混合变压器技术研究综述

杨 斌^{1,2},赵剑锋²,季振东³,王建华²,刘康礼² (1. 国网南京供电公司,江苏南京 210019;2. 东南大学 电气工程学院,江苏南京 210096; 3. 南京理工大学 自动化学院,江苏南京 210094)

摘要:为了满足智能电网的发展对电力设备提出的更高的需求,基于传统变压器和电力电子设备的混合变压器(HT)得到了越来越多的关注。基于目前已有研究,在分析HT研究进程的基础上,对HT的相关关键技术进行了梳理和分析,尤其是对HT的拓扑,调制、控制及保护策略,多绕组变压器设计,整体硬件设计等问题进行了归纳和讨论。最后对HT的研究趋势及亟待解决问题进行了总结和展望。

关键词:混合变压器;无功补偿;电压调节;分布式接入;故障保护;综述

中图分类号:TM 41

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202001034

0 引言

电力变压器是电力系统中最重要的电气设备之 一^[1-4],在电力系统中兼具不同电压等级电网的互联 以及功率交换的功能,其安全稳定的运行直接关系 到电力系统的安全与稳定。但是智能电网的发展, 以及各种新能源的接入和越来越多敏感负荷的出 现,对电力变压器等设备提出了新的挑战。传统的 变压器虽然具有廉价、高可靠性、高效率等优点,但 是过于单一的功能使得其不能完全满足这些新时代 的需求。

电力电子变压器 PET (Power Electronic Transformer)是近年来随着大功率电力电子技术的发展而 逐渐发展起来的新型电力变压器。除了具备常规电 力变压器所具有的电压变换、电气隔离以及能量传 递等基本功能,还具有提高电能质量、无功补偿以及 潮流控制等功能^[58]。但是现阶段的电力电子器件 的水平以及 PET 本身的结构和控制方法的复杂性, 使得 PET 在推广应用上受到了一定的限制^[9]。适用 于配电网的大容量 PET 的研发和推广应用存在较大 的困难。针对上述情况,一种集合了传统变压器和 PET 的混合变压器 HT(Hybrid Transformer)得到了 越来越多的关注^[10-13]。国内外研究团队对其已开展 了一定程度的研究。

美国德克萨斯A&M大学E.C. Aeloiza教授于 2003年在文献[14]中提出了下一代配电变压器NG-DT(Next Generation Distribution Transformer)的概 念。文章所提出的NGDT的副边由2个绕组组成,在

收稿日期:2019-03-13;修回日期:2019-12-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877042);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2242019R20010)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877042) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2242019R20010) 其中1个绕组中配置1个AC/AC变换器。通过对 AC / AC 变换器进行合理的控制,该NGDT能够实现 如下功能:①能够补偿由原边电压变化导致的负载 电压跌落或骤升,从而使变压器具有对瞬间扰动的 穿越能力:②能够减少输出电压谐波:③能够迅速切 断负载,从而具备故障保护功能。该NGDT结合了 传统变压器以及电力电子器件的优点,使得其能够 适应智能电网的发展,满足配电网对电力接入设备 的各方面需求。E. C. Aeloiza教授及其团队为相关 研究带来了一种新的思路。传统变压器作为配电网 功率传输和电压转换的不可或缺的装置,其单一的 功能已经不能满足新一代电网和用电负荷的需求。 而近年来提出的PET虽然能够解决以上电网在发展 中遇到的问题和困难,但是受限于目前电力电子技 术水平以及相关器件的制造工艺,PET在体积、功 率、造价以及效率上距离其设计标准仍有一定的差 距。通过传统变压器和电力电子相结合的方式能够 综合2种设备的优点,规避各自单独应用时存在的 问题,为配电网电能转换以及治理问题提供替代 思路。

相比于传统变压器,HT适用范围更为广泛。首 先其可作为传统变压器的替代装置应用于传统配电 网中;其次,得益于电能质量治理的功能,它能够在 无需添加其他治理装置的前提下直接给敏感负荷供 电;最后,HT的多端口可以介入交直流电源,实现能 量路由器的功能^[15]。基于E.C.Aeloiza教授及其团 队的工作,目前国内外有部分团队开始对HT展开研 究。国内外关于HT的相关研究可以按照拓扑、控制 方法以及硬件设计等方向概述。文献[16]提出了一 种基于矩阵变换器的HT,该结构使用一种矩阵变换 器取代文献[13]中HT的AC/AC变换器,并详细分 析了该拓扑的控制和调制方法。文献[17-19]提出 了一种基于AC/DC/AC变换器的混合NGDT,分析 了该HT对电压补偿和功率因数校正的性能,并展示 了实验用HT样机的相关图片。文献[20-21]对比了 混合NGDT的不同类型和功能,并设计了混合NGDT 的试验样机,对比分析了不同变压器的损耗、体积、 造价等。目前国外关于HT的研究以及硬件研制仍 处于实验室样机阶段。国内对HT开展研究的有东 南大学、贵州电网公司电力科学研究院等团队。主 要集中于HT的拓扑优化^[22-24]研究:通过不同的拓扑 可以实现诸如分相补偿、综合电能质量治理以及多 源接入等功能;对HT的硬件设计以及样机研制等方 向的相关文献^[25-27]进行研究,提出一种原副边并联 的HT结构,该拓扑能够完全旁路变压器,从而节约 运行成本;提出一种适用于10kV配电网的HT,原边 变流器为级联结构,提升了电压等级,同时还分析了 相应拓扑的控制策略。

