质量治理与线路功率的优化控制。实现控制功能的关键在于为智能配电变压器中各变换器设计合理的控制策略。电能质量治理的核心在于解决接入各类分布式电源及新型直流负荷后新的配电网环境下存在的各类电能质量问题,具体的研究内容主要涉及3个方面:控制配电网高压侧电流为单位功率因数

的对称正弦波,即抑制各类负载的电流谐波、无功功率、不对称等有害分量注入配电网高压侧;控制低压交流母线电压为三相对称、幅值稳定的正弦波,即抑制配电网高压侧及骤变负载等带来的电压波动、畸变、不对称等有害分量影响低压交流母线的正常供电;控制各标准化直流母线电压实时稳定。以上3个方面虽然仍属于现有电能质量治理的研究范畴,但各类新的直流设备接入配电网相当于在原系统中增加了一系列新的扰动类型;为改善控制系统的性能,在控制器设计时不得不考虑各类扰动,并进行优化改进,从而需要研究新的控制策略。线路功率的优化控制则是在解决各类电能质量问题的同时,通过进一步控制各变换器单元的输出电压,进而实时调整各供电端口的输出功率,在确保智能配电变压器各供电端口不过载运行的前提下,实现各类电源的协调互补运行。

3)具备完善的状态监测系统,并配备合理的继电保护装置,以确保智能配电变压器能够长期安全稳定运行。状态监测是通过实时检测智能配电变压器各部件在运行时的各物理量(比如变压器及变换器单元的端口电压、电流,变压器绕组、铁芯及功率模块的温度等),然后借助智能控制系统分析设备的运行状态是否正常。显然,状态监测时进行各电压电流的实时检测也是智能配电变压器实现各控制功能的基本保证。总体而言,智能配电变压器状态监测的对象主要是变压器电磁装置与电力电子装置。在实际应用时,状态监测的内容需要根据实际场景进行具体安排,一般涵盖变压器局部放电、绕组变形、局部过热、铁芯噪声、功率模块温升、开关应力、变换器电压电流等。继电保护的配置除了传统变压器的保护内容之外,还需关注电力电子装置的保护。由于电力电子装置承受过电流和过电压的时间远比变压器要短,因此其保护启动需要远快于变压器保护装置。一般来讲,电力电子装置的保护主要涉及开关器件的过流、过热及过压保护。从系统角度来看,要保证整个继电保护系统可靠工作,变压器保护与变换器保护需要在时间尺度上进行协调配合。

智能配电变压器的实现涉及电磁装备设计、电力电子技术、控制理论等多个学科的交叉应用。而智能配电变压器的主电路拓扑则是整个系统的核心所在,其合理性对于配电网系统的整体性能具有决定性的影响。本文主要讨论智能配电变压器主电路拓扑的发展趋势,对于其他方面不做说明。PET和HDT是实现智能配电变压器的2类可选主电路拓

扑方案。二者的显著区别在于,PET立足于电磁高频耦合,其中的电力电子装置需要对传统交流配电网的全部功率进行变换;而HDT基于工频耦合,其电力电子装置只针对部分功率进行变换。

2 基于PET的智能配电变压器

PET由高频变压器与若干个变流器环节级联而成,通过对各变流器环节的合理控制便可使其具备相当丰富的控制功能。经过多年研究,PET衍生出了多种电路拓扑,附录A图A1所示为早期的一种基于直接交流变换的PET电路拓扑^[71]。图A1中PET电路拓扑采用双向开关结构的功率器件构成H桥结构,采用交流斩波控制实现工频到高频的直接变换,从而有效减小变压器的体积。该拓扑无中间直流环节,效率较高;此外,采用移相控制方法能实现功率因数矫正等功能,但功能有限,控制较为复杂。

目前广泛讨论的PET电路拓扑则是如附录A图A2所示的7级拓扑^[17,72-73]。该拓扑包含4个变换器环节①/③/⑤/⑦、2个直流母线环节②/⑥以及高频变压器环节④。虽然其效率低于附录A图A1所示的AC/AC型结构,但其功能很强,调节范围宽。借助直流母线环节②/⑥,能很方便地接入分布式电源,实现交直流混联配电网。基于电压源型变流器的相关控制技术,能有效解决前文提到的各类电能质量问题,显然十分符合智能配电变压器的应用需求。

然而配电网的电压等级为10 kV高压输入,400 V低压输出。受限于目前高压大功率半导体器件的制造水平及成本,在附录A图A2中,对于配电网的10 kV侧,高压整流AC/DC环节①的变换器往往需要多个低压功率模块进行串联以应对较高的电网电压。此外,为应对低压侧较大的电流,在附录A图A2中,环节⑤及环节⑦往往需要多个功率模块进行并联。为此,将PET作为智能配电变压器在实际场景中大规模应用时必须采用特定的多重化电路。本章对基于级联H桥(cascaded H-bridge, CHB)、模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC)、中点钳位(neutral point clamped, NPC)这3种典型PET电路拓扑的智能配电变压器的主电路拓扑进行分析说明。

附录A图A3所示为基于CHB型PET的智能配电变压器主电路拓扑。其中CHB型PET拓扑高度模块化、易于扩展,冗余设计方便,控制策略相对简单,获得了国内外学者的广泛关注^[17-18,29,39,74-76]。

附录A图A3所示的CHB型PET虽然原理简单,但A/B/C三相均需要大量的变流器模块及高频变压器,三相总体需要的变流器及变压器数量较多,从而导致相应的智能配电变压器结构比较复杂,而且该结构也无法提供高压直流母线。

为简化系统结构,环节④所示的多个双绕组高频变压器可用一台多绕组高频变压器替代,即A/B/C三相将共用环节④和⑤。若进一步减少多绕组

高频变压器的次级侧绕组的个数,环节⑤包含的并联功率模块个数也将大大减少(满足电流要求时可只包含一级,从而使附录A图A3中的环节⑤/⑥/⑦与附录A图A2一致)。然而即使采用多绕组变压器,CHB型PET的环节③与环节①仍需三相,而且每相仍需要大量功率模块。为简化系统结构,如图2所示的基于MMC型PET电路拓扑的智能配电变压器受到了普遍关注^[17,29,43,77-80]。

