DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191255

变压器的电力电子化演进及其对电压稳定影响综述

王 鹤，栾钧翔

(现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学)，吉林 吉林 132012)

摘要：变压器作为电网中保持电压稳定性和改善电网电压质量的一种重要设备，一直是相关领域的研究热点。近年来随着电力电子技术的发展，由于电力电子器件相较于传统机械结构的高度可控性和不产生电弧的特性，变压器逐渐呈现电力电子化的趋势。首先将变压器按电力电子化发展方向的不同分为了两个阶段，并归纳总结了变压器电力电子化进程各个阶段的拓扑结构。在此基础上对每个电力电子化阶段的变压器对有载调压的影响做了详细介绍。最后对不同电力电子化阶段的变压器对电压稳定性的影响做了对比，对变压器的发展趋势和关键问题进行了总结与展望。

关键词：变压器；电力电子技术；拓扑结构；有载调压；电网电压稳定性

Summary of power electronic evolution of transformer and its influence on voltage stability

WANG He, LUAN Junxiang

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: The transformer, as an important piece of equipment to maintain voltage stability and improve voltage quality in the power grid, has been a research hotspot in a number of fields. With the development of power electronics technology in recent years, transformers gradually show a trend in power electronics because of the high controllability of power electronics devices compared with traditional mechanical structures and their characteristics of no arcing. This paper divides the development direction of power electronic transformer into two stages, and summarizes the topology of the power transformer electronic process stages. On this basis, the impact of each power transformer at an electronic stage on on-load voltage regulating is introduced in detail. Finally, the influences of power transformers at different electronic stages on voltage stability are contrasted, and the development trend and the key problems of the transformer are summarized and prospected.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507029).

Key words: transformer; power electronics technology; topological structure; on-load voltage regulation; power grid voltage stability

0 引言

随着电网规模日益扩大，风电、光伏发电等新能源的接入，直流电网研究不断深入等，电网的结构越来越复杂、电压变化也越来越频繁，对于电网维持电压稳定性的能力提出了新的挑战，变压器作为电网中保持电压稳定性和改善电网电压质量的一种重要设备，对于其电压调节能力也提出了越来越高的要求[1-2]。另一方面随着电力电子技术的发展，由于电力电子器件的高度可控性以及灭弧性能，利用电力电子技术可以提高变压器的可控性和调节能力，因而电力电子技术越来越广泛地应用于变压器[3-4]。变压器的电力电子化可以分为两个大的发展阶段，第一个阶段主要是传统工频变压器有载调压分接头的电力电子化，第二个阶段是电力电子变压器(PET)的出现和发展，PET 颠覆性地放弃了传统工频变压器的结构原理，对于变压器整个拓扑结构进行了电力电子化改进。现有的文献缺少对变压器整个电力电子化演进的拓扑结构进行总结，并且缺少对变压器电力电子化演进带来的功能改变以及接入

基金项目：国家自然科学基金项目资助(51507029)

电网后对于电压稳定性影响的分析对比[5-6]。

本文首先对变压器每个发展阶段拓扑结构的电力电子化演进进行了详细的介绍，系统地展示了电力电子技术应用于电力变压器中的发展历程，然后分析了每个电力电子化阶段变压器有载调压技术的变化，最后结合不同电力电子化阶段变压器调压对电网电压稳定性的影响进行了综合评述。另外本文的目的在于通过对变压器的电力电子化演进过程以及其电力电子化发展对电压稳定的影响进行概述，总结出变压器的发展方向和存在的问题，为后续变压器的发展提供借鉴和参考。

1　变压器的电力电子化演进过程分析

本节首先按照变压器的电力电子化发展方向不同，将变压器的电力电子化发展分成了两个大的阶段，详细介绍了变压器发展各阶段拓扑结构的电力电子化演进，并对其拓扑结构上的优缺点和经济性进行了比对。

1.1 传统变压器有载调压开关的电力电子化演进

在电力电子变压器出现之前，变压器的整个拓扑结构并未出现较大的变化，变压器的电力电子化演进主要是对于变压器有载调压开关(OLTC)的电力电子化演进。因此本小节主要是对于变压器的有载调压开关电力电子化演进进行了介绍。

1.1.1 机械式有载调压开关

文献[7-8]提出了如图 1、图 2 所示的最早的典型的机械式的 OLTC，主要是通过电动机带动机械式分接头进行档位变化来完成调压任务。其结构虽然简单，但是由于是带负荷调压，在分接头转换期间，分接头上具有大电流，容易产生电弧导致机械触头烧损和变压器绝缘油介质极化。所以后来人们对其拓扑结构进行了改进[9]。

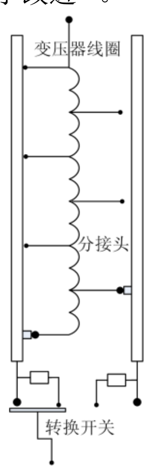

图 1　典型电阻式

Fig. 1 Typical resistance type

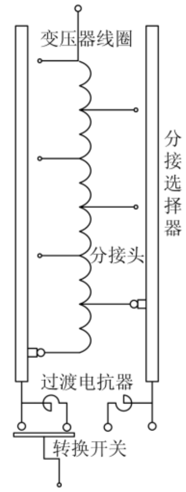

图 2　典型电抗式

Fig. 2 Typical reactance type

图 3 为电阻复合型 OLTC，是对图 1 的简化，图 4 为电抗改进型 OLTC，是对图 2 的改进，通过增加真空环节抑制电弧[10-11]。电阻复合型 OLTC 由两个带电阻的过渡触头 A、B 和一个主通触头 C 组成。过渡触头 A、B 用于在分接头转换期间通过电阻消耗电流，从而减少主通触头上的电弧。主通触头设计为承受长期的负荷电流，其接触电阻很小。通过主通触头、过渡触头及过渡电阻的调节来改变分接头的档位，实现有载调压功能。

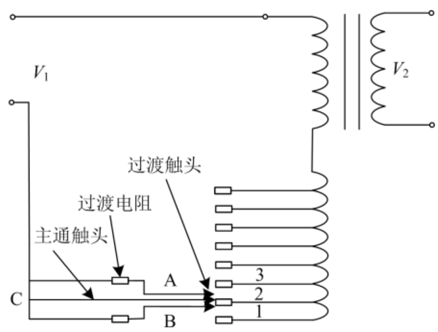

图 3　电阻复合型 OLTC 原理图

Fig. 3 Resistance compound OLTC schematic diagram

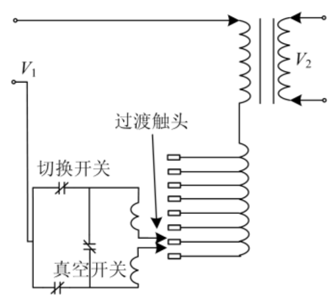

图 4　电抗改进型 OLTC 原理图

Fig. 4 Reactance modified OLTC schematic diagram

而在电抗改进型 OLTC 中，当分接头档位切换时，真空开关与切换开关配合工作，把流过切换开关的电弧电流转向真空开关，可以使电弧被抑制在真空开关中，在切换开关上只有少量电弧，减少了对变压器油的污染。但在真空开关切断环流时，对安全工作电压仍有一定的限制[12]。

1.1.2 复合式有载调压开关

尽管人们对于机械式有载调压开关进行了许多改进，而且有许多是成功的，但在整个变压器有载调压运行期间，有载分接开关触头燃弧问题，仍然是变压器有载调压最薄弱的环节。直到电力电子技术的出现，由于电力电子器件具有不产生电弧的特性，为解决传统的机械式有载调压开关产生电弧的问题提供了新的思路[13]。

文献[14]介绍了一种可控硅辅助换流式有载调压开关，可控硅辅助换流式无弧调压开关原理具体如图 5 所示。可控硅辅助换流式有载调压开关技术为防止电弧产生，采用可控硅取代了传统有载调压开关的过渡电阻，总体结构未有大的变化。可控硅辅助换流式有载调压开关设计有 2 组可控硅，对这 2 组可控硅在电流过零点时关断的同步性要求很高，不允许出现任意可控硅管提前导通的情况，否则就会导致变压器的部分线圈短路，同样若其中一个可控硅管出现延时导通的情况，则会造成负载电流中断，因此所产生的高恢复电压将会损坏可控硅[15-17]。