本文围绕HT的相关研究进行了归纳和总结:介 绍了HT的可行拓扑,分析及对比了各类拓扑的优 劣,并提出了一种多功能HT;分析了目前HT的相关 控制技术,提出了HT前后级协调控制方法;归纳了 HT的可行应用、保护及相关硬件设计;最后总结了 HT的研究及发展现状。

1 HT潜在应用场合

206

1.1 应用于传统配电网

作为NGDT和电力电子器件的结合设备,电压 转换和功率传输是HT最主要的特性,因此中低压配 电网是HT的主要应用场合之一。在传统配电网中, 电力变压器承担着不可或缺的角色,HT可以作为其 改良设备应用在电力系统中。

除了可以接入敏感负荷,相较于传统变压器, HT还增加了电力电子设备以及通信装置,能够对变 压器的运行状态及电网各参数进行实时监测,并且 能够将这些监测数据传递至终端,从而实现对HT的 实时控制,在为电网的可靠运行带来更多保障的同 时提高电网运检效率。

无论是何种通信方式,HT都能够将其自身运行 状态及其所带负荷相应的运行状态包括电压、电流、 负荷功率、电流谐波、有功、无功情况甚至是否发生 短路故障等问题传输至上位机。从而方便运检人员 对不同的情况进行处理。同时,HT装置的实时联网 符合能源互联网和泛在物联网的设计理念以及电网 发展趋势。

1.2 应用于交直流混联微网

HT在被提出之初,其结构的变化仅仅是在变压器绕组中加入了AC/AC变流器,从而使其具备输出电压可调节的功能。但是为了丰富HT功能,拓展其应用场合,可以在HT的电力电子变流器上展开研究,尝试更多的可能性。图1为HT一种可行的应用方式。





图 1 HT 在交直流混联微网中的应用 Fig.1 Application of HT in AC / DC hybrid microgrid

需要指出的是,为了实现交直流混联微网接入的功能,HT需要具备交直流接入能力。所以,需要在HT中加入并网装置,而HT中的工频绕组则正好为并网装置提供双向电能支撑及隔离,这一点是其他一些电力设备所不具备的。因此,HT自身作为电网的中转装置同样适合其他形式电网的接入。

在此基础上,针对其并网装置的功能细化,可以 使HT具备分布式电源接入和并离网切换的功能,满 足现在智能电网发展的趋势,以及电力系统对大规 模分布式能源接入的需求。

1.3 应用于电能质量治理

为了提高电网运行效率,保障用电单位的正常 用电,电力系统对电能质量提出了更高的要求,所以 越来越多的电能质量治理装置得到了研究和应用, HT由此应运而生。在已有研究的基础上,本文对HT 的相关功能进行了拓展,通过改善HT中AC/AC变 流器拓扑,可以让其具备更多的电能质量治理功能。 1.3.1 电流补偿

广义的电流补偿包括无功补偿与谐波补偿,在 电网中为了实现此功能通常需要配置有源滤波器 APF(Active Power Filter)或者静止无功发生器SVG (Static Var Generation)等装置。通过对治理装置并 联在电网中的变流器进行输出电流的控制,从而抵 消负载谐波或为电网提供无功支撑,实现电流补偿 的目的。在HT中,可以将AC/AC变流器替换成 AC/DC/AC变流器,从而使其具有独立的直流支 撑环节,即可在并联侧实现与APF或者SVG相同的 功能。

图 2 为 HT 电流补偿流程图,通过对负载电流及 电网电压等物理量的采集,计算后将所需要补偿的 电流信号传输至 HT 的补偿单元的电流环控制器,从 而实现电流补偿的功能。



Fig.2 Application of HT in control of power quality

1.3.2 电压补偿

电压补偿是HT最初设计就具备的功能。而专 门用于电压补偿的装置是动态电压恢复器DVR (Dynamic Voltage Regulator),通过串联的方式与电 网和负载连接,通过对其输出电压的调节实现负载 电压的可控性。

1.3.3 潮流控制

由于混合型PET优化后的拓扑为AC/DC/AC 结构,存在串并联变换器,其在结构上与统一潮流控 制器 UPFC(United Power Flow Controller)类似,能 够满足 UPFC 对于潮流的控制。值得关注的是,通 常 UPFC 均应用于高压场合,最近也有关于配电网 潮流控制的相关研究,但是大多应用于大功率场合。 为了提高HT潮流控制的功率等级,除了提升内部多 绕组变压器的额定功率,还需要对变流器进行优化, 通常可以通过级联或者并联的方式增加其输出电压 或者电流,从而能够应用于大功率场合。

1.3.4 故障保护

引言中在介绍传统变压器现状时提到了变压器 由于负载短路故障造成烧毁的情况,这会造成很大 的人力物力损失。而HT由于串联变换器的存在,需 要在电网和负载之间接入电力电子及滤波设备,所 以可以以此为出发点,探讨HT对于故障的保护 能力。

通常电压治理装置例如DVR的串联变换器与 电网连接的方式是串联变压器,通过串联变压器将 DVR输出串联至电网中,从而实现电压恢复的功 能。此方案同样可以应用于HT中,但是由于本文所 研究的HT本身具备多绕组变压器,并联侧已经有隔 离,因此基于体积和成本的考虑,通常采用直接耦合 的方式通过滤波器与电网串联。