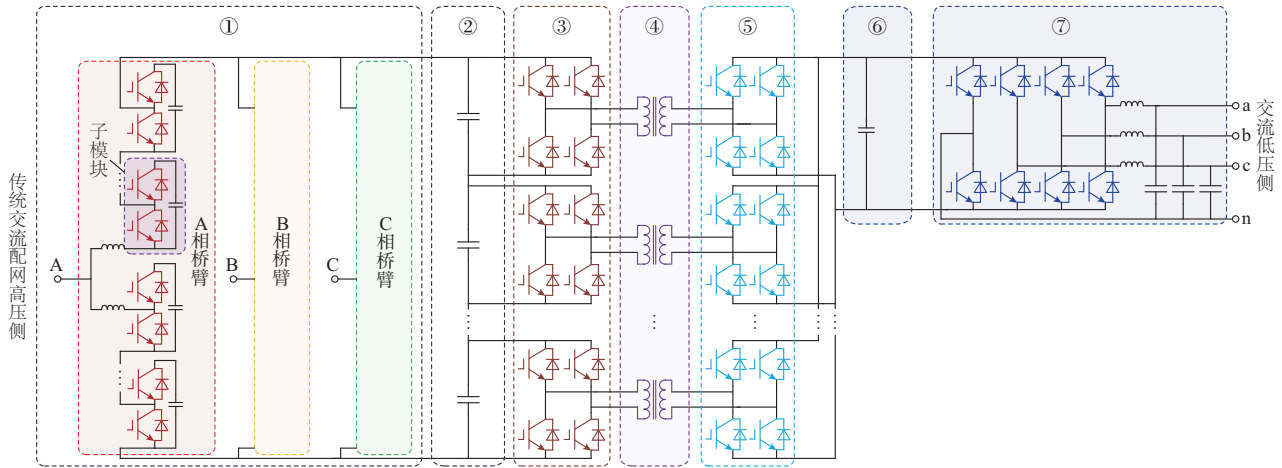


图2 基于MMC型PET的智能配电变压器主电路拓扑
Fig. 2 Topology of main circuit for intelligent distribution transformer based on MMC-PET

与附录A图A3所示的CHB型PET相比,图2所示的MMC型拓扑虽然需要数目较多的支撑电容,但能有效简化高频变压器的整体结构,而且还可以提供高压直流母线。具体来讲,图2所示MMC型拓扑中的环节③连接在三相整流之后的高压直流母线上,被三相共用,其中的高频逆变模块个数少于附录A图A3中的环节③,从而使得MMC型拓扑中环节④所需高频变压器的数目也得以减少,如果改用多绕组变压器,则能减少初级侧绕组的个数。

为进一步简化系统结构,还可基于NPC型PET电路拓扑构建如附录A图A4所示的智能配电变压器^[29,31,81]。相比CHB及MMC型拓扑,NPC型拓扑的环节③只包含一个高压输出端口,从而使环节④无需再布置多台高频变压器,或使用多绕组变压器。NPC型拓扑缺陷在于难以进行模块化扩展,所需钳位二极管数目较大,在电平数较大时,各电容均压控制比较困难。

综合比较采用CHB,MMC,NPC这3种PET电路拓扑实现的智能配电变压器,MMC相对于CHB结构较为简单,而比NPC易于扩展,是综合性能最突出的方案。实际中,由于PET为多个环节的级联装备,各环节的具体配置方式往往不止一种(比

如环节④所示高频变压器可以有多种设计方案);而且以上3种方案的各环节之间还可以相互组合,从而会形成多种新的电路拓扑。因此,在实际中,对于PET型智能配电变压器的具体电路拓扑,往往需要结合给定的应用场景,采用定制化的设计思路进行详细研究。

近年来,配电网负荷的多样化程度日益加剧,分布式电源呈现多元化发展趋势,研究PET的多端口应用拓扑,实现储能、分布式电源、各类交直流负荷与传统交流配电网的集成一体化设计,构建智能化交直流配电网成为当前的热点问题。为此,国内外有诸多学者对PET的多端口拓扑展开研究,并以此来构建智能配电变压器^[37-38,82-84]。附录A图A5所示为现有相关文献中此类多端口变压器在配电网中的典型应用示意图。

附录A图A5的环节①/②/③采用了CHB型PET拓扑,环节④采用多绕组高频变压器,变压器副边绕组接入多个AC/DC单元(环节⑤)后形成彼此独立的多个直流供电端口(环节⑥),在各直流供电端口上并接DC/AC单元(环节⑦)进一步构成多个交流供电端口。附录A图A5中各直流端口可直接为直流负载供电,还可进一步通过DC/DC、DC/

AC变换器接入储能装置以及分布式电源。显然多端口拓扑能更好地适应负荷多样化、储能及分布式电源多元化的发展趋势,更有利于实现配电网功率的优化配置。

总体来讲,基于PET的智能配电变压器普遍包含较多的电力电子模块,系统整体结构比较复杂。

3 基于HDT的智能配电变压器

HDT立足于对传统工频配电变压器的升级改造,通过将各类电能补偿装置(APF,DVR,UPQC等)与传统工频配电变压器相结合,可以同时发挥二者的优势。综合来看,UPQC的功能最全面,将其与配电变压器结合而实现的HDT最适合作为智能配电变压器的主电路拓扑。UPQC的主电路为一背靠背双脉冲宽度调制(PWM)变换器,本文将其简记为AC/DC/AC变换器,其单相拓扑如附录A图A6所示。由附录A图A6中可知,AC/DC/AC变换器包含2个变流器,分别称为 CV_p 与 CV_i ,两者共用一条直流母线。HDT实现各控制功能的关键在于对 CV_p 与 CV_i 的控制。

将附录A图A6所示AC/DC/AC变换器接入变压器便可得到如附录A图A7所示的基于HDT的智能配电变压器单相电路拓扑^[62,64-65]。为便于说明连接关系,在附录A图A6和图A7中,标号相同的端子表示2个接线端彼此相连,例如端子 (p_+, p_-) 表示 CV_p 的输出端口接入主变压器 T_1 的辅助绕组 W_3 ;而端子 (t_+, t_-) 表示 CV_i 的输出端口接入隔离变压器 T_2 的阀侧绕组 W_4 。HDT挂网时, W_1 与 W_5 串联为一体后接入传统交流配电网高压侧, W_2 为低压交流侧的负载供电。显然,与基于PET的智能配电变压器采用全部功率变换有所不同的是,基于HDT的智能配电变压器功率传输的主体仍是主变压器 T_1 ,只有一小部分功率需要通过AC/DC/AC变换器进行调节变换。

为方便说明基于HDT的智能配电变压器实现各种控制功能的基本原理,本文给出如附录A图A8所示等效电路(T_1 和 T_2 均看作理想变压器)。

HDT实现各控制功能的核心在于对 CV_p 及 CV_i 的控制。由附录A图A8可知, CV_p 可以被控制为一电流源,基于三绕组变压器的磁势平衡原理,能实时补偿负载电流中的谐波、无功功率等有害分量,从而使高压侧的电网电流 i_s 能始终保持为正弦单位功率因数。 CV_i 可以被控制为一电压源,能实时抑制来自电网侧的电压波动、畸变等有害分量,从而使负载电压 u_L 始终稳定在额定值附近。另外,如附录

A图A6所示,AC/DC/AC变流器的公共直流母线,还可作为分布式电源、电动汽车等直流设备的接入端口。此时,若对直流母线电压进行稳定控制便使其始终保持在额定值附近,直流母线电压稳定控制的本质在于控制变流器 CV_i 与 CV_p 的有功功率,使直流母线电容的充放电能始终处于动态平衡之中。

由图1可知,未来配电网将呈现交直流配电线路混合并存的局面,智能配电变压器往往需要提供多条电压等级不同的直流母线。为此,在设计主变压器 T_1 时,需要设计多个匝数及容量各不相同的辅助绕组,以此来接入多个额定电压及容量均不相同的AC/DC变流器,这便形成基于扩展型HDT的智能配电变压器,其单相电路拓扑如附录A图A9所示。