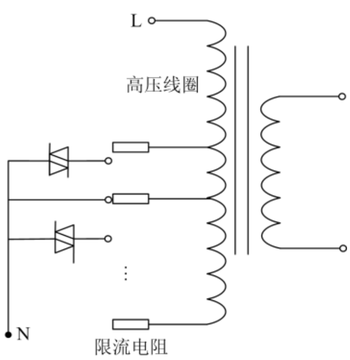

图 5 可控硅辅助换流式无弧 OLTC

Fig. 5 Thyristor assisted inverter arc free OLTC

文献[18]介绍了如图 6 所示的一种复合式有载调压开关。通过在传统机械式 OLTC 的基础上添加电力电子器件来解决分接头切换过程中产生的电弧，SCR1、SCR2 和 SCR3 为无触点电力电子开关双向晶闸管，在分接头转换前通过 SCR 的导通来减少分接头上的电流从而防止分接头转换期间被电弧击穿而导致机械触头烧毁。

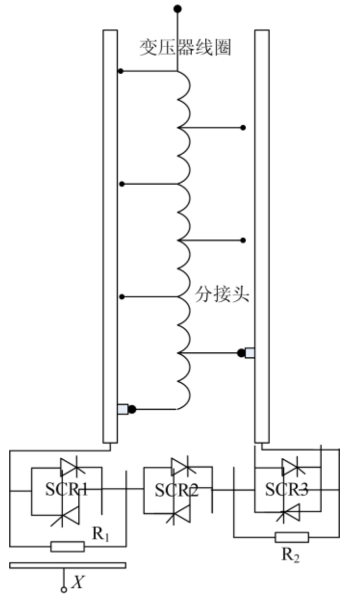

图 6 复合式 OLTC

Fig. 6 Compound OLTC

在传统机械式有载调压开关的基础上添加电力电子器件虽然能够较好地解决分接头转换产生的电弧，但是无法充分利用电力电子器件高度可控性的特性，而传统的机械式有载调压开关由于是利用电动机带动分接头进行转换的，受制于其机械特性使分接头转换需要较长的时间延迟，所以其调压反应减慢，需要较长的时间延迟，在分接头上增加电动机还会增大有载调压开关的体积，机械油会污染周围的环境[19-21]。所以人们为了解决这些问题，在电力电子技术发展的基础上对传统的机械式有载调压开关进行了进一步的改进。

1.1.3 无触点式有载调压开关

文献[22]介绍了如图 7 所示的一种早期的电力电子有载变压器。该方法的基本原理是将一个辅助变压器 T2 串联接入主变压器 T1 回路，通过控制晶闸管 S1 的导通角，改变辅助变压器的电压，使主变压器上叠加一个可调电压。也就是将三相主变压器 T1 和另一升压辅助变压器 T2 相连，T2 的一侧与 T1 的第三绕组通过一对反并联的晶闸管开关 S1 相连。若晶闸管 S1 的触发无延时，即在过零时触发，电压则同相位地加到负荷上。若晶闸管 S1 的触发有延时，则短路开关 S2 用来防止升压变压器 T2 开路。这种方法的优点是调压过程没有电弧，缺点是在调压过程中产生大量的谐波。谐波的含量与晶闸管的触发角有关，以副方三次谐波为例，电流可达 2.5%，电压可达 4%[23]。

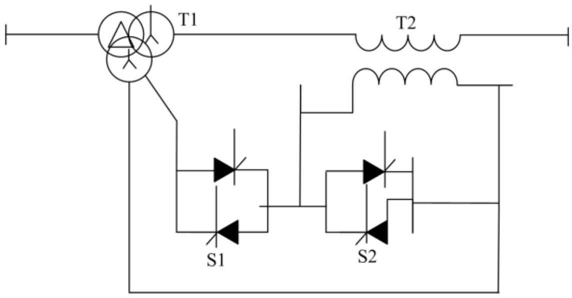

图 7 晶闸管辅助线圈型 OLTC

Fig. 7 Thyristor auxiliary coil type OLTC

如图 8 所示，电力电子开关 SW1 和 SW2 均由两个反并联的门极可关断晶闸管 GTO 组成。该方法将分接开关和连续控制的特点结合起来，可在 V1 和 V2 之间的一定区域连续调压。该方法的调压原理主要是通过改变电力电子器件的导通角来控制电压[24]，其拓扑结构如图 9 所示。但是这种方法存在着明显的缺陷：(1) 调压过程中，存在较大奇次谐波，尤其当负载是容性或者感性，晶闸管开关又不在电流过零时动作，谐波分量将更大。(2) 由于存在谐波分量，所以变压器副方的基波电压与原方电源电压不同相位，即：存在滞后的相位移，这会影响负荷的效率[25-27]。因此，在这种有载调压变压器的输出端需设置滤波器，但这又可能使电力系统出现电磁谐振。所以这种方法在电力系统中很少使用。

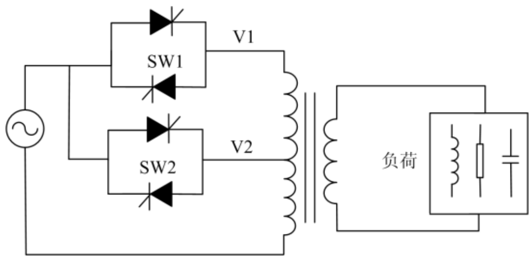

图 8 分接开关型无触点 OLTC

Fig. 8 Tap switch type contactless OLTC

文献[28]提出了如图 9 所示的一种典型的无触点式有载调压变压开关的简化拓扑结构，其相较于传统的机械有载调压变压开关的核心优化是改为利用电力电子器件来控制有载调压变压器分接头的档位。由于电力电子器件具有高度可控性，无触点式有载调压变压开关相较于传统的有载调压开关其调压的机械延时大大减少，并且电力电子器件具有不产生电弧的特性也充分避免了分接头转换期间容易产生电弧而击穿分接头造成变压器的损坏[29]。

无触点式有载调压开关虽然可以提高调压响应速度和降低故障率，但这种分接开关使用的电力电子开关器件数量多、体积大，因此成本要高于复合式有载调压开关。另外，单个大功率电力电子器件的耐压水平还不能满足直接用于中、高电网的要求，在简化调压系统的结构、减少电力电子开关器件的数量、降低对电力电子器件的耐压水平要求、降低电力电子开关消耗等方面，还有许多问题需要解决[30-32]。

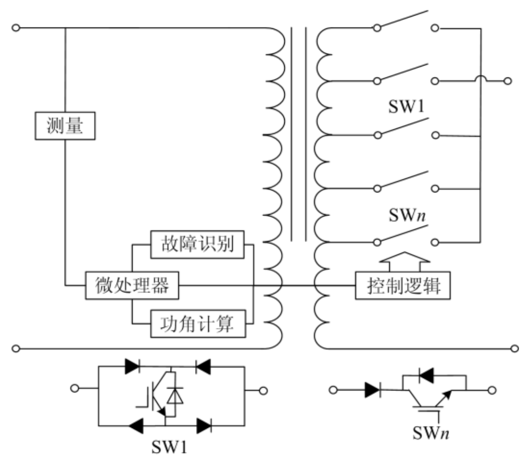

图 9 电力电子 OLTC 简化拓扑结构图

Fig. 9 Simplified topological structure diagram of power electronic OLTC

1.2 电力电子变压器

随着电力电子技术的发展，在近几年出现了电力电子变压器。PET 的出现不是对于传统变压器的线性化改进，而是颠覆性地放弃了传统变压器的结构和原理，使变压器发展进入了全新的阶段[33]。

文献[34]提出了如图 10 所示的最早的电力电子变压器，该拓扑采用不隔离 buck 型变换器，图 10 中的开关为交替导通的双向流动开关。该拓扑虽然结构简单，但是每个开关都承受原边电压和输出副边电流，使得开关的驱动、绝缘和控制都变得困难；并且，拓扑没有实现电气隔离，电路不能抑制输入的电流谐波和调整功率因数[35-36]。