2 HT 拓扑

得益于HT的功能以及特性,其一般可应用于传 统电网、分布式发电系统以及微电网等场合,达到电 能转换、电气隔离、电能质量调节及多源接入的目 的。根据应用场合的不同,其电压等级和功率大小 也有所不同。因此HT的拓扑可根据应用场合以及 不同的功能需求进行改变和定制,很难进行标准化 设计。

207

由于HT主要的结构为工频变压器和电力电子 器件构成的变流器,根据两者的结合方式可以将HT 的拓扑分成原边、副边以及原副边HT这3类,具体 结构如附录中图A1所示。

图 A1(a)所示为原边 HT,该类变压器的拓扑在 传统工频变压器的一次侧绕组中加入了变流器,二 次侧只有一组绕组用于连接负载。通过对变流器的 控制对其输入、输出侧电压进行调节,从而实现输出 电压灵活可控的目的。

图 A1(b)所示为副边 HT,一次侧一组绕组作为 输入端口连接电网,二次侧存在多组绕组,每一绕组 的输出通过串联或者并联的方式作为 HT 的最终输 出。同样通过对变流器的控制实现输出可控,完成 电压调节、电流补偿等效果。

图 A1(c)所示变流器以串并联的方式连接在变 压器的原副边,此时变压器负责功率传输,而变流器 兼顾功率传输和电压调节,两者可以完成互补和 替代。

从宏观上讨论HT的拓扑时,一般可以按照以上 几个方向划分。为了在一些应用场合满足如交直流 接口、故障限流等功能时,在这些拓扑的基础上进行 一定程度的优化,通过增改某一些单元实现上述功 能,但HT拓扑大致可以按照以上3类划分。由于这 几种拓扑的区别主要集中于变流器和多绕组变压器 物理结构上,因此本文仅需要对图A1(b)中的副边 HT展开具体分析。

近年来,瑞士苏黎世联邦理工的J. Biela教授和 他的科研团队同样对混合NGDT开展了研究工作。 为了丰富混合NGDT的功能,研究团队对电力电子 变换器的结构和连接方式做了具体的分析,附录中 图A2以6类拓扑结构概括了副边HT的可行拓扑。

首先,根据电力电子变流器和变压器的连接方 式可以分为磁耦合式及直接耦合式。在磁耦合的连 接方式中,变流器可以通过多绕组变压器的附加绕 组与变压器连接或者通过额外的串联变压器将变流 器的输出端口串联进主回路。而在直接耦合的连接 方式中,变流器直接与二次侧绕组以并联或者串联 的方式连接。对于每种连接方式,又可以根据变流 器与供电回路的连接方式分成并联、串联和串并联 3种。其中并联和串联连接方式如图 A2(a)—(d)所 示,变流器为一个 AC / DC 变换器。串并联连接方 式如图 A2 中的(e)、(f)所示,变流器由单一的 AC / DC 变换器改成 AC / DC 和 DC / AC 的背靠背变换器 以及带有 DC / DC 隔离的背靠背变换器。

由附录中图A1、A2可知,混合NGDT的不同功

能实现主要取决于变流器的自身结构及其与变压器的连接方式。图中并联型HT除了具备自身的电压转换功能之外,还具有对输入侧电网的功率因数矫正和无功补偿以及滤波的功能;串联型HT主要用于对输出侧电网的电压调节,可以使负载电压在相位、幅值以及频率上保持恒定;串并联型HT中的变流器为背靠背变换器,它使得此类型的HT同时具有前两者的功能,既能够调节输入侧电网的电流,又能对输出侧的电压进行调节,实现对电能质量的综合治理。

208

波兰绿山大学Z. Fedyczak团队优化了E.C. Aeloiza教授的研究,其在文献[16]中将AC/AC变换器替换为矩阵变换器,并将其拓展到三相结构。该团队首次将这种NGDT命名为HT。附录中图A3为绿山大学研究团队提出的基于矩阵变换器的单相HT拓扑。

在该单相HT中,变压器的二次侧线圈 a 直接和 矩阵变换器相连接。二次侧线圈 b 与矩阵变换器的 输出端以及负载串联连接。线圈 a 、b 与一次侧的变 比分别为4/3 和 2/3。该线圈的变比与前文所提及的 NGDT 是相同的。单相矩阵变换器结构与 Cuk 斩波 器相同,通过对绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的控制 可实现动态调节 u_3 的幅值,从而使得负载电压 $u_{\rm L}$ ($u_{\rm L}=u_2+u_3$)保持恒定。

该思路被同样应用于三相配电系统,Z. Fedyczak团队在文献[16]中提出的三相HT拓扑如附录中 图 A4所示。该三相HT包括多绕组变压器和矩阵变 换器 2 个部分。多绕组变压器的一次侧为 Y 型绕 组,直接连接于电网。

二次侧的主绕组一端连接负载,另一端串联了 矩阵变换器的输出。二次侧的另一组绕组作为矩阵 变换器的交流输入,为矩阵变换器提供电压源。与 基于矩阵变换器的单相HT类似,负载电压为主绕组 电压与矩阵变换器输出电压之和,通过对矩阵变换 器输出电压的动态调节实现负载电压的稳定控制。 这种拓扑的劣势在于只能调节电压,无法实现 无功补偿、功率因数矫正等,而对于图A2中的串并 联型HT,由于该种拓扑存在与输出端口并联的 AC/DC变流器,可以实现上述功能。文献[28]中 提出了一种采用背靠背变流器的HT,如附录中图 A5所示。该混合PET包括多绕组变压器、滤波电 感、2个直流侧背靠背连接的变流器以及直流侧电 容和串联变压器。