附录A图A9中的AC/DC变流器结构与附录A图A6中的 CV_p 型变流器一致,均充当电流源运行。这种通过磁耦合实现交直流线路互联的突出优点在于各供电网络之间电气隔离,能有效防止故障扩散,而且各变流器功率器件的选型十分灵活,通过对各变流器进行控制,能有效实现各线路潮流的协调优化分配。

基于扩展型HDT的智能配电变压器的工作原理与附录A图A6相似,具体仍可按附录A图A8所示等效电路进行说明,只是对于电网电流 i_s 的控制则是基于多绕组变压器的磁势平衡原理,在设计控制策略时,需要考虑各 CV_p 的协调配合。

为实现HDT型智能配电变压器在三相场合的应用,设计合理的三相电路拓扑往往更为实用。图3所示为基于扩展型HDT的三相HDT的变压器电路拓扑,而图4所示为与变压器对应相连的三相变流器单元。

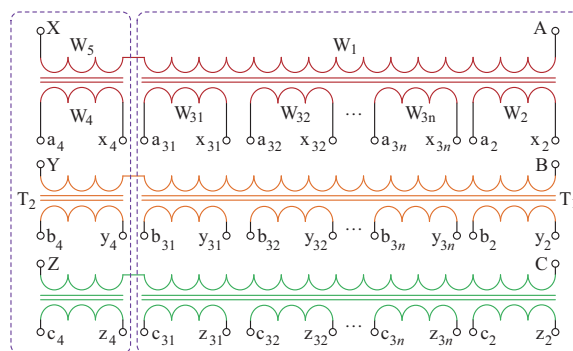


图3 基于扩展型HDT的智能配电变压器三相电路拓扑
Fig. 3 Topology of three-phase circuit of intelligent distribution transformer based on extended HDT

同样,为便于说明整体的连接关系,在图3和图4中,标号相同的端子表示它们彼此相连。在挂网时,图3的一次侧(端口依次为:A/X,B/Y,C/Z)可采用三角形接法接入传统交流配电网的高压侧,二次侧(端口依次为: $a_2/x_2, b_2/y_2, c_2/z_2$)接成星形并将中性点采用三相四线制引出接法为低压交流侧负载供电。阀侧绕组(端口依次为: $a_4/x_4, b_4/y_4, c_4/z_4$)、各辅助绕组(端口依次为: $a_{3k}/x_{3k}, b_{3k}/y_{3k}, c_{3k}/z_{3k}, k=1, 2, \dots, n$)均采用星形中性点引出接法。

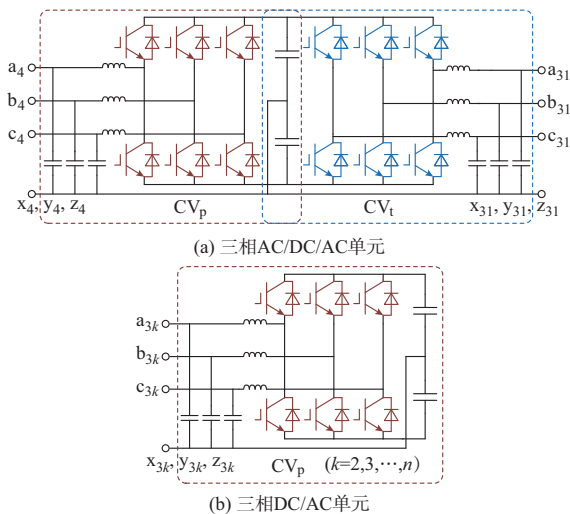


图4 扩展型HDT三相变流器拓扑

Fig. 4 Topologies of three-phase converter for extended HDT

图4中的AC/DC/AC单元及各DC/AC单元均采用三相半桥结构,各电容中点引出后与相应各绕组的中性点相连。

上述方案是基于HDT的智能配电变压器诸多实现方案的典型代表,能有效完成图1所示智能配电变压器的各项基本功能。由于在配电网中,负载供电电压、电网侧电流的主体成分仍是工频正弦波。其中的波动、畸变、无功功率、不对称等有害分量只占其中一部分,对此只需借助变流器将其中的有害分量消除即可,而无须用PET对传统交流配电网的全部功率进行变换。而对于分布式发电等直流设备的功率,HDT与PET一样也需要通过变流器进行变换。由此可见,基于HDT的智能配电变压器布置电力电子装置时具有很强的针对性,对于电力电子装置的利用更为合理。由于变压器及电力电子装置的拓扑有很多种类,而且各单元的接线方式也有多种可能;因此,在设计基于HDT的智能配电变压器时也应遵循定制化的技术路线,需要结合具体应用场合合作具体研究。

4 PET与HDT型智能配电变压器对比分析

综合上述关于PET及HDT型智能配电变压器的典型电路拓扑及原理的相关说明可以看出,仅从控制功能来讲,采用PET与HDT作为智能配电变压器的主电路拓扑均能满足能源互联网未来的发展需求。但在实际配电网应用中,可靠性、经济性及效率等也是设计方案时关注的重点。由于PET采用全功率变换高频隔离,HDT采用部分功率变换工频隔离,二者的本质原理完全不同,从而导致二者在各方面存在明显差异。本章结合一个具体的配电网场景,对基于PET与HDT的智能配电变压器的主电路基本参数进行估算,确定二者功率器件的基本选型,计算各自功率器件的数目,进而对二者的各项性能指标进行对比分析。

为简单分析,先不考虑接入分布式电源等直流设备。已知传统交流配电网高压侧额定线电压为10 kV,低压交流供电母线额定线电压为400 V。假设智能配电变压器容量为80 kVA,二次侧负载中无功功率、谐波、不对称等有害分量的功率不超过总容量的30%,一次侧电网电压波动、畸变、不对称分量不超过额定电压的 $\pm 20\%$ 。于是一次侧电网的最大电流有效值为5.77 A,而二次侧负载最大电流有效值为115.47 A。

基于以上假设,首先确定基于PET的智能配电变压器主电路拓扑中各功率器件的规格,假设PET采用综合性能相对突出的MMC型拓扑。为保证环节①对于网侧电流的可靠控制,环节②高压直流母线的额定电压不得低于网侧线电压的峰值(14.14 kV),而且还须保留充足的裕度;为此,本文设定高压直流母线的额定电压为20 kV。若环节①和③均选用耐压3 300 V的绝缘栅极晶体管(IGBT),并且控制环节①中子模块单元及环节③中高频逆变模块的直流侧电压稳定在2 000 V,即IGBT工作电压为2 000 V;于是环节①每相的上、下桥臂各需要10个子模块,而环节③需要10个高频逆变模块,从而环节①和③所需IGBT数量为160个,而这160个IGBT的额定电流取10 A便可以满足本例要求。为简化系统结构,环节④选用11组绕组高频变压器,初级侧为10个小容量绕组,次级侧为1个大容量绕组。将低压直流母线控制为750 V,则环节⑤和⑦总共需要12个IGBT,其耐压取1 200 V,额定电流取200 A便可以满足要求。在本例中,总容量较小,目前的IGBT单管通流能力足以满足容量的要求,因此,低压侧的环节⑤和⑦无须进行器件的并联。