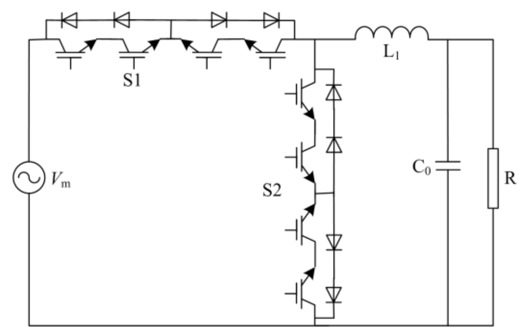

图 10 buck 型交流变换器型电力电子变压器

Fig. 10 Power electronic transformer with buck type AC converter type

文献[37]提出了如图 11 所示的对于 buck 型交流变换器型电力电子变压器的改进拓扑结构，也是 PET 发展历程中的一种比较具有代表性的拓扑结构，主要区别是增加了一个高频变压器从而实现了变压器两侧的电气隔离从而使电路能抑制输入的电流谐波和调整功率因数。交–交–交变换型电力电子变压器中开关均为双向开关，以保证能量的双向流动。这种变换器的优点是：能实现电压的基本变换，结构简单，体积和重量均大幅下降。但该方案可控性不高，电压电流应力大，副方电压波形仅仅是对原方电压波形的还原，电压波形的还原还必须保证整流模块和逆变模块开关同步[38]，由于该拓扑结构自身的不足和功能的有限性，以及应用价值较少，因而对其的相关研究越来越少。

文献[39]提出了如图 12 所示的一种典型的交直交型电子电力变压器实现方案。该方案也是 PET 发展中具有代表性的一个阶段，直流环节的增加使 PET 控制性能大为提升，可灵活控制一次侧功率因数，功率双向流动，使输入电流为正弦波，输出电压幅值不受一次侧的影响且为正弦波，还能有效隔离谐波在一二次侧之间传播，极大地改善了电能质量。

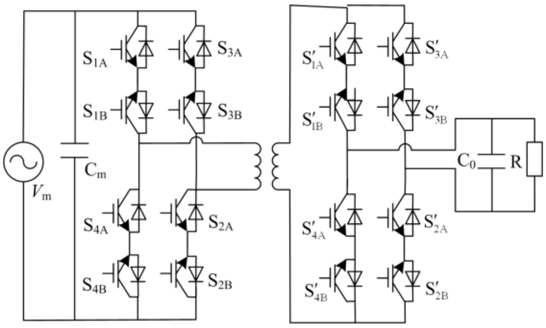

图 11 交–交–交变换型电力电子变压器

Fig. 11 AC-AC-AC transformer for power electronics

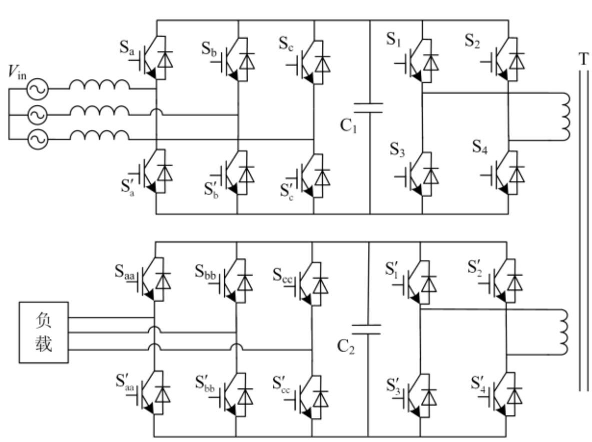

图 12 交–直–交变换型电力电子变压器

Fig. 12 AC-DC-AC transformer for power electronics

其工作原理为工频交流输入经三相全控变换器变换为直流，再通过一个单相全桥变换器被调制成为高频方波后加载至高频变压器耦合到变压器二次侧后，高频方波经单相全控整流器被还原为直流，最后经三相全控变换器逆变为所需的交流输出。该结构中所有变换器的开关器件均为全控型，因而可实现功率的双向流动。

而图 12 只是交直交型 PET 的一种典型的拓扑结构，由于在实际应用中受制于电力电子开关损耗寿命，以及 PET 控制策略优化等方面的问题，人们对图 12 的拓扑结构进行了改进。目前改进的应用较为广泛的主要是 MMC 型 PET 以及基于 LLC 谐振变换器的多电平 PET 拓扑结构。图 13 所示为目前基于 LLC 谐振变换器的 PET 拓扑结构，相较于典型拓扑结构，其开关电压应力是输入电压的一半，并且在全负载范围内工作在软开关状态，既降低了损耗又提高了效率。

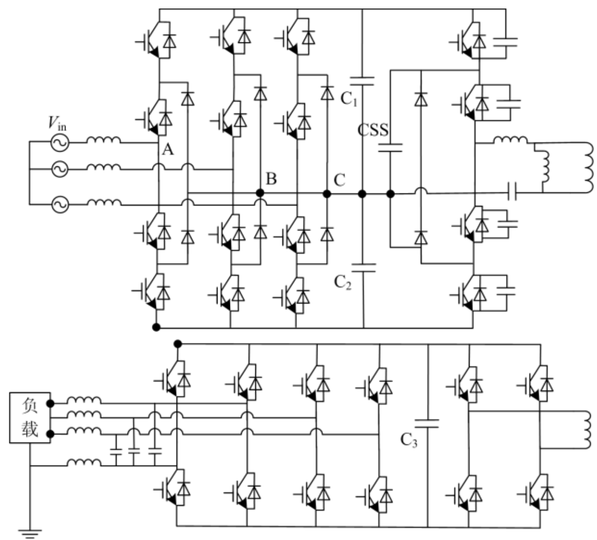

图 13 基于 LLC 谐振变换器的 PET 拓扑结构

Fig. 13 PET topology based on LLC resonant converter

电力电子变压器相较于传统的变压器有更高的工作频率，因此极大地减少了变压器的体积，变压器所需要的铁心材料更少，可以减少铜、铁等矿物金属的用量，为提高系统功率密度、降低造价提供了可能[40]。此外 PET 输入级和输出级的电压频率变换模块不仅提高了变压器的工作频率，而且输入输出级的电力电子变换器通过 PWM 调制技术还可以实现电压幅值和相位的变化，这也使得电力电子变压器除了可以实现传统变压器的变压和电气隔离功能，还具有了功率调节与控制、可再生能源接入等其他功能[41]。

通过对变压器拓扑结构的电力电子化演进过

程分析可以看出：(1) 在传统工频变压器方面，(a) 复合式 OLTC 从灭弧性能和稳定性方面来看，是可以完全替换传统的机械式 OLTC，但是受制于电力电子器件耐压、散热和寿命问题，复合式 OLTC 在实际应用中还没有完全替代传统的机械式 OLTC，因此提高电力电子器件的可靠性是充分发挥复合式 OLTC 的灭弧性能而避免电力电子器件在长期载流情况下容易发生故障问题的可靠手段，也是复合式 OLTC 在实际应用中完全替代传统机械式 OLTC 的重要前提。(b) 无触点式 OLTC 由于相较于复合式 OLTC 增加了大量的电力电子开关，因此成本有所提高，但是由于直接用电力电子开关代替了传统的机械式分接头，调压速度也有明显提升。优化无触点式 OLTC 的拓扑结构，减少电力电子开关的使用量对于降低无触点式 OLTC 的成本、提升其可靠性具有重要作用，因而是无触点式 OLTC 的一个主要研究方向。(2) 电力电子变压器方面，(a) 电力电子变压器整个拓扑结构的电力电子化不仅使其性能和功能方面提升巨大，成本方面也有巨大的增加。众所周知传统的工频变压器在接入电网后是需要接入无功补偿等辅助装置来配合从而实现电网电压的稳定，而电力电子变压器由于功能的增加使其在接入电网后并不需要附加其他辅助装置，所以 PET 虽然成本远高于传统的变压器，但是仅仅将其与传统工频变压器本身进行效率、造价、功率密度等性能直接比较不尽合理。所以怎样从性价比方面比较接入传统变压器和接入 PET 电网是正确认识 PET 成本的重要前提。(b) PET 的发展虽然颇有成果，但是其拓扑结构仍有优化空间，简化其拓扑结构、提升电力电子器件的耐压水平、降低设计成本和提高转换效率是推动其从理论研究向工程实用迈进的重要基础。

2　变压器电力电子化对有载调压的影响

为了进一步对比电力电子变压器与传统变压器，接下来，将结合变压器电力电子化演进对有载调压的影响，全面地总结变压器的电力电子化演进过程中的优劣。

变压器的电力电子化影响最为显著的是变压器的有载调压技术的发展，有载调压技术顾名思义是一种在调压过程中可以不切断负荷、带负载进行调压的技术，由于其具有带负荷调压的特性，所以有载调压技术是保持电网电压稳定、提高电网电能质量的重要技术手段[42]。最早的有载调压开关是 1920 年美国通用公司研制出的电抗器型有载分接头的有载调压开关，因此有载调压技术的发展距今已有近百年的历史了。早期有载调压技术的发展实际上就是变压器有载分接开关的发展，但是后来随着电力电子变压器的出现，有载调压技术的发展出现了新的思路。本节主要介绍了变压器电力电子化演进不同阶段对有载调压影响的不同。