其中多绕组变压器含有3个绕组:绕组1为一次 侧三相绕组,分别与三相电网相连;绕组2、3为二次 侧绕组,绕组2输出端口与负载相连,绕组3分别通 过滤波电感和AC/DC变流器相连。

2个直流侧背靠背连接的变流器为AC/DC变 流器和DC/AC变流器,为2个结构相同的三相两电 平变流器,直流侧串联在一起,中间并联电容构成。 AC/DC变流器可以实现无功补偿、功率因数矫正 和谐波治理;而DC/AC变流器可以实现动态电压 恢复。DC/AC变换器交流侧通过串联变压器和负 载以及二次侧绕组三相连接。

该类型的拓扑基本能够满足HT的应用需求。 其作为配电网电能转换与接口装置能够为敏感负荷 提供持续稳定的电压源;同时能够对负荷带来的谐 波进行补偿。

但是上述HT拓扑中含有大量的串联变压器,这 会增加实际装置的体积和成本。再者,作为电网接 口装置,此拓扑无法接入直流源,为了解决以上劣 势,图3展示了一种多功能HT拓扑。图中,U_{sa}、U_{sb}、 U_{sc}为三相电网电压。

该拓扑由原来的三相两电平变流器改成了6桥 臂变流器,组合成H全桥,形成3个H桥输出,通过 LC滤波器直接耦合进主回路中,相比图A5中的拓 扑省去了3个串联变压器。

在串并联变换器的直流侧部分引出了一个直流 端口,由于并联变换器具有四象限脉冲宽度调制



Fig.3 Topology of multifunction HT

(PWM)整流功能,该直流端口可以接储能或者直流 源,为HT带来了多端口接入能力。当直流端口直接 接负载或者储能设备时,其作为一个电流源输出保 持电压恒定持续输出,而当其直流端口连接光伏或 者其他直流源时,分布式能源可以通过最大功率点 追踪控制或相应的能量管理系统将能量直接传输至 大电网或者配网负载。

图 3 和图 A5 中的拓扑已经具备了无功补偿和 电压调节的能力。为了实现三相补偿隔离状态以及 提升不平衡补偿能力,附录中图 A6提供了一种基于 分相结构的新型 HT。由图 A6可知,该HT 由三相多 绕组变压器、H桥背靠背变换器、滤波器以及静态开 关组成。三相多绕组变压器包含 1 组原边绕组和 2 组副边绕组。副边主绕组为配电线路,串联 H 桥变 换器以后输出 400 V 交流电;副边辅助绕组分成 3 个单相分别连接 H 桥背靠背变换器中的并联侧变换 器,串联侧变换器通过 LC 滤波器直接耦合进主 回路。

H桥型背靠背变换器串联在副边辅助绕组和负载之间,通过逆变器输出端提供补偿电压。设备在整流侧通过变压器将直流母线和电网隔离;直流电容通过3个单相H桥充电,低通滤波单元与H桥型逆变器交流侧相连,用于滤除逆变器输出的高次谐波;由于多绕组变压器本身存在隔离以及三相分离的结构使得系统可以在串联侧无需使用串联变压器,采用直接耦合的方式。当电网输出电压正常时,串联侧H桥处于旁路模式,补偿模式不启动;当电网输出电压异常时,H桥型逆变器进入工作模式。并联侧H桥对电网进行实时无功补偿。当电网正常运行不需要无功补偿时,并联侧充当PWM整流器;当电网需要无功补偿时,并联侧H桥可以对系统进行无功补偿和谐波治理。

3 HT控制及保护策略

目前国内外对HT控制策略的研究相对较少。 为保障HT的运行可靠性、稳定性,以及降低损耗、提 高运行效率,需要对其调制、控制以及保护策略进行 深入研究。对于一个电力电子设备而言,控制、调制 以及保护策略与其拓扑是紧密结合的,因此基于目 前已有对HT拓扑的研究,对控制策略的研究如下。

3.1 调制策略

HT中的调制策略主要是针对设备中的逆变器、 整流器或者 DC / DC 等电力电子开关器件,通过不 同的调制技术使得变流器输出目标电压或者目标电 流,实现 HT 对输出电压 / 电流的相位、幅值以及频 率的控制,同时满足其他端口的并网消纳需求。由 于 HT 拓扑种类繁多,同时设备中存在众多变流器, 因此无法统一算法。在第2节中提到的 HT 拓扑中, 图 A3、A4 所示拓扑中变流器环节分别为单相和三 相 AC / AC矩阵变换器,图 A5 中为三相两电平 AC / DC 变流器,而图 3、A6 所示拓扑中,变流器为 H 型全 桥变流器。

对于矩阵变换器,文献[29]中给出了HT中矩阵 变换器的调制方法。通过开关序列的选取来实现指 令电压的跟踪。对于传统的三相两电平变流器或者 H型全桥变流器,则可以使用载波调制、正弦脉冲宽 度调制或者电压空间矢量调制进行转换^[30]。