对于基于HDT的智能配电变压器来讲, CV_i 只须补偿电压波动与畸变等有害分量, CV_p 只须补偿电流谐波与无功功率等负载电流有害分量。假定HDT一次侧采用三角形接法, 为满足电压补偿, 并留一定的裕量, 取 W_5 的绕组额定电压为 2.4 kV, 此时只须隔离变压器 T_2 的变比大于 10 (本例取 W_4 的绕组额定电压为 200 V, 变比为 12), 则足以实现电压波动补偿, 此时 CV_i 最大电流为 40 A。直流母线电压仍控制为 750 V, 假设 CV_i 与 CV_p 的调制度均不超过 0.85。对于 CV_p 来讲, 只需 T_1 中 W_3 的绕组额定电压不超过 300 V (本例取 250 V) 则完全能实现电流的控制功能, CV_p 的额定电流为 32 A。基于以上分析, HDT 总共只需 12 个 IGBT, 其耐压取 1 200 V, 额定电流取 80 A 足以满足要求。

由此可见, 在本例中, 相比基于 PET 的智能配电变压器, 基于 HDT 的智能配电变压器无须采用多电平变换器, 只需 1 个双 PWM 变换器便能够满足本例的要求。而且该变换器仅需 12 个 IGBT, 仅仅等于 PET 低压侧环节⑤和⑦使用的 IGBT 数量, 远低于 PET 中 IGBT 的总数目 (160+12)。此外, 该变换器使用的 IGBT 额定电流还不到环节⑤和⑦的 1/2。简单来讲, 在电力电子功率模块的投资方面, 基于 HDT 的智能配电变压器相比基于 PET 的智能配电变压器几乎可以忽略不计。

上述例子只考虑解决电能质量问题。事实上, 对于分布式电源等直流设备的接入, PET 与 HDT 均需要相应的功率变换器对这一部分功率进行变换, 因此, 在这一部分电力电子模块的投资方面, 二者相差不大。

基于以上例子, 可对二者的差异作进一步概括分析, 具体如下。

1) PET 中的电力电子装置需要对传统交流配电网的全部传输功率进行变换, 其中包含多级电力电子单元, 彼此属于多级级联结构。此外, 网侧整流环节①一般需要采用多电平电路来满足较高的网侧电压。而 HDT 中的电力电子装置只须对必要变换的功率进行变换, 而且凭借隔离变压器的降压作用, 一般无需多电平结构, 因而, 基于 PET 的智能配电变压器中的电力电子装置要比基于 HDT 的智能配电变压器复杂。

2) PET 与 HDT 均须采用变压器来实现电气隔离与电压等级变换。其中, PET 采用高频变压器, HDT 仍采用工频变压器, 变压器高频化能大大减小铜和铁的使用量, 从而使得 PET 电磁本体的体积、重量及成本均远低于 HDT, 但由于高频化会导致铁

芯单位体积的铁耗较大, 因此在电磁本体的效率方面, 二者比较接近。

3) 相比 PET, HDT 继承了传统配电变压器高可靠性的优点。一般来讲, 变压器电磁本体的故障率很低, 其可靠性远高于电力电子装置, 当电力电子装置发生故障时, 可以通过旁路的方法将其切除, 从而使 HDT 切换至传统配电变压器模式运行, 此时虽然会失去电能质量治理、潮流优化控制等多种控制功能, 但电压等级变换、电气隔离及电能传输等基本功能仍然保留, 并不会导致供电中断。然而对于 PET 来讲, 一旦电力电子装置发生故障, 将会直接导致系统供电中断。

4) 虽然二者接入分布式发电等直流设备所使用的变换器复杂性与效率相差不大, 但 HDT 只针对配电网系统中的有害分量采用变换器进行变换, 而 PET 对传统交流配电网全部功率都进行了变换, 因此, 基于 HDT 的智能配电变压器所需电力电子单元的数量及总容量小于基于 PET 的智能配电变压器, 在配电网电能质量越好, 分布式发电等直流设备越少的场景, 这种趋势越明显。由于变压器本体的效率二者相当, 因而, 基于 HDT 的智能配电变压器的整体效率高于基于 PET 的智能配电变压器。

5 变换功率比重对综合性能的影响

电力电子装置的作用在于变换得到所需形式的电能。反之, 当电能形式符合应用场景的需求时, 则无需通过电力电子装置进行变换, 否则电力电子装置本身带来的损耗还会降低系统整体的效率。

PET 中的变换器单元属于全功率变换, 其中用于变换传统交流配电网功率的变换器有 4 级, 而 HDT 属于部分功率变换, 变换器最多只有 2 级。因此在传统交流配电网功率占据主导的场合, 基于 PET 的智能配电变压器中电力电子装置的总成本必然高于基于 HDT 的智能配电变压器。但是由于变压器的高频化能大大降低电磁本体的制造成本、实现电磁本体的小型轻量化, 从而能在一定程度上弥补 PET 变换器成本高, 功率模块总体积大的缺陷。因此, 在实际的配电网场景中, 对于二者的选取要综合考虑配电网中需要进行变换的功率 (简称变换功率) 所占的比重大小。一般而言, 对于未来配电网中的各种直流装置 (分布式电源、储能装置、电动汽车等), 不可避免地需要借助 DC/AC 变流器将其接入配电网, 其对应的功率本文称之为直流变换功率。对于配电网中出现的各类有害电压电流分量也不得不借助变换器将其补偿或矫正, 相应的功率在

本文中称为补偿变换功率。显然,未来配电网中的变换功率就由直流变换功率与补偿变换功率构成。

基于以上说明,对2种极限情况进行分析,进而阐明智能配电变压器的未来发展趋势。

1)智能配电变压器只接入传统交流配电网,配电网中不含分布式电源、储能装置等直流设备。

这种场景符合目前中国大多数配电网的实际情况,此时系统中没有直流变换功率,变换功率仅为补偿变换功率。相应的,基于HDT的智能配电变压器无须采用扩展拓扑,结构十分简单;但基于PET的智能配电变压器仍须采用多电平电路,结构相当复杂。此时,二者在各种方面性能的定性比较如附录A图A10所示。

结合第3章的分析可知,此时,HDT中变换器无须采用多电平电路,往往只需一个双PWM变流器模块即可,结构简单,总容量小,因而其变换器的经济性高于PET。由于PET与HDT变压器本体的效率均很高,因而设备的总效率主要取决于电力电子部分,由于HDT中电力电子装置环节少,结构简单,因此其效率高于PET。此外,由于HDT不仅电力电子装置环节少,结构简单,而且还可借助开关旁路切除掉发生故障的变流器,使其进入普通变压器运行模式,从而不会导致供电中断,因此HDT型智能配电变压器的可靠性高于基于PET的智能配电变压器。在控制功能方面,HDT与PET虽均能满足配电网要求,但PET的调节范围更宽,调节深度不受限制,其可控性明显强于HDT。此外,在变压器本体的经济性方面,PET显然远高于HDT。综合来看,在只接入传统交流配电网的场景下,采用HDT作为智能配电变压器比较合理。