2.1　传统变压器电力电子化对有载调压的影响

在无触点式有载调压开关出现之前，传统变压器的电力电子化对于有载调压技术的影响较小，主要是通过电力电子器件的灭弧性能来减少分接头转换产生的电弧，提升了有载调压的可靠性。文献[43]通过采用可控硅代替过渡电阻来减少分接头转换时分接头上的电流，从而减少电弧。文献[44]通过在分接开关串联无触点电力电子开关双向晶闸管来减少分接头转换期间分接头上的电流来减少电弧。而随着无触点式有载调压开关的出现，变压器的有载调压技术产生了较大的改变。

由第 1 节介绍可知无触点式有载调压开关是利用电力电子开关直接替代传统机械式开关，其相较于传统的电动机带动分接头进行调节的有载调压开关有明显的优势。文献[45]比较了无触点式有载调压开关与传统机械式分接头的响应速度，得出传统机械式的分接头需要由电动机带动分接头进行档位调节，因此档间需要固定的机械延时，时间在 10 s 左右，而无触点式有载调压开关由于利用电力电子开关代替机械式分接头，不需要电动机带动分接头进行档位调节，并且由于电力电子开关响应极快的特点，因此档间不需要固定的机械延时，证明了无触点式有载调压开关提高了有载调压的调压速度。文献[46]比较了无触点式有载调压开关相较于传统机械式和复合式有载调压开关的灭弧能力，得出无触点式有载调压开关在灭弧性能上远远高于传统机械式的有载调压开关，并且优于复合式的有载调压开关，因此无触点式有载调压开关极大地提高了有载调压技术的灭弧性能。

而无触点式有载调压开关由于档间不需要固定的机械延时，因此不仅可以实现有级调压，还可以实现无级调压。因此其控制策略相较于传统的机械式有载调压开关也发生了改变。文献[47-48]介绍了应用无触点式有载调压开关的变压器的控制策略上的改变，产生了如图 14 所示的几种典型的控制拓扑结构。

图 14(a)是直接利用电力电子开关替代机械式分接头，相较于传统的机械式分接头具有更快的调节速度，并且不同于传统机械式分接头需要逐档调节分接头，直接替代法的无触点式有载调压开关除了可以有级调压，还可以实现无级调压。图 14(b)为二

进制编码调节法，是利用二进制可以实现 1%~15%的电压调节。相较于直接替代法减少了电力电子开关的数量，不仅节约了成本而且提高了可靠性。图 14(c)是粗调与细调结合法，在电压变化大时通过粗调调节电压，在电压变化小时通过细调调节电压，调节电压时，先粗调，再细调，从而实现电压的快速调节。粗细调节结合法所需的电力电子开关数量少于直接替代法，多于二进制调压法。其调压速度慢于无级调压，快于逐档的有级调压。

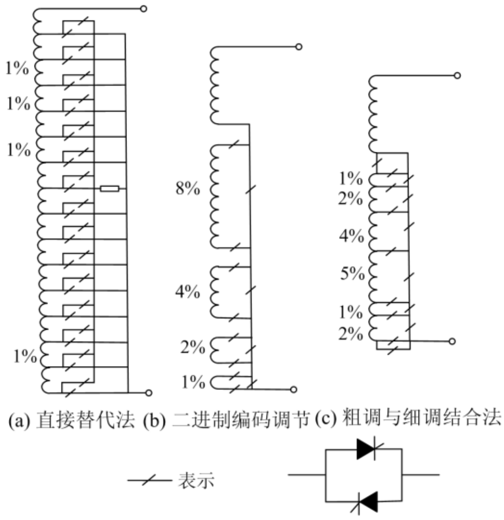

图 14 无触点式有载调压开关典型控制拓扑结构

Fig. 14 Typical control topology of contactless on-load voltage regulator

应用无触点式有载调压开关的传统变压器虽然相较于传统应用机械式有载调压分接头的变压器拥有许多优点，但是也有些许不足。文献[49]比较了电力电子开关和传统的机械开关的消耗，得出电力电子开关的电能消耗要大于传统机械开关，因而复合式有载调压开关的电能消耗小于无触点式有载调压开关，大于传统纯机械式有载调压开关，并且加上电力电子开关成本较高，无触点式 OLTC 的成本高于传统机械式 OLTC。文献[50-51]提出了电力电子开关在长期载流的情况下器件损耗较大，降低了电力电子开关的使用寿命，并且无触点式 OLTC 的无级调压会产生大量的谐波，对电能质量产生影响。

综上所述，(1) 无触点式 OLTC 相较于传统的 OLTC 有更快的调节速度，更好的灭弧性能，但是开关消耗也更大，并且虽然灭弧性能赋予了电力电子 OLTC 更好的抗电流性能，但是电力电子器件在长期载流情况下的寿命问题也限制了电力电子 OLTC 的长久使用。(2) 从成本和稳定性方面综合考虑，复合式 OLTC 由于成本低于无触点式 OLTC 并且稳定性高于传统机械式 OLTC，因此更适合电压波动较小的电网，而对于电压波动较大的电网尤其是大规模新能源发电接入的电网，无疑是具有最快调节速度的无触点式 OLTC 更具有实用价值。(3) 对于无触点式 OLTC，优化其拓扑结构，在保证其调压精度的基础上减少使用电力电子开关的数量对于其早日广泛应用于电网具有重要意义。(4) 无触点式 OLTC 调节速度的增加是否一定对电网的电压稳定性具有积极意义，怎样充分发挥其调节速度的优势而避免其对电网的电压稳定性产生不利影响也是值得考虑的问题。

2.2 电力电子变压器对有载调压的影响

在电力电子变压器出现之前，谈到有载调压首先想到的就是添加有载分接开关的传统变压器，电力电子变压器的出现对有载调压技术产生了重大的影响，为电网有载调压技术提供了新的思路。传统的变压器在进行电压调节时需要通过改变分接头档位来进行电压调节，因此电压调节后电压波形会有明显的抬升或降落。而电力电子变压器的有载调压技术不同于传统变压器利用电力电子开关进行电压档位的调节来控制电压，PET 是基于 PWM 调制技术通过脉冲信号来控制电力电子开关的占空比从而将电网电压调节到目标电压，因此 PET 可以做到电压的连续快速调节，其调节的电压波形是平滑连续的。

文献[52]介绍了基于比例积分(PI)控制的经典输出级控制框图，由控制框图可知电力电子变压器的有载调压是闭环控制，不同于传统变压器是电压偏差超过死区一定时间后再进行电压调节，因此电力电子变压器的电压是可以连续快速调节的。但是 PI 控制器存在对交流信号的响应特性差、参数设计敏感的问题，因此文献[53]对基于 PI 控制器的控制策略进行了改进，提出了基于比例谐振(PR)控制器的控制策略，PR 控制器的优势在于适用于交流信号的直接控制，可直接将二次侧电压作为控制系统的输入；其次，PR 控制器在谐振频率附近具有较大增益，在非谐振频率处响应差，可实现基波环节和各个谐波环节的解耦而无需考虑谐波对基波控制带来的影响；最后，PR 控制器的谐振特性使得其能够对非谐振点外的信号进行滤波，在进行多次谐波综合治理时无需多次 *d*-*q* 变换来提取谐波电压，简化了控制系统结构与数字信号处理器的计算量[54-56]。文献[57-58]介绍了电力电子变压器可以实现变压器一二次侧电压的解耦，由于电力电子变压器输入级和输出级分别是由不同的电压源型变换器(VSC)控制的，因此一二次侧的电压互不影响，可以实现一二次侧电压的分别调节。文献[59]提出了交直交型电

力电子变压器的直流环节可以直接接入分布式新能源发电等直流发电技术，从而省去了交直流转换环节，节约了成本。

电力电子变压器除了可以直接替换传统的变压器在电网中完成有载调压的任务外，还可以与传统变压器结合实现有载调压。文献[60]提出了一种电力电子变压器与传统变压器结合的有载调压方式，如图 15 所示，通过将适当的电压分量注入到PET，通过 PET 的调节实现电压的控制，这种方式虽然也可以实现电压的连续快速调节，但是无法实现变压器一二次侧的解耦，无法充分发挥 PET 的优点，成本也高于直接用 PET 替换传统变压器，并且对于此种拓扑结构 PET 环节替换成具有交流端口的电力电子变换器即可实现电压控制，但是其调节效果要劣于 PET，因此这种方法并未得到广泛的研究。