在第2节讨论HT拓扑时,没有针对高压或者大 电流场合进行具体讨论。不难分析,当某些高压场 合需要使用HT时,其拓扑会由原先的三相两电平变 换器和H型全桥变流器替换为模块化多电平变流器 结构或者级联多电平结构;而当涉及大电流场合时, 基于目前开关器件的耐压和耐流能力,需要通过多 逆变器公交直流母线并联的方式来提升传输功率和 输出电流。在这些工况下,HT的调制方法需要根据 变流器做出相应的改变,例如载波移相调制^[31]、多电 平调制策略^[32]、3D空间电压矢量调制(3D-SVPWM) 以及用于环流抑制或者中点电位平衡控制的调制策 略等^[33]。

3.2 控制策略

HT的控制目标包括输出侧电压控制、输入侧电 流控制以及功率控制。同时变流器需具备四象限运 行能力,方便多种形式的能源接入。为了实现上述 控制目标,HT控制算法通常包括如下几点。

3.2.1 检测算法

HT在传输电能的同时需要对输入输出进行电 压、电流的补偿,为了完成实时补偿,需要对相应的 补偿量进行检测和计算。其中,负载谐波电流、无功 电流、负载补偿电压都是需要通过检测算法进行实 时检测计算的。文献[34]讨论了电流检测方法,针 对不平衡补偿、无功补偿以及谐波补偿不同的指令 值需要对检测算法,与DVR的算法相似,HT的负 载补偿电压计算方法也需要将跌落或骤升的电压幅 值及相位计算出来,从而生成补偿电压指令。文献 [36]提出了一种基于全通滤波器的单相电压补偿检 测算法,这种算法可以用在变流器三相分离HT中。 3.2.2 控制算法

为了对检测出的电流或者电压指令信号进行补偿,完成HT动态调节电能质量的目标,需要对变流器的控制器进行优化设计。在HT中,一般按照并联变换器和串联变换器分开讨论其控制算法。

并联变换器控制算法一般为电压外环前馈的双 闭环比例-积分(PI)控制,通过坐标变换将交流量转 换至 dq 坐标系下,通过 PI 控制器进行电压、电流的 控制,补偿电流通过 q 轴叠加进控制器。文献[37] 介绍了双 dq 坐标系下的电流环控制方法,将交流电压/电流的正、负序分量相分离得到不平衡量进行控制。文献[38]介绍了一种基于比例-谐振(PR)控制器的电流环控制方法,由于 PR 控制器可直接控制 交流量,能够节省计算时间。

串联变换器控制算法同样可以按照 PI 控制器 和 PR 控制器进行分类,但是由于 PR 控制器能够实 现交流量的稳态零误差控制,在补偿电压时,一般会 选择 PR 控制器。文献[39]提出了一种电压外环加 电流内环的电压补偿控制方法,这样能够避免电压 过调制,具有更好的鲁棒性。

3.3 故障保护技术

HT中除了传统变压器本身,还存在大量的半导体开关器件、滤波器、接触器、继电器等元器件。因此,受限于这些器件的耐压、耐流能力,必须采取必要的故障保护措施^[21],以防止HT内部器件的损坏。 另外,考虑到应用场合等因素,HT的故障保护措施还能够通过旁路、短路隔离等措施对负载以及电网进行保护,一定程度上规避风险,提高电网运行经济性。而故障保护技术一般可通过设备运行逻辑控制、控制器的限流限压保护等方面进行研究。

4 硬件设计

4.1 HT 整体设计

传统的变压器作为一种应用成熟的设备,其硬件设计已经达到了很强的稳定性和经济性。为了方便HT的推广应用,在理论研究的基础上,其硬件设计也是研究者们需要深入探索的内容。目前HT的硬件设计方案有2种路线,分别是变压器与其他器件相聚合的一体化设计和变压器与其他器件隔开的分离式设计。

4.1.1 变压器与变换器一体化设计

文献[20]通过3D建模模拟出了一种小功率HT 样机,其结构如附录中图A7所示。在传统变压器的 基础上,在其低压侧留出一定空间,通过对变流器、 滤波器、散热器等器件的合理布局结构化设计,与变 压器形成一体化设计,该种一体化设计并未增加过 多的体积,同时也方便运输与安装,为HT的大规模 推广应用提供了极大的便利条件。但是一体化设计 存在变流器补偿功率低、散热效果一般、故障保护能 力弱等缺点。如果变流器发生故障,需拆下变压器 对变流器进行检修,无法体现HT这一装置的智能性。 4.1.2 变压器与变换器分离式设计

附录中图A8展示了一种基于分离式设计的HT, 左侧柜体中放置了多绕组干式变压器,右侧柜体中 放置了变流器、控制器、滤波器、继电器、散热器以及 刀闸等元器件。

多绕组变压器的二次侧主绕组和辅助绕组通过

电缆与模块化变流器连接,其输出可以介入其他形式电源或者直接带负载。模块化变流器柜背面如附录中图A9所示。

变流器采用模块化设计,方便维护与更换。通 过主控制器对变流器进行控制。相较于一体化的 HT,分离式设计在装置的容量、补偿功率、接口数量 等方面都得到了较大的提升。同时得益于柜子空 间,设备的运行具备更高的稳定性和安全性。模块 化的设计方便检修和维护。众多开关器件为装置的 故障保护功能提供了硬件支持,能够满足HT的故障 保护设计需求。

4.2 多绕组变压器设计

多绕组变压器是HT的核心部件之一。不同于 传统变压器,其绕组数量、绕组变比和绕组功率都需 要根据HT的具体参数进行定制。多绕组变压器的 设计可以从以下几个方向进行研究。