2)智能配电变压器接入孤岛运行模式下的配电网,负荷完全由分布式电源供电。

该场景类似于微电网等小容量应用场景的运行方式,在目前的配电网中很少应用。只是随着材料科学、人工智能等技术的进步,在日后的工业应用中,预计会有众多高性能的新能源通过更高效快捷的方式渗透到配电网之中,并最终代替传统交流配电网。因此,该场景有可能出现在未来的配电网应用中。

此时,系统中所有电源的功率都需要通过变换器进行变换。对于PET来讲,高压整流环节①将不再出现,整个电路拓扑将由高频变压器、连接分布式电源等直流设备的DC/AC变换器、以及为低压交流侧负载供电的变换器(即附录A图A2中的环节⑤/⑥/⑦)构成。因而其结构将大大简化,具体如附

录A图A11所示。

对于采用HDT的智能配电变压器来讲,传统交流配电网高压侧已经完全开路,主变压器 T_1 的一次绕组 W_1 、隔离变压器 T_2 以及变流器 CV_1 可以省去,整个HDT仅由 T_1 和三相DC/AC单元构成,而 T_1 将只包含连接DC/AC单元的辅助绕组 W_{31} 至 W_{3n} 和为低压交流侧负载供电绕组 W_2 ,具体如附录A图A12所示。

结合附录A图A11与图A12可以看出,在配电网孤岛运行模型下,二者电路拓扑的复杂程度已比较接近,虽然二者的差异仍然很大。具体而言,基于HDT的智能配电变压器采用三相多绕组工频变压器,各DC/AC单元均为三相变流器;而基于PET的智能配电变压器采用单相多绕组高频变压器,各DC/AC单元均为单相变流器。此时二者在各种方面性能的定性比较如附录A图A13所示。

虽然附录A图A12中各三相DC/AC单元与附录A图A11中对应的各单相DC/AC单元的容量相同,但由于三相变流器比单相变流器需要更多的IGBT,因此在经济性、效率、可靠性方面,单相单元往往更高一些。从而使基于PET的智能配电变压器在这一部分电力电子装置的投资要比基于HDT的智能配电变压器较低,可靠性及效率要高。但是,附录A图A11所示PET比附录A图A12所示HDT多出了变换器环节⑤/⑥/⑦,由于该环节的容量等于所有电源的传输总功率,几乎为其他DC/AC变换器容量之和,因而整体来看,二者在变换器的经济性、总体的可靠性及效率等方面其实比较接近。此外,二者均是对所有电源功率进行变换,调节范围都很宽,可控性都很强,控制功能十分接近。

需要说明的是,相比附录A图A10中只接入传统交流配电网的情形,在孤岛运行模式下,HDT型智能配电变压器的电力电子装置复杂了许多。因此,其可靠性、效率、及变换器的经济性均会下降,虽然其控制功能会有所提升,但基于PET的智能配电变压器却在可靠性、效率、变换器的经济性等方面均明显提升。

由附录A图A13可以看出,在配电网孤岛运行模式下,基于HDT的智能配电变压器在可靠性好、效率高、变换器结构简单等方面的优势将会被大大弱化;而基于PET的智能配电变压器不仅能充分发挥其节省铜和铁投资方面的巨大优势,而且还能在一定程度上改善其可靠性差、效率低、变换器结构复杂等诸多缺陷。因此,在该情景下,基于PET的智能配电变压器显然比较经济,特别是对于小型轻量

化要求特别突出的城市配电网应用场合。这也正是PET在构建微电网、新能源并网、机车牵引供电、舰船集成供电等变换功率占据全部系统功率的场合将会获得广泛应用的原因所在^[29]。

6 智能配电变压器发展趋势分析

从能源互联网的发展趋势来看,未来配电网将长期保持在传统交流配电网与新能源分布式电源并存的局面,交直流混联配电的模式将长期存在。此时,对基于HDT与PET的智能配电变压器选用需要综合考虑变换功率所占的比重,进一步列出当变换功率比重增大时,二者各项性能的定性变化趋势,如图5所示。

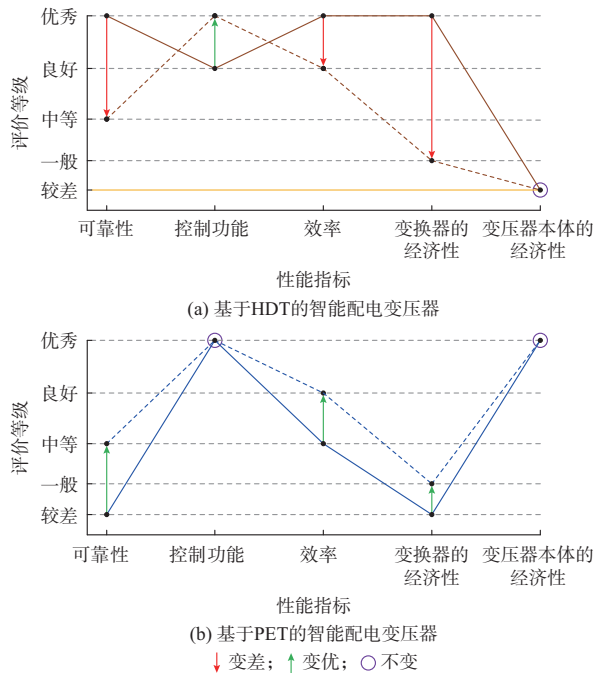


图5 变换功率比重增大时各性能的变化趋势
Fig. 5 Variation trend of each performance when ratio of conversion power increases

图5所示变化趋势与附录A图A10和图A13根据极限假设分析所得结论基本一致,但对PET而言,其中的原因需要作补充说明。对于可靠性来讲,随着变换功率比重变大,高压整流环节①虽然不会像孤岛模式那样被完全省掉,但其分担的功率却会减小。此时,一方面由于分布式电源供电功率比重加大,该环节对于供电可靠性的影响会变小;另一方面,功率器件的工作电流降低,应力变小,故障率也会降低,从而使PET的可靠性变高。对于效率及变换器的经济性来讲,由于高压整流环节①采用多电平电路,因而比接入分布式电源的电力电子单元结构更为复杂、效率更低、成本更高。因此,在总容量

相同的情况下,变换功率比重越大,环节①所占容量的份额将会越小,从而会使基于PET的智能配电变压器的整体效率变高,经济性变好。

由以上分析可知,随着变换功率所占比重的增大,基于HDT的智能配电变压器在各方面的优势将渐渐变弱,从而与基于PET的智能配电变压器比较接近。事实上,由于自然条件的限制,各类新能源分布式电源(光伏、风电等)在近期的配电网中进行大规模推广甚至成为配电网的主体并不现实,传统交流配电网的主导地位一定程度上将长期存在,因此,基于HDT的智能配电变压器更适合作为近期的实现方案。此外,基于PET的智能配电变压器在变换功率比重很高时将会显现出明显优势,而这依赖于未来新能源课题的研究进展。在未来的几十年,假如储能技术获得巨大突破,分布式电源间歇性、波动性大等瓶颈问题得到妥善解决,未来社会对新能源的利用将变得相当简洁高效。届时,智能微电网将大面积出现,PET在配电网中将能够获得大规模应用。因此,基于PET的智能配电变压器更适合作为未来智能配电变压器的实现方案。