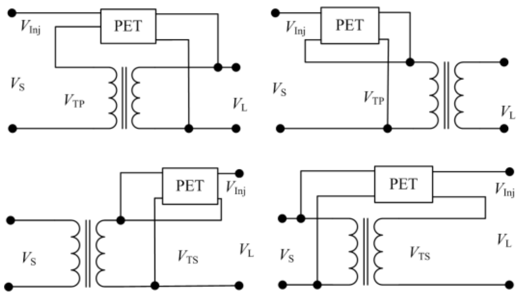

图 15 电力电子变压器有载调压

Fig. 15 Power electronic transformer on load voltage regulation

电力电子变压器有载调压技术相较于传统变压器虽然具有较高的实现成本，但是其优点也是相当突出的。其优点主要是电力电子变压器有载调压技术能提供稳定的二次侧输出电压，不随负荷的变化而变化，并且输出电压平滑可调；对一次侧电压出现的特殊情况，如谐波、单相接地故障、非全相运行和电压跌落等，可以起到较好的抑制作用，保证二次侧输出电压基本恒定；可以吸收或者发出无功，避免无功功率在电网中长距离输送，降低线损；具有直流环节，能更好地适应新能源发电的接入等[61-63]。

因此，综合对比传统的工频变压器有载调压和 PET 的有载调压可以得出：(1) 传统的变压器的调节速度已经越来越不能满足电网发展新形势下频繁的电压变化，谐波的问题也一直是影响电网电能质量的重要因素，而传统变压器对于谐波问题并没有较好的处理方式，并且对于一二次侧的电气故障传统的变压器没有可靠的隔离手段。这些问题都是影响电网电能质量的重要因素。(2) PET 的连续快速调节以及可以实现一二次侧解耦的特点无疑为解决上述问题提供了可靠的手段，但是 PET 的研究目前主要在理论研究方面，短时间内还达不到实际应用水平，并且 PET 的成本问题也是制约其实际应用于电网的重要因素。因此加深对 PET 拓扑结构和控制策略的研究，在保证其功能优势的基础上尽可能减少其成本，提高其性价比应当是当前 PET 研究的一个主要方面。

3　变压器电力电子化演进对电压稳定性的影响

前两节总结了变压器的电力电子演进过程的拓扑结构改变和功能的优劣对比，但是单纯地分析变压器的结构和功能无法充分了解其在实际使用中的效果，因此本节将对于不同阶段的变压器接入电网后对于电网电压稳定性的影响进行介绍，更加全面地分析变压器电力电子化演进的优劣。

3.1　传统变压器电力电子化演进对电网电压稳定性的影响

传统的变压器虽然在有载调压开关上进行了许多电力电子化改进，但是传统的变压器有载调压技术的本质还是通过改变分接头的档位来进行电压调节，因此其对电压稳定性的影响是相似的，不同的是调压速度的不同会对无功不足时电压崩溃的时间产生影响[64-67]。

文献[68-71]介绍了有载调压变压器的系统模型及其从负荷侧看的等值模型并对其进行不同变比下的 PV 曲线求取，求取的结果如图 16 所示。通过对 P-V 曲线分析可知当系统初始状态运行于 D 点时，当 OLTC 发生调整，变比 $n_1 \rightarrow n_2$，由于调整瞬间转差不会突变，运行点将由 D 点沿负荷特性曲线 L2 移动，与另一条系统 P-V 曲线(n=1.10)相交于 D_1 点，该点因电动机电磁功率小于机械功率，电动机减速、电磁功率反而下降，随着时间的推移，负荷消耗的功率反而越来越小，电压亦不断下降，即发生电压失稳的现象。反之当系统运行于临界点 B 上方时，

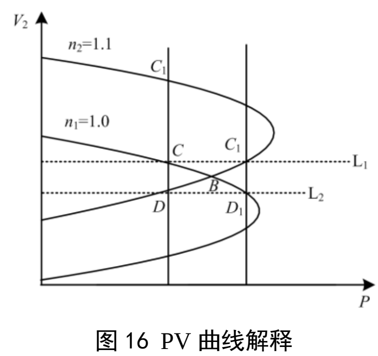

图 16 PV 曲线解释

Fig. 16 PV curve interpretation

系统的调压将是正向的。因此不同变比的 PV 曲线交点 B 也被称为负调压效应点。由理论分析可知当变压器初始状态无功功率不足时，变压器的有载调压动作不仅不能将电网电压调节到规定的区间甚至会发生“负调压效应”，严重时将会导致电网电压的崩溃[72-75]。

因此在实际使用中，对变压器的有载调压进行监测和控制对于维持电网电压稳定性是非常有必要的，为了预防负调压效应，防止电压崩溃，变压器在进行有载调压时需要配接无功补偿装置[76-78]。在此基础上，文献[79-81]提出了一种变压器和无功补偿装置协调控制的方法，通过适量的无功补充来保证变压器有载调压的正常进行，从而保证电网电压的稳定性。文献[82]提出了一种监控电压稳定性和电压薄弱程度的方法，通过对分接头动作前后一次侧电压和电流变化量的监测，来保证电网的一二次侧有功功率传输在极限值以下，从而保证电网电压的稳定性，预防负调压效应的产生。文献[83]分析了变压器在不同档位下电网的负荷裕度，证明了相同无功情况下，分接头的初始档位越低，电网在进行有载调压时越不容易产生电压崩溃。文献[84]在此基础上提出了优化分接头变比来提高系统的负荷裕度，从而达到电压稳定预防控制的目的。

近年来随着新能源发电技术的发展，变压器的有载调压控制策略也是一个研究热点。文献[85-88]提出了新能源接入后对电网电压稳定性的影响，证明新能源发电的无功功率可以结合变压器来协调控制；而文献[89]分析风力发电对变压器 OLTC 分接头频率的影响得出风力起伏与分接头频率成正相关；文献[90-91]提出了变压器与分布式能源协调控制的控制策略，利用分布式能源的无功功率与变压器协调控制，确保了电网的电能质量。

传统变压器在接入电网后对于电网电压稳定性影响的研究已经比较成熟，无论是传统电网还是接入了大规模新能源的新型电网，对于传统变压器有载调压的控制都可以通过合适的优化或者附加无功补偿装置来使变压器充分发挥有载调压性能并且避免“负调压效应”。无触点式 OLTC 相较于传统 OLTC 拥有更快的调节速度甚至可以无级调压的特点虽然可以提高调节速度，但是另一方面其过于快速的调节是否会对电网的电压稳定性产生不利影响也是一个值得考虑的问题。

因此对于无触点式 OLTC 接入电网后维持电压稳定性问题的研究可以从以下方面考虑：(1) 充分监测无触点式 OLTC 动作前的无功裕度，特别对于其无级调压需要在调压前增加计算环节来计算其调节造成的无功变化，保证其动作不会造成电网的无功不足而产生“负调压效应”是无触点式 OLTC 实际应用于电网的重要前提。(2) 监测无触点式 OLTC 调节后系统的无功裕度变化，研究无触点式 OLTC 动作造成系统无功不足时如何通过无功补偿装置补偿无功或者通过投切负荷等方式来维持电网的电压稳定性是无触点式 OLTC 实际应用于电网的重要保障。

3.2 电力电子变压器对电网电压稳定性的影响

电力电子变压器的拓扑结构相较于传统变压器进行了巨大的改变，因此其接入电网后对电网电压稳定性的影响相较于传统的变压器也发生了巨大的变化[92-93]。

文献[94]通过对电力电子变压器的等效物理模型分析得出，电力电子变压器的一次侧和二次侧对电压的控制是由不同的电压源变换器控制的，因此电力电子变压器二次侧的电压调节不会影响到一次侧，而一次侧的电压波动也不会影响到二次侧。而又因为从用户的角度考虑，用户需要从电网获得波形好、谐波少的稳定输出电压。所以 PET 可以等效为一个电压源。从电网角度考虑，不希望用户产生的电流谐波进入母线，影响系统稳定，所以从电网角度看，PET 的主要控制对象是电流，类似电流源模式。因此文献[95]提出了对于 PET 可以将其等效为如图 17 所示的等效电路。