4.2.1 干式变压器或者油浸式变压器

HT大部分应用场合集中在配电网中,其电压等级为高压10~30 kV,低压400 V,而功率等级一般在500 kV·A以内。因此,干式变压器或者油浸式变压器的选择要根据HT具体区分,如前文讨论的一体式HT,则需选用油浸式变压器,而分离式HT需要选用干式变压器。

4.2.2 多绕组变压器体积

由于HT中的变压器为工频变压器,其体积较 大,为了减小HT的体积,需要在满足散热、爬电距离 等安全性的前提下尽可能地减小多绕组变压器的设 计体积。

4.2.3 绕组数量、功率及变比

绕组数量需要与拓扑对应,一般设计为三绕组 变压器,主绕组作为主功率输出,辅助绕组连接变换 器作为补偿设备。辅助绕组的功率比主绕组功率 小,考虑到无功补偿容量以及电压补偿幅值,辅助绕 组的功率一般为主绕组的1/3。主绕组变比按照传 统 NGDT 变比确定,而辅助绕组变比数浮动范围相 对较大,可根据变流器的输入电压需求做适当的调 整,需满足整流器直流侧电压及高调制比的需求。 附录中图 A10 为4.1 节基于分离式设计的 HT 中的干 式变压器设计方案,原边为高压输入侧。

4.3 主电路以及控制系统设计

前文已经对HT的相关应用场合以及拓扑进行 了归纳和总结,分析了HT的硬件结构设计方案与思 路。HT的一次(主电路)与二次(控制系统)电路设 计也是至关重要的内容。

一次系统设计包括开关器件选型、滤波器选型、 保护电路设计、故障容错以及冗余设计、散热设计和 结构紧凑化设计等内容,这些都是需要在硬件实际 设计过程中重点考虑的要素。二次系统设计包括控 制模式设计、主控芯片选型、系统通信和交互设计以 及电磁兼容等内容。

5 总结及展望

近几十年来,电力电子学获得了很大的发展,大量的电力电子设备应运而生,在电网中的作用也日益凸显。但是受限于开关器件水平、产品稳定性以及设备成本,部分纯电力电子设备仍未得到大规模的推广和应用。作为传统变压器和PET的结合产品,HT在实现了两者功能的同时,兼顾了设备成本、稳定性等方面,可作为智能电力设备投运于电网中。综合分析HT的研究现状及其发展前景,可得出以下结论。

(1)由HT的特性可知,大功率电能传输和电压 转换是其基本功能,鉴于目前智能电网对电力系统 中设备智能化的需求以及电能质量问题的日益凸 显,HT可以作为除了传统变压器以及PET以外的另 一种可行方案,并且在功能性、经济性及可靠性方面 都有一定提升。

(2)除了传统电网,HT能够应用于更多的场合。 由于HT的部分拓扑具有多种输出端口、输出类型多 样等特性,可以灵活应用于微电网、分布式电网、直 流配电网等交直流电力系统中。作为配电网接口装 置以能量路由器的身份桥接多种形式的电网,串联 不同电压等级电力系统以及交直流电源。多端口 HT可以取消原有交流低压配电网中各种并网设备, 优化整个系统的结构和运行效率。

(3)HT通过串并联变换器的结构可以实现电压 调节、无功补偿、功率因数矫正等电能质量治理功 能,可以在接入敏感负荷的同时节省 DVR、有源滤 波器等设备的投入,为电力企业及用电单位节省大 量投资,具有很好的经济性。

虽然HT具有上述优势,但是作为一个近年来才 被提出并得到研究的设备,其仍有以下问题亟待研 究和解决。

(1)HT电路拓扑。

HT的拓扑是决定其功能和特征的最重要因素。 在目前已有的对HT的研究中,拓扑研究主要围绕多 绕组变压器与变流器的连接方式以及变流器自身结 构展开。因而对HT拓扑的研究需要着重考虑2个 方面:何种连接方式,变流器的内部结构。而在变流 器中使用的大量半导体开关器件和电感、电容等无 源器件以及控制器、接触器等器件会对设备的效率、 功耗、可靠性以及空间等方面带来困扰,这也成为了 制约HT发展和推广的因素。因此,兼顾到散热、电 磁干扰、绝缘等方面,连接方式可靠、运行效率高、开 关器件及无源设备少的新型拓扑是HT需要研究的 关键技术之一。

(2)HT控制策略。

为了使HT获得更好的动态和稳态性能,实现系 统控制稳定性和鲁棒性,新型控制策略如PR控制、 模型预测控制等现代控制技术也是其需要解决的问 题。稳定高效的控制策略不仅能提升控制效果,同 时可以节省控制器资源,提高运行效率。

同时,由于HT中变流器基数大、控制目标多样、 继电器开关逻辑复杂,需要有整个系统的运行逻辑 和协调控制策略。另外,全方位的故障以及保护控 制策略可以规避设备运行风险,提升设备运行安全 性,保障电网运行安全。

(3)多绕组变压器设计。

多绕组变压器是HT的核心部件,其结构设计和 材料选用是设备研制的关键。在干式变压器或者油 浸式变压器的选择、绕组材料的选择以及功率等级、 多绕组变比等方面不能按照传统变压器的思路,需 要针对HT本身特性进行定制。

(4)HT硬件设计。

为了便于量产、安装和维护,HT的硬件设计是 其迈向推广应用的重要一部分。在充分考虑系统绝 缘、散热等因素的情况下,通过合理的硬件布局,对 HT进行紧凑化设计能够减小设备体积,节约用料和 成本,提升设备的功率密度是其亟待解决的问题,需 要进行深入研究。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- GONG Q M, S MOHLER M, MARANO V, et al. Study of PEV charging on residential distribution transformer life [J].
 IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1):404-412.
- [2] 周念成,苏宇,王强钢,等. 基于IGBT的配电变压器有载调压 开关参数设计及分析[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):35-42,67.
 ZHOU Niancheng,SU Yu,WANG Qianggang, et al. Parameter

design and analysis of IGBT-based on-load tap changers for distribution transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(7):35-42,67.