7 结语

本文从能源互联网的大背景出发,结合未来配电网的应用需求对智能配电变压器的发展趋势进行分析,得出以下结论。

1)智能配电变压器能彻底改变传统配电变压器可控性差,功能单一的现状,适用于分布式电源接入,交直流混联网络迅速发展的智能配电网。

2)PET与HDT均具备强大的控制功能,能满足智能配电变压器对于高可控性的各项需求,可作为智能配电变压器主电路拓扑的2种实现方案。

3)在具体的配电网应用场景中,变换功率比重是决定选择PET还是HDT的关键因素。变换功率比重越小,HDT的电力电子装置越简单,HDT在降低电力电子成本、保证系统高效可靠等方面的优势相比PET在节省铜和铁成本方面的优势更明显,选用HDT越经济。反之,选用PET比较划算。

4)HDT适合作为变换功率比重较小、传统交流配电网占据主导的近期配电网场合的智能配电变压器实现方案,而PET适合作为变换功率比重较大、分布式电源占据主导的远期配电网场景的智能配电变压器实现方案。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 王玮,李睿,姜久春.面向能源互联网的配电系统规划关键问题研究综述与展望[J].高电压技术,2016,42(7):2028-2036.
WANG Wei, LI Rui, JIANG Jiuchun. Key issues and research prospects of distribution system planning orienting to energy internet [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2028-2036.
- [2] 张国荣,陈夏冉.能源互联网未来发展综述[J].电力自动化设备,2017,37(1):1-7.
ZHANG Guorong, CHEN Xiaran. Future development of energy internet [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 1-7.
- [3] 李立涅,张勇军,陈泽兴,等.智能电网与能源网融合的模式及其发展前景[J].电力系统自动化,2016,40(11):1-9.
LI Licheng, ZHANG Yongjun, CHEN Zexing, et al. Merger between smart grid and energy-net: mode and development prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 1-9.
- [4] 刘振亚.全球能源互联网跨国跨洲互联研究及展望[J].中国电机工程学报,2016,36(19):5103-5110.
LIU Zhenya. Research of global clean energy resource and power grid interconnection [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5103-5110.
- [5] 周孝信,曾嵘,高峰,等.能源互联网的发展现状与展望[J].中国科学(信息科学),2017,47(2):149-170.
ZHOU Xiaoxin, ZENG Rong, GAO Feng, et al. Development status and prospects of the energy Internet [J]. Scientia Sinica (Informationis), 2017, 47(2): 149-170.
- [6] 盛万兴,段青,梁英,等.面向能源互联网的灵活配电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.
- [7] TATCHO P, LI H, JIANG Y, et al. A novel hierarchical section protection based on the solid state transformer for the future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 1096-1104.
- [8] 李存斌,李小鹏,田世明,等.能源互联网电力信息深度融合风险传递:挑战与展望[J].电力系统自动化,2017,41(11):17-25.
LI Cunbin, LI Xiaopeng, TIAN Shiming, et al. Challenges and prospects of risk transmission in deep fusion of electric power and information for Energy Internet [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 17-25.
- [9] 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.
- [10] 姚建国,高志远,杨胜春.能源互联网的认识和展望[J].电力系统自动化,2015,39(23):9-14.
YAO Jianguo, GAO Zhiyuan, YANG Shengchun. Understanding and prospects of Energy Internet [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 9-14.
- [11] SUN Q Y, HAN R K, ZHANG H G, et al. A multiagent-based consensus algorithm for distributed coordinated control of distributed generators in the energy internet [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 3006-3019.
- [12] 段青,盛万兴,孟晓丽,等.面向能源互联网的新型能源子网系统研究[J].中国电机工程学报,2016,36(2):388-398.
DUAN Qing, SHENG Wanxing, MENG Xiaoli, et al. Research of energy sub-grid for the future energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 388-398.
- [13] 薛飞,李刚.能源互联网的网络化能源集成探讨[J].电力系统自动化,2016,40(1):9-16.
XUE Fei, LI Gang. Discussion on networking energy integration for Energy Internet [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 9-16.
- [14] 刘凡,别朝红,刘诗雨,等.能源互联网市场体系设计、交易机制和关键问题[J].电力系统自动化,2018,42(13):114-123.
LIU Fan, BIE Zhaohong, LIU Shiyu, et al. Framework design, transaction mechanism and key issues of Energy Internet market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 114-123.
- [15] 宋强,赵彪,刘文华,等.智能电网中的新一代高频隔离功率转换技术[J].中国电机工程学报,2014,34(36):6369-6379.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. Next-generation high-frequency-isolation power conversion technology for smart grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6369-6379.
- [16] 宋强,赵彪,刘文华,等.智能直流配电网研究综述[J].中国电机工程学报,2013,33(25):9-19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. Overview of research on smart DC distribution power network [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [17] 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 Gaohui, YUAN Liqiang, et al. The development and key technologies of electric energy router [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3823-3834.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 王继业,李洋,路兆铭,等.基于能源交换机和路由器的局域能源互联网研究[J].中国电机工程学报,2016,36(13):3433-3439.
WANG Jiye, LI Yang, LU Zhaoming, et al. Research on local-area energy internet control technology based on energy