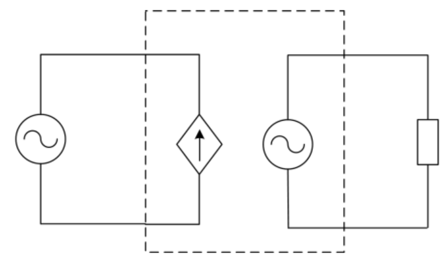

图 17　PET 等效电路

Fig. 17 PET equivalent circuit

而文献[96]通过对等效电路进行分析得出了如下结论：电力电子变压器输入端的有功功率和无功功率都可以通过改变输入端 VSC 的调制波相角 δ 来调节，PET 的输出级与输入级模型是一样的，只是工作时的具体参数不一样，即一端工作在整流状态，另一端工作在逆变状态。因此电力电子变压器相应地对于 PET 输出端来说有功功率和无功功率也可以通过改变输出端 VSC 的调制波相角 δ 来调节。

由上节对于传统变压器对电网稳定性的影响分析可知，对于传统变压器有载调压技术来说，电网无功功率是否充足是影响有载调压效果的最重要的因素。当无功功率不充足时，有载调压不仅不会对

电网电压稳定性产生有利影响，甚至还会产生“负调压效应”，严重时甚至会导致电网的崩溃。

但是对于电力电子变压器来说，文献[97]通过对 PET 的拓扑结构分析得出电力电子变压器的一次侧和二次侧对于电压、有功和无功的调节是分别进行的，互相不产生影响，因此 PET 的调压不会像有载调压变压器一样造成一二次侧无功功率的流动，所以不会产生由于二次侧的调压加重一次侧对于无功的需求而造成一次侧的无功缺额越来越大而产生“负调压效应”的现象。并且由于 PET 可以通过调节调制波相角控制无功功率，因此 PET 的有载调压技术不仅不会造成系统的无功不足，甚至在系统无功不足时可以通过调节调制波相角 δ 来产生无功，因此不会由于无功的不足而使 PET 的有载调压对配电网的电压稳定性产生不利影响[98]。

因此在实际使用中，对于电力电子变压器来说并不需要附加无功补偿装置。文献[99]提出了对于电力电子变压器控制策略的优化，在此控制策略下，电力电子变压器通过控制 PWM 调制参数就可以产生足够的无功功率，从而维持电网电压的稳定性；而文献[100]通过将电力电子变压器与附加了无功补偿装置的传统变压器进行对比，得出在正常负载情况下，含 PET 的有源配电网网损要低于含传统变压器的有源配电网网损，且含 PET 的有源配电网所有节点电压偏差要小于含传统变压器的有源配电网，因此电力电子变压器在接入电网后具有更好的电压控制性能。

目前，对于电力电子变压器的研究大部分是基于其拓扑结构和控制策略的研究，对于其接入电网对电压稳定性影响的研究还处于起步阶段，并没有太多的相关文献，因此这也将是未来的一个研究热点。而毫无疑问的是，由于电力电子变压器相较于传统变压器拥有明显的优势，其在接入电网后通过合理的控制策略会更好地促进电网的电压稳定性，虽然单纯从变压器的角度看，电力电子变压器成本要远高于传统工频变压器，但是从功率密度方面来讲，电力电子变压器的功能成本比率也几乎相当于附加了各种协调控制装置的传统变压器，并且电力电子变压器由于具有直流环节使其对于新能源接入具有先天优势因而也使其更适合于大规模能源接入的新型电网。因此电力电子变压器拥有非常广阔的发展前景。

所以当前对于 PET 的研究一方面要深入优化其拓扑结构和控制策略，增加其可控性以及稳定性，另一方面研究其接入电网后对电压稳定性产生的影响对于其早日实际应用于电网也有重要意义。

综上所述，(1) 在传统变压器的方面，传统机械式以及复合式 OLTC 对于电压稳定性影响的研究已经成熟，传统的无功补偿策略已经可以保障其在电网中充分发挥调压效果而避免“负调压效应”，而对于无触点式 OLTC，传统的无功补偿手段满足不了其调节速度的提升。因此，怎样充分发挥无触点式 OLTC 相较于传统机械式 OLTC 的调节速度优势而避免“负调压效应”，应当是 OLTC 的一个研究热点。(2) 在电力电子变压器方面，PET 相较于传统变压器的优势已无需赘述，PET 也将是未来变压器的主要发展方向。但是现有的研究缺少对于其接入电网后对电压稳定性的影响，并且缺少其与新能源发电协调配合的研究，而加深这方面的研究对于其实际应用具有重要意义。

4 总结和展望

4.1 总结

本文在分析变压器拓扑结构电力电子化演进的基础上，详细综述了变压器电力电子化演进带来的功能改变，并对其接入电网后对电网电压稳定性带来的影响进行了归纳总结。

为了更直观地展示变压器电力电子化演进过程中的优劣对比，本文将变压器的发展按照电力电子化水平进行了分类归纳，得出变压器的电力电子化进程图，如图 18 所示。

由演进过程图并结合前两节的分析可以总结出以下结论：

(1) 拓扑结构方面，传统的工频变压器的电力电子化主要是有载调压分接头的电力电子化，按照电力电子化的水平不同可以分成三个阶段，其中传统机械式和机械改进式 OLTC 所面临的主要问题是电弧容易击穿开关而降低稳定性，复合式 OLTC 则通过电力电子器件的使用极大地改善了这个问题，但是其灭弧性能还是受传统机械式分接头的影响，不能达到完全灭弧，未能充分发挥电力电子器件的灭弧性能，无触点式 OLTC 由于是直接用电力电子开关代替了机械式分接头，因此可以充分发挥电力电子器件不产生电弧的优点，达到充分的灭弧。工频变压器的电力电子化虽然提升了灭弧性能，但是其体积过大的缺点并未得到改善，而电力电子变压器通过电压变换提升了变压器的频率，因此大大减少了变压器的体积，并且电力电子变压器直接用电力电子交换器替代了传统的分接头档位设置，因此其也可以达到完全灭弧的功能。

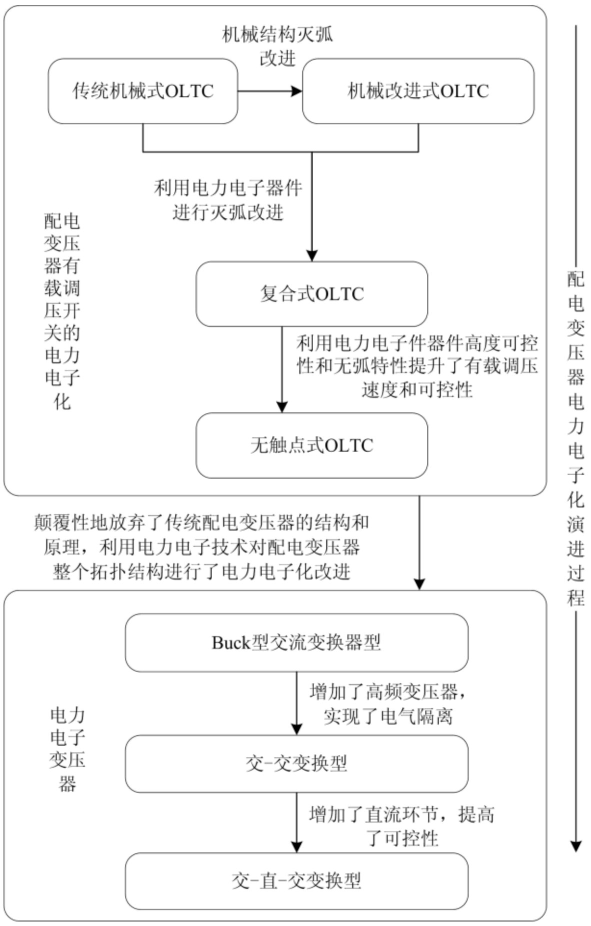

图 18 变压器电力电子化演进过程

Fig. 18 Electronic evolution process of power transformer

(2) 性能方面，附加了传统机械式和机械改进式以及复合式 OLTC 的传统工频变压器在调压速度上是相同的，而无触点式 OLTC 由于直接用电力电子器件替代了传统的机械式分接头，因此其除了进行有级调压之外还可以进行无级调压，所以调压速度要高于利用机械式分接头进行调压的 OLTC。但是电力电子变压器通过引入电力电子变换技术可以实现电压的连续快速调节的特点，使其具有了极快的调节速度，其调节速度远远高于无触点式 OLTC。并且从调压效果上来看电力电子变压器可以实现输出电压平滑可调，而传统的工频变压器有载调压会使电压有明显的抬升或降落，因此电力电子变压器无论是调压效果还是调压速度都要优于传统工频变压器的有载调压。