- [3] 東洪春,贺勋,李立新.变压器和应涌流分析[J].电力自动化 设备,2006,26(10):7-12.
 SHU Hongchun, HE Xun, LI Lixin. Research on sympathetic inrush in operating transformer [J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(10):7-12.
- [4] SINGH A, MARTI J R, SRIVASTAVA K D. Circuit reduction techniques in multiphase modelling of power transformers
 [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3):1573-1579.
- [5] 刘闯,齐瑞鹏,刘海军,等. 一种减小三相级联型 PET各中间直流侧电容的方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):46-53.
 LIU Chuang, QI Ruipeng, LIU Haijun, et al. Method of decreasing intermediate DC-link capacitors for three-phase cas-

caded power electronics transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 46-53.

- [6] 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.
- [7] SHE Xu, HUANG A Q, LUKIC S, et al. On integration of solid-state transformer with zonal DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2):975-985.
- [8] MCMURRY W. The thyristor electronic transformer: a power converter using a high-frequency link [J]. IEEE Transactions on Industry and General Applications, 1971,7(4):451-457.
- [9] JONAS E H, JOHANN W K. Volume/weight/cost comparison of a 1 MVA 10 kV / 400 V solid-state against a conventional low-frequency distribution transformer[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE). Pittsburgh, USA:IEEE, 2014:4545-4552.
- [10] DRABEK P, PEROUTKA Z, PITTERMANN M. New configuration of traction converter with medium-frequency transformer using matrix converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 11(58):5041-5048.
- [11] RUI O M, GOMEZ A. Continuous chopper-based voltage regulation for power transformers [J]. IEEE Latin America Transactions, 2007, 5(3):136-141.
- [12] RONAN E R, SUDHOFF S D, GLOVER S F, et al. A power electronic-based distribution transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(2):537-543.
- [13] 宋开胜,王华芳,马宏忠,等. 10 kV 配电变压器自动调压的研究以及试验分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(4):30-35,62.
 SONG Kaisheng, WANG Huafang, MA Hongzhong, et al. Research and experimental analysis on automatic voltage regulation of 10 kV distribution transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(4):30-35,62.
- [14] AELOIZA E C, ENJETI P N, MORAN L A, et al. Next generation distribution transformer: to address power quality for critical loads [C] //IEEE Power Electronics Specialist Conference(PESC). Mexico, Russia: IEEE, 2003: 1266-1271.
- [15] 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.
- [16] KANIEWSKI J, FEDYCZAK Z, KLYTTA M. Implementation of a three-phase hybrid transformer using a matrix chopper [C]//13th European Conference on Power Electronics and Applications(EPE). Barcelona, Spain: IEEE, 2009:1-10.
- [17] BALA S,DAS D,AELOIZA E, et al. Hybrid distribution transformer: concept development and field demonstration[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE). Raleigh, USA:IEEE,2012:4061-4068.
- [18] SASTRY J, BALA S. Considerations for the design of power electronic modules for hybrid distribution transformers[C] // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE). Denver, USA: IEEE, 2013; 1422-1428.
- [19] BURKARD J, BIELA J. Transformer inrush current mitigation concept for hybrid transformers [C] //19th European Conference on Power Electronics and Applications. Warsaw, Poland: EPE, 2017:1-9.
- [20] BURKARD J, BIELA J. Evaluation of topologies and optimal design of a hybrid distribution transformer [C] //17th European Conference on Power Electronics and Applications. Gene-

va, Switzerland: EPE, 2015: 1-10.

- [21] BURKARD J, BIELA J. Protection of hybrid transformers in the distribution grid[C]//18th European Conference on Power Electronics and Applications. Karlsruhe, Germany: EPE, 2016: 1-10.
- [22] 陈沛龙,刘君,曾华荣,等. 一种新型混合式电力电子变压器 仿真研究[J]. 变压器,2017,54(11):35-39.
 CHEN Peilong, LIU Jun, ZENG Huarong, et al. Simulation research of a novel hybrid power electronic transformer [J]. Transformer,2017,54(11):35-39.
- [23] 刘君,曾华荣,陈沛龙,等.一种多功能混合型电力电子变压器及其控制方法[J].电器与能效管理技术,2017(16):34-38.
 LIU Jun,ZENG Huarong,CHEN Peilong, et al. Study of control strategy for a multifunction hybrid power electronic transformer[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017 (16):34-38.
- [24] 刘君,曾华荣,陈沛龙,等.基于模块化多电平变换器的混合变压器控制策略研究[J].变压器,2017,54(10):28-32.
 LIU Jun,ZENG Huarong,CHEN Peilong, et al. Research on the control strategy of the hybrid transformer based on the modular multilevel converter[J]. Transformer, 2017, 54(10): 28-32.
- [25] 刘君,曾华容,陈沛龙,等. 一种混合变压器的检测与控制算 法研究[J]. 电器与能效管理技术,2018(13);6-12.
 LIU Jun, ZENG Huarong, CHEN Peilong, et al. Research on detecting and control methods of a novel Hybrid transformer
 [J]. Electrical & Energy Management Technology,2018(13); 6-12.
- [26] 唐莹莹,陈广巍. 混合式电力电子变压器的研究[J]. 陕西电力,2017,45(3):39-43,48.
 TANG Yingying, CHEN Guangwei. Research on hybrid power electronic transformer[J]. Shaanxi Electric Power,2017,45(3): 39-43,48.
- [27] 杨涛,刘君,曾华荣,等. 一种适用于10kV配电网的混合式电力电子变压器仿真研究[J]. 电器与能效管理技术,2017(22): 22-29,49.
 YANG Tao,LIU Jun,ZENG Huarong, et al. Research on hy-