- switches and energy routers [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3433-3439.
- [21] 李振,盛万兴,段青,等.基于储能稳压的交直流混合电能路由器协调控制策略[J].电力系统自动化,2019,43(2):121-129.
LI Zhen, SHENG Wanxing, DUAN Qing, et al. Coordinated control strategy of AC/DC hybrid power router based on voltage stabilization by energy storage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 121-129.
- [22] 郭靖,李可军,王景山,等.含能源路由器的交直流网络潮流计算模型及可行解求取[J].电力系统自动化,2018,42(13): 85-93.
GUO Jing, LI Kejun, WANG Jingshan, et al. Power flow calculation model and feasible solution of AC-DC network with energy routers [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 85-93.
- [23] 肖迁,何晋伟,王浩,等.电网故障下的电能路由器直流电容电压平衡控制策略[J].电力系统自动化,2018,42(2):20-25.
XIAO Qian, HE Jinwei, WANG Hao, et al. Voltage balancing control strategy for DC capacitor of electrical energy router under power grid failure [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 20-25.
- [24] 王金丽,李金元,徐腊元.大功率电力电子开关用于配电变压器无弧有载调压方案[J].电力系统自动化,2006,30(15): 97-102.
WANG Jinli, LI Jinyuan, XU Layuan. Scheme of arcless on-load voltage regulation for distribution transformer using high power electronic switch [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 97-102.
- [25] 王金丽,盛万兴,杨红磊,等.非晶合金配电变压器的技术性能分析[J].电网技术,2010,34(10):32-37.
WANG Jinli, SHENG Wanxing, YANG Honglei, et al. Analysis on technical performance of amorphous core distribution transformer [J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 32-37.
- [26] 王金丽,盛万兴,方恒福,等.自适应负荷型配电变压器设计[J].电力系统自动化,2014,38(18):86-92.
WANG Jinli, SHENG Wanxing, FANG Hengfu, et al. Design of a self-adaptive distribution transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 86-92.
- [27] 张文亮,汤广福,查鲲鹏,等.先进电力电子技术在智能电网中的应用[J].中国电机工程学报,2010,30(4):1-7.
ZHANG Wenliang, TANG Guangfu, ZHA Kunpeng, et al. Application of advanced power electronics in smart grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 1-7.
- [28] 徐殿国,张书鑫,李彬彬.电力系统柔性一次设备及其关键技术:应用与展望[J].电力系统自动化,2018,42(7):2-22.
XU Dianguo, ZHANG Shuxin, LI Binbin. Flexible primary equipment in power system and their key technologies: applications and prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 2-22.
- [29] 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.
- [30] ZHAO B, SONG Q, LIU W H. A practical solution of high-frequency-link bidirectional solid-state transformer based on advanced components in hybrid microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(7): 4587-4597.
- [31] LAI J S, MAITRA A, MANSOOR A, et al. Multilevel intelligent universal transformer for medium voltage applications [C]// Fortieth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, October 2-6, 2005, Hong Kong, China.
- [32] 舒良才,陈武,王琛,等.基于混频调制的新型电力电子变压器[J].电力系统自动化,2018,42(7):146-152.
SHU Liangcai, CHEN Wu, WANG Chen, et al. Power electronic transformer based on mixed-frequency modulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 146-152.
- [33] 孙玉巍,付超,李永刚,等.用于电池储能系统的级联式电力电子变压器均衡及协调控制[J].电力系统自动化,2018,42(18): 123-130.
SUN Yuwei, FU Chao, LI Yonggang, et al. Balancing and coordinated control of cascaded power electronic transformers for battery energy storage system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(18): 123-130.
- [34] 马大俊,陈武,薛晨炆,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): 158-172.
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): 158-172.
- [35] 张怀天,荆龙,吴学智,等.电力电子变压器自治运行控制策略[J].电力系统自动化,2018,42(4):89-94.
ZHANG Huaitian, JING Long, WU Xuezhi, et al. Control strategy for autonomous operation of power electronic transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 89-94.
- [36] CHEN H, DIVAN D. Design of a 10 kVA soft-switching solid-state transformer (S4T) [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 5724-5738.
- [37] FALCONES S, AYYANAR R, MAO X L. A DC-DC multiport-converter-based solid-state transformer integrating distributed generation and storage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2192-2203.
- [38] 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.
- [39] SHE X, YU X W, WANG F, et al. Design and demonstration of a 3.6 kV-120 V/10 kVA solid-state transformer for smart grid application [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 3982-3996.
- [40] 刘教民,孙玉巍,李永刚,等.级联式电力电子变压器混合脉宽调制谐波分析及均衡控制[J].电力系统自动化,2017,41(7): 101-107.

- LIU Jiaomin, SUN Yuwei, LI Yonggang, et al. Harmonic analysis and balancing control of cascade PET based on hybrid PWM modulating technique [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 101-107.
- [41] SHAH D G, CROW M L. Stability design criteria for distribution systems with solid-state transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(6): 2588-2595.
- [42] WANG D, TIAN J, MAO C X, et al. A 10 kV/400 V 500 kVA electronic power transformer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(11): 6653-6663.
- [43] ZHAO B, SONG Q, LI J G, et al. High-frequency-link DC transformer based on switched capacitor for medium-voltage DC power distribution application [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 4766-4777.
- [44] KHAN M T A, MILANI A A, CHAKRABORTTY A, et al. Dynamic modeling and feasibility analysis of a solid-state transformer-based power distribution system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(1): 551-562.
- [45] MILANI A A, KHAN M T A, CHAKRABORTTY A, et al. Equilibrium point analysis and power sharing methods for distribution systems driven by solid-state transformers [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1473-1483.
- [46] LAI JIH-SHENG, MANSOOR ARSHAD, MAITRA ARINDAM, et al. Multifunction hybrid intelligent universal transformer: 6954366 [P]. 2005-10-11.
- [47] HAJ-MAHARSI M Y, TANG L, GUTIERREZ R, et al. Hybrid distribution transformer with AC&DC power capabilities: 20100201338A1 [P]. 2010-02-26.
- [48] HAJ-MAHARSI M Y, BALA S, TANG L. Hybrid distribution transformer with an integrated voltage source converter: 20100220499A1 [P]. 2010-02-26.
- [49] ZHANG H, DA SUN C, LI Z X, et al. Voltage vector error fault diagnosis for open-circuit faults of three-phase four-wire active power filters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 2215-2226.
- [50] LOCK A S, DA SILVA E R C, ELBULUK M E, et al. An APF-OCC strategy for common-mode current rejection [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(6): 4935-4945.
- [51] COSTA B L G, BACON V D, DA SILVA S A O, et al. Tuning of a PI-MR controller based on differential evolution metaheuristic applied to the current control loop of a shunt-APF [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4751-4761.
- [52] 张宇,程启明,程尹曼,等.电容中点式三相四线制SAPF混合无源非线性控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(19): 110-119.
- ZHANG Yu, CHENG Qiming, CHENG Yinman, et al. Nonlinear control strategy of three-phase four-wire shunt active power filter with mid-point capacitor based on hybrid passive theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 110-119.
- [53] 陈国栋,张亮,蔡旭.基于基波与谐波正负序提取方法的动态电压恢复器补偿策略[J].电力自动化设备,2012,32(11): 87-91.
- CHEN Guodong, ZHANG Liang, CAI Xu. Compensation strategy based on positive and negative sequence extraction for dynamic voltage restorer [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 87-91.
- [54] SHAHABADINI M, IMAN-EINI H. Improving the performance of a cascaded H-bridge-based interline dynamic voltage restorer [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1160-1167.
- [55] 杨金涛,乐健,杜旭,等.中压区域补偿型动态电压调节器设计[J].电力系统自动化,2015,39(21):120-125.
- YANG Jintao, LE Jian, DU Xu, et al. Design of regional compensation dynamic voltage restorer in medium voltage system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 120-125.
- [56] RAUF A M, SANT A, KHADKIKAR V, et al. A novel ten-switch topology for unified power quality conditioner [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 6937-6946.
- [57] 谭智力,朱冬姣,陈坚.三相四线UPQC直流侧电容电压波动机理及抑制方法[J].电力系统自动化,2010,34(7):61-65.
- TAN Zhili, ZHU Dongjiao, CHEN Jian. DC side capacitor voltage fluctuation reason and inhibition method for three-phase four-wire UPQC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 61-65.
- [58] 贾东强,韦统振,霍群海.UPQC切换运行模式的小信号分析及协调控制策略[J].电力系统自动化,2014,38(13):187-195.
- JIA Dongqiang, WEI Tongzhen, HUO Qunhai. Small-signal analysis and coordinated control strategy of UPQC switching operation mode [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 187-195.
- [59] 龙云波,徐云飞,肖湘宁,等.采用模块化多电平换流器的统一电能质量控制器预充电控制[J].电力系统自动化,2015, 39(7):182-187.
- LONG Yunbo, XU Yunfei, XIAO Xiangning, et al. Pre-charging control for unified power quality conditioner based on modular multilevel converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 182-187.
- [60] BALA S, DAS D, AELOIZA E, et al. Hybrid distribution transformer: concept development and field demonstration [C]// 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 15-20, 2012, Raleigh, USA.
- [61] SASTRY J, BALA S. Considerations for the design of power electronic modules for hybrid distribution transformers [C]// 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 15-19, 2013, Denver, USA.
- [62] RADI M A, DARWISH M. Var control considerations for the design of hybrid distribution transformers [C]// 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, 2015, Birmingham, UK.
- [63] RADI M A, DARWISH M, ALQARNI M. Voltage regulation considerations for the design of hybrid distribution