(3) 成本方面，由于电力电子器件成本较高，因此随着变压器的电力电子化水平不断增高其成本也是不断上升的，在传统工频变压器方面，机械式以及机械改进式 OLTC 的成本最低，复合式 OLTC 由于在机械式分接头上添加了电力电子器件，因此成本有所提高，而无触点式 OLTC 由于直接用电力电子器件替代了传统机械式分接头，因此成本有较大的提高，并且根据其拓扑结构的不同，电力电子开关应用越多成本越高。电力电子变压器相较于传统的工频变压器虽然中间的变压器环节体积更小成本有所降低，但是由于其两侧电力电子变换器的应用极大地提高了成本，因此综合考量，电力电子变压器的成本还是要远远高于传统的工频变压器。

(4) 对于电网电压稳定性影响方面，附加 OLTC 的传统工频变压器接入电网后对电压稳定性的影响已经非常成熟，但是对于无触点式 OLTC 由于其调节速度的提升需要加深其接入电网后无功保护的研究来确保其快速调节不会造成“负调压效应”。而对于 PET 则需要增加对于其接入电网后对电压稳定性影响的研究，充分认识其接入电网后对电压稳定性的影响才能使其充分发挥性能优势而避免对电网的电压稳定性产生不利影响。

(5) 实际应用方面，目前电网主要应用的主体变压器还是传统的工频变压器，不同的是根据不同电网对调压速度以及可靠性和消耗的要求，变压器的有载调压开关应用的是不同电力电子化阶段的有载调压开关，但是主体的有载调压开关还是以传统机械式和复合式为主，在某些对调压速度和可靠性要求高的电网中，无触点式 OLTC 也有少量实际应用。而电力电子变压器目前还主要是集中于硬件结构以及控制策略的优化，对于其接入电网后对电网的影响研究较少，并且由于电力电子变压器在接入电网中是完全替代传统变压器的，需要较高的成本，因此目前并没有实际应用于电网。

4.2 展望

本文在总结变压器电力电子化演进过程的基础上对于未来变压器的发展进行了展望：

(1) 未来发展前景方面，随着人们对供电可靠性和供电质量要求的不断提高以及新能源发电大量接入电网，电力电子变压器虽然现在受制于成本和可靠性问题并未大量应用于电网，但是由于 PET 相较于传统工频变压器的明显优势，PET 相较于传统的变压器具有更为广阔的研究和发展前景。并且由于最近几年相关学者的努力，电力电子变压器的发展非常迅速，其相关的拓扑结构和控制策略已经非常成熟，甚至在航天、航海等高科技领域已经开始应用电力电子变压器，而且随着电力电子技术的发展，电力电子器件的成本不断降低和可靠性不断提高，PET 将会被应用于更多的领域。

(2) 未来研究方向方面，变压器的电力电子化演进是解决大规模新能源发电接入，直流电网研究不

断深入等电网发展新形势带来的电网结构越来越复杂、电压波动越来越频繁等问题的重要前提，未来可以从以下方向开展进一步研究：(a) 拓扑结构方面，对于电力电子器件的消耗以及在长期载流下的寿命问题进行深入研究，提高电力电子化变压器的稳定性和使用寿命，降低成本。(b) 传统变压器方面，加深对无触点式有载调压开关的控制策略的研究，从而减少电力电子开关的使用，提升其使用可靠性是短期内解决大规模新能源发电接入电网带来的电压频繁波动的可靠方式。(c) 电力电子变压器方面，对于电力电子变压器的拓扑结构和控制策略研究已经比较成熟，但是缺少对于电力电子变压器接入电网后对电网电压稳定性的影响，因此加深对电力电子变压器接入电网后对电压稳定性影响的研究有利于电力电子变压器早日实际应用于电网。(d) 电力电子变压器由于拥有直流环节以及连续快速调节的特点，因此是解决新能源发电接入带来的电压频繁波动的有效手段，深入研究新能源发电与电力电子变压器协调配合有利于提升大规模新能源接入后电网的稳定性。(e) 在交流电网的基础上建设交直流混合电网是未来电网的发展趋势，而 PET 的直流环节无疑使其非常适合直流电的接入，加深其对于直流电接入后的电压等级转换研究，无疑可以提升 PET 的实用性。

参考文献

[1] 钱照明，张军明，盛况．电力电子器件及其应用的现状和发展[J]．中国电机工程学报，2014，34(29): 5149-5161.
QIAN Zhaoming, ZHANG Junming, SHENG Kuang. Status and development of power semiconductor devices and its applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5149-5161.

[2] RAM G, PRASANTH V, BAUER P. Comparative analysis of on-load tap changing (OLTC) transformer topologies[C] // 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, September 21-24, 2014, Antalya, Turkey: 918-923.

[3] 卢林煜，王鲁杨，柏扬，等．面向能源互联网的固态变压器中双有源桥直流变换器研究[J]．电力系统保护与控制，2019, 47(6): 141-150.
LU Linyu, WANG Luyang, BAI Yang, et al. Research on dual-active-bridge DC-DC converter in solid state transformer for energy internet[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 141-150.

[4] DANNIER A, RIZZO R. An overview of power electronic transformer: control strategies and topologies[C] // International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, June 20-22, 2012, Sorrento, Italy: 1552-1557.

[5] WANG Jianhua, LUO Fangfang, DUAN Qing, et al. Power electronic transformer with adaptive PLL technique for voltage-disturbance ride through[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 6(5): 1090-1102.

[6] ZHAO Q. Design of non-contact on-load automatic regulating voltage transformer[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2015, 22(3): 91-96.

[7] COOKE G H, WILLIAMS K T. New thyristor assisted diverter switch for on load transformer tap changers[J]. IEE Proceedings B-Electric Power Applications, 1992, 139(6): 507-511.

[8] COOKE G H, WILLIAMS K T. Thyristor assisted on-load tap changers for transformers[C] // 1990 Fourth International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives, 1990, London, UK: 127-131.

[9] NAGARAJAN R, TALEGAONKAR R. Green tap changer-OLTC filled with ester oil[C] // 2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), June 25-29, 2017, Manchester, UK: 1-6.

[10] 符雪鹏，苑东升．一种应用在自耦变压器中的带偏压绕组的有载调压方式[J]．变压器, 2017, 54(8): 11-14.
FU Xuepeng, YUAN Dongsheng. On-load voltage regulation mode with bias winding in auto-transformer[J]. Transformer, 2017, 54(8): 11-14.

[11] DIGGLE H. Applications and construction of transformer on-load tap-changing gear[J]. Journal of the Institution of Electrical Engineers, 1937, 81(489): 330-349.

[12] 王丰华，樊家昊，郑一鸣，等．真空灭弧 OLTC 与油灭弧 OLTC 的振动特性对比[J]．高电压技术, 2019, 45(9): 2834-2841.
WANG Fenghua, FAN Jiahao, ZHENG Yiming, et al. Vibration characteristic comparison between vacuum arcing on-load tap-changer and oil blast on-load[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2834-2841.

[13] 宋祺鹏，秦开明，戚振彪，等．基于电子开关的高精度宽幅有载调压配电变压器研究[J]．电网技术，2018, 42(9): 3055-3060.
SONG Qipeng, QIN Kaiming, QI Zhenbiao, et al. Research on high accuracy and wide range OLTC transformer based on power electronic technology[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 3055-3060.

[14] MOULI G R C, BAUER P, WIJEKOON T, et al. Design of a power-electronic-assisted OLTC for grid voltage regulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1086-1095.

[15] 赵玉林，李海凤，牛泽晗，等. 配电变压器无触点有载自动调压的一种新方案[J]. 电网技术，2016，40(12): 3888-3893.
ZHAO Yulin, LI Haifeng, NIU Zehan, et al. A new scheme of contactless on-load automatic voltage regulation for distribution transformers[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3888-3893.

[16] MAHENDAR G, YESURATNAM G. An approach to identify critical on load tap changing (OLTC) transformers under network contingencies[C] // 2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON), November 25-27, 2016, Bikaner, India: 1-6.