brid power electronic transformer applied to 10 kV distribution grid [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(22):22-29,49.

- [28] LIU Jun, ZENG Huarong, CHEN Peilong, et al. Research on a novel hybrid transformer for smart distribution network [C]//2018 IEEE International Conference on Industrial Technology. Lyon, France; IEEE, 2018;818-823.
- [29] SZCZESNIAK P, KANIEWSKI J. Hybrid transformer with matrix converter [J]. IEEE Transcations on Power Delivery, 2016,31(3):1388-1395.
- [30] 舒泽亮,丁娜,郭育华,等. 基于 SVPWM 的 STATCOM 电压电流双环控制[J]. 电力自动化设备,2008,28(9):27-30.
 SHU Zeliang, DING Na, GUO Yuhua, et al. SVPWM based voltage-loop and current-loop controls of STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(9):27-30.
- [31] 袁志昌,宋强,刘文华.载波移相SPWM开关频率的选取[J]. 电力自动化设备,2009,29(8):37-41.
 YUAN Zhichang,SONG Qiang,LIU Wenhua. Selection of phaseshift SPWM switching frequency[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(8):37-41.
- [32] ZHAO Tiefu, WANG Gangyao, BHATTACHARRYA 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.

- [33] SHE Xu, HUANG A Q, WANG Gangyao. 3-D space modulation with voltage balancing capability for a cascaded sevenlevel converter in a solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12):3778-3789.
- [34] LASCU C, BOLDEA I B, ASIMINOAEI L. High performance current controller for selective harmonic compensation in active power filters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007,22(5):1826-1835.
- [35] JOTHIBASU S, MISHRA M K. A control scheme for storageless DVR based on characterization of voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5):2261-2269.
- [36] YANG Bin,LIU Kangli,ZHANG Sen, et al. Design and implementation of novel multi-converter-based unified power quality conditioner for low-voltage high-current distribution system [J]. Energies, 2018, 11(11): 3150.
- [37] SONG H S, NAM K. Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999,46(5):953-959.
- [38] KUPWEMAN A. Proportional-resonant current controllers sesign based on desired transient performance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(10):5341-5345.
- [39] WANG Qingsong, CHENG Ming, CHEN Zhong, et al. Steadystate analysis of electronic springs with a novel ε control

[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12) : 7159-7169.

作者简介:



杨 斌(1989—),男,江苏南京人,博 士,主要研究方向为电力电子变压器、混合 变压器(**E-mail**:yangbin6113@163.com);

赵剑锋(1972—),男,浙江临海人,教 授,博士研究生导师,博士,主要研究方向 为电力电子在电力系统中的应用(E-mail: jianfeng_zhao@seu.edu.cn);

杨 斌 季振东(1986—),男,江苏盐城人,讲师,博士,主要研究方向为大功率电力电子变换技术(E-mail: zhendong_ji@126.com);

王建华(1982—),男,江苏南通人,副研究员,博士,主要 研究方向为大功率电力电子变换技术(**E-mail**:wangjianhua@ seu.edu.cn);

刘康礼(1989—),男,江苏宿迁人,博士,主要研究方向 为多变流器并联控制及其应用(E-mail:kangcumt@yeah.net)。 (编辑 王欣竹)

Overview of hybrid transformer technologies

YANG Bin^{1,2}, ZHAO Jianfeng², JI Zhendong³, WANG Jianhua², LIU Kangli²

(1. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to meet the higher demand of the development of smart grid for power equipment, HT (Hybrid Transformer) based on traditional transformer and power electronic equipment has attracted more and more attention. Based on the existing HT research and its process analysis, the relative key technologies of HT are analyzed, especially the topology, modulation, control and protection strategy of HT, multi-winding transformer design and overall hardware design are also summarized and discussed. Finally, the research trends and problems to be solved are summarized and prospected.

Key words: hybrid transformer; reactive power compensation; voltage regulation; distribution access; fault protection; overview







Fig.A3 Single phase topology of HT based on matrix chopper



Fig. A4 Three phase topology of HT based on matrix chopper











图 A7 一体式设计 HT 建模图 Fig. A7 Modeling diagram of integration designed hybrid transformer



图 A8 分离式设计 HT 装置图 Fig. A8 Diagram of separate designed HT



图 A9 模块化变流器柜内部结构 Fig.A9 Internal structure of modular converter cabinet



图 A10 多绕组干式变压器结构图 Fig.A10 Structure drawing of multi-winding dry type transformer