- transformers[C]// 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), September 2-5, 2014, Cluj-Napoca, Romania.
- [64] BURKARD J, BIELA J. Evaluation of topologies and optimal design of a hybrid distribution transformer [C]// 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), September 8-10, 2015, Geneva, Switzerland.
- [65] BURKARD J, BIELA J. Protection of hybrid transformers in the distribution grid[C]// 2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), September 5-9, 2016, Karlsruhe, Germany.
- [66] 郭慧,汪飞,张笠君,等.基于能量路由器的智能型分布式能源网络技术[J].中国电机工程学报,2016,36(12):3314-3324.
GUO Hui, WANG Fei, ZHANG Lijun, et al. Technologies of energy router-based smart distributed energy network [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3314-3324.
- [67] 赵彪,赵宇明,王一振,等.基于柔性中压直流配电网的能源互联网系统[J].中国电机工程学报,2015,35(19):4843-4851.
ZHAO Biao, ZHAO Yuming, WANG Yizhen, et al. Energy internet based on flexible medium-voltage DC distribution [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4843-4851.
- [68] YI P, ZHU T, JIANG B, et al. Deploying energy routers in an energy internet based on electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6): 4714-4725.
- [69] 涂春鸣,孟阳,肖凡,等.一种交直流混合微网能量路由器及其运行模态分析[J].电工技术学报,2017,32(22):176-188.
TU Chunming, MENG Yang, XIAO Fan, et al. An AC-DC hybrid microgrid energy router and operational modal analysis [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 176-188.
- [70] GAO M, WANG K, HE L. Probabilistic model checking and scheduling implementation of an energy router system in energy internet for green cities [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(4): 1501-1510.
- [71] KANG M, ENJETI P N, PITEL I J. Analysis and design of electronic transformers for electric power distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999, 14(6): 1133-1141.
- [72] RICHARD F. Solid state transformer: 5943229 [P]. 1999-08-24.
- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] ISLAM M R, GUO Y G, ZHU J G. A high-frequency link multilevel cascaded medium-voltage converter for direct grid integration of renewable energy systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 4167-4182.
- [76] WANG X Y, LIU J J, OUYANG S D, et al. Control and experiment of an H-bridge-based three-phase three-stage modular power electronic transformer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(3): 2002-2011.
- [77] ZHAO B, SONG Q, LI J G, et al. A modular multilevel DC-link front-to-front DC solid-state transformer based on high-frequency dual active phase shift for HVDC grid integration [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(11): 8919-8927.
- [78] SHAO S, JIANG M M, ZHANG J M, et al. A capacitor voltage balancing method for a modular multilevel DC transformer for DC distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(4): 3002-3011.
- [79] ZHAO B, SONG Q, LI J G, et al. Comparative analysis of multilevel-high-frequency-link and multilevel-DC-link DC-DC transformers based on MMC and dual-active bridge for MVDC application [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2035-2049.
- [80] 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.
- [81] MADHUSOODHANAN S, TRIPATHI A, PATEL D, et al. Solid-state transformer and MV grid tie applications enabled by 15 kV SiC IGBTs and 10 kV SiC MOSFETs based multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(4): 3343-3360.
- [82] GU C Y, ZHENG Z D, XU L, et al. Modeling and control of a multiport power electronic transformer (PET) for electric traction applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 915-927.
- [83] VASILADIOTIS M, RUFER A. A modular multiport power electronic transformer with integrated split battery energy storage for versatile ultrafast EV charging stations [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 3213-3222.
- [84] GU C, ZHENGZ, LIY. Control strategies of a multiport power electronic transformer (PET) for DC distribution applications [C]// Electric Ship Technologies Symposium, June 21-24, 2015, Alexandria, USA.

梁得亮(1967—),男,通信作者,教授,主要研究方向:智能配电网系统协同设计及冗余高效控制。E-mail: dlliang@mail.xjtu.edu.cn

柳轶彬(1989—),男,博士研究生,主要研究方向:混合式配电变压器磁集成与优化控制。E-mail: yanerwuming@126.com

寇鹏(1983—),男,博士,副教授,主要研究方向:新能源发电与智能微电网的预测控制。E-mail: koupeng@mail.xjtu.edu.cn

(编辑 鲁尔姣)

Analysis of Development Trend for Intelligent Distribution Transformer

LIANG Deliang^{1,2,3}, LIU Yibin^{1,2,3}, KOU Peng^{1,2,3}, CAI Shengliang^{1,2,3}, ZHOU Kun^{1,2,3}, ZHANG Mingkang^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Intelligent distribution transformer is a key device to construct the new generation of intelligent distribution network with the rapid development of smart grid. This paper analyzes the main functions of the intelligent distribution transformer combining the development trend of the distributed generation of renewable power and AC/DC hybrid distribution power system, and states that the key of realizing the intelligent distribution transformer is the high controllability, which can be achieved by utilizing the power electronic devices. Based on this, the analysis shows that the power electronic transformer (PET) and hybrid distribution transformer (HDT) are two alternative circuit schemes for the intelligent distribution transformer. The basic working principle of PET and HDT are introduced, and the several typical topologies of the intelligent distribution transformer based on PET, HDT and the extended HDT are presented and their characteristics are analyzed. Based on a specific application scenario in the distribution network, the working principle, reliability, economy, controllability of the intelligent distribution transformer based on PET and HDT are compared, and the variation trend of each performance is presented when the ratio of the conversion power increases. Finally, the future development trend of the intelligent distribution transformer are analyzed.

This work is supported by Key R&D Project of Shaanxi Province in 2018 (No. 2018ZDCXL-GY-07-05) and State Grid Corporation of China (No. SGSNKY00KJJS1900039).

Key words: smart grid; intelligent distribution transformer; power electronic transformer (PET); hybrid distribution transformer (HDT)