[17] 宋开胜，马宏忠，王华芳，等. 基于晶闸管的分段式快速调压模型的设计[J]. 电力系统保护与控制，2019，47(7): 135-141.
SONG Kaisheng, MA Hongzhong, WANG Huafang, et al. Design of a segmented rapid voltage regulation model based on thyristors[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 135-141.

[18] WIJEKOON T, BAERTHLEIN E, PANOSYAN A, et al. Design, simulation and testing of semiconductor assisted OLTC for a grid voltage regulator[C] // 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 14-18, 2014, Pittsburgh, PA, USA: 5675-5681.

[19] KHIAR M S A, THAYOOB Y H M, GHAZALI Y Z Y, et al. Diagnosis of OLTC via Duval triangle method and dynamic current measurement[J]. Procedia Engineering, 2013, 68: 477-483.

[20] DE OLIVEIRA QUEVEDO J, et al. Analysis and design of an electronic on-load tap changer distribution transformer for automatic voltage regulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(1): 883-894.

[21] GARCIA S M, RODRIGUEZ J C C, JARDINI J A, et al. Feasibility of electronic tap-changing stabilizers for medium voltage lines — precedents and new configurations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1490-1503.

[22] 李晓明，王琬晴，张水长，等. 一种无弧快速有载调压模型及仿真[J]. 高电压技术, 2006, 32(2): 24-26, 69.
LI Xiaoming, WANG Wanqing, ZHANG Shuichang, et al. Arcless and fast response OLTC model and its simulation[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(2): 24-26, 69.

[23] 吴勇海，蔡金锭. 中压配电网串联电容补偿调压技术研究及应用[J]. 电力系统保护与控制，2012，40(13): 140-144.
WU Yonghai, CAI Jinding. Study and application of voltage regulation technology by series capacitance compensation in medium voltage distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 140-144.

[24] LOKHANDE N M, KULKARNI S, GHONE V, et al. Design and implementation of triac based on load tap changer with primary tappings for constant output voltage[C] // 2017 2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT), April 7-9, 2017, Mumbai, India: 106-109.

[25] FERNÁNDEZ S M, GARCÍA S M, OLAY C C, et al. Electronic tap changer for very high-power medium-voltage lines with no series-parallel thyristors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(7): 5237-5249.

[26] 赵刚，施围. 无弧有载分接开关的研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 49-51.
ZHAO Gang, SHI Wei. Study on arcless on-load tap changer[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(4): 49-51.

[27] 潘诗锋，赵剑锋. 电力电子变压器及其发展综述[J]. 江苏电机工程, 2003, 22(6): 52-54.
PAN Shifeng, ZHAO Jianfeng. Summary of development of power electronic transformer[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2003, 22(6): 52-54.

[28] ECHAVARRIA R, CLAUDIO A, COTOROGEA M. Analysis, design, and implementation of a fast on-load tap changing regulator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 527-534.

[29] 徐涛，康海珍，张振程，等. 功率型负荷的调压控制方式对负荷端电压稳定的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 9-12.
XU Tao, KANG Haizhen, ZHANG Zhencheng, et al. Influence of voltage regulating and control mode for power type load on voltage stability of load side[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 9-12.

[30] SEO J, MA H, SAHA T K. Analysis of vibration signal for power transformer on-load tap changer (OLTC) condition monitoring[C] // 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), August 5-10, 2018, Portland, OR, USA: 1-5.

[31] 陈旭，王淮宁，孙立群，等. 油气套管连接的变压器绕组变形试验差异分析[J]. 电力工程技术，2017，36(4): 70-74, 85.
CHEN Xu, WANG Huaining, SUN Liqun, et al. Difference analysis of oil-gas bushing-connected transformer winding deformation test[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 70-74, 85.

[32] 刘雪丽，李金忠，高飞，等. ±800 kV 换流变压器用真空式有载分接开关关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5350-5356, 5417.
LIU Xueli, LI Jinzhong, GAO Fei, et al. Key technology research for vacuum type on-load tap-changer of ±800 kV direct current convertor transformers[J]. Proceedings of

the CSEE, 2016, 36(19): 5350-5356, 5417.

[33] 李晓明，黄俊杰，尹项根，等．平滑无冲击电力电子有载调压装置[J]．电力系统自动化, 2003, 27(20): 45-48.
LI Xiaoming, HUANG Junjie, YIN Xianggen, et al. Research of smooth and non-impact power electronics OLTC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 45-48.

[34] GU C, ZHENG Z, 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.

[35] WANG D, TIAN J, MAO C, et al. A 10-kV/400-V 500-kVA electronic power transformer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(11): 6653-6663.

[36] ZHANG G, CHEN J, ZHANG B, et al. A critical topology review of power electronic transformers: in view of efficiency[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2018, 4(2): 90-95.

[37] KRISHNASWAMI H, RAMANARAYANAN V. Control of high-frequency AC link electronic transformer[J]. IEE Proceedings - Electric Power Applications, 2005, 152(3): 509-516.

[38] AHMED H F, CHA H, KHAN A A, et al. A highly reliable single-phase high-frequency isolated double step-down AC–AC converter with both noninverting and inverting operations[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(6): 4878-4887.

[39] LEI E, YIN X, ZHANG Z, et al. An improved transformer winding tap injection DSTATCOM topology for medium-voltage reactive power compensation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2113-2126.

[40] 朱代祥，丁明．一种用于光伏电站的电力电子变压器[J]．太阳能学报, 2015, 36(5): 1206-1211.
ZHU Daixiang, DING Ming. A power electronic transformer for solar generation[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(5): 1206-1211.

[41] WANG D, MAO C, LU J. Coordinated control of EPT and generator excitation system for multidouble-circuit transmission-lines system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 371-379.

[42] RAHMAN M T, OTHMAN M, MOKHLIS H, et al. Optimal fixed charge-rate coordination of plug-in electric vehicle incorporating capacitor and OLTC switching to minimize power loss and voltage deviation[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2018, 13(7).

[43] ZHU T X, TSO S K, LO K L. An investigation into the OLTC effects on voltage collapse[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 515-521.

[44] 赵玉林．配电变压器无触点有载调压中反并联晶闸管光纤触发方案[J]．电力系统自动化，2013，37(20): 97-101.
ZHAO Yulin. Optical trigger scheme of inverse-parallel thyristor in contactless on-load tap-changing voltage for distribution transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 97-101.

[45] 黄俊杰，李晓明．电力电子有载调压装置的控制系统设计[J]．电力自动化设备, 2003, 23(7): 54-57.
HUANG Junjie, LI Xiaoming. Design of automatic system for power electronics OLTC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(7): 54-57.

[46] LI Z, LI Q, WU Z, et al. A fault diagnosis method for on load tap changer of aerospace power grid based on the current detection[J]. IEEE Access, 2018, 6: 24148-24156.

[47] 谭黎军，侯铁男，贾贺强．有载调压电力变压器粗细调和正反调的性能和经济分析[J]．变压器，2006(8): 23-26.
TAN Lijun, HOU Tienan, JIA Heqiang. Analysis of performance and economy of on-load-tap-changing transformer with coarse fine and reversing change-over voltage regulation[J]. Transformer, 2006(8): 23-26.

[48] 边庆恺，王亚静，刘涛，等．一种新型粗细有载调压变压器的设计[J]．变压器, 2018(4): 1-5.
BIAN Qingkai, WANG Yajing, LIU Tao, et al. Design of a new type of on-load transformer with coarse-fine voltage regulation[J]. Transformer, 2018(4): 1-5.

[49] DUAN R, WANG F. Fault diagnosis of on-load tap-changer in converter transformer based on time-frequency vibration analysis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3815-3823.

[50] SEO J, MA H, SAHA T K. A joint vibration and arcing measurement system for online condition monitoring of onload tap changer of the power transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 1031-1038.

[51] LI Xiaoming, HUANG Junjie. Research of fast and non-impact on-load tap changing regulator for electrolytic process[C] // 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems, October 17-20, 2008, Wuhan, China: 4470-4474.

[52] SHAH D, CROW M L. Online volt-var control for distribution systems with solid-state transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 343-350.

[53] KHIAR M S A, MD THAYOOB Y H, GHAZALI Y Z Y, et al. Condition assessment of OLTC using Duval triangle and static winding resistance test[C] // 2012 IEEE

International Power Engineering and Optimization Conference, June 6-7, 2012, Melaka, Malaysia: 432-435.

[54] LIU J, YANG J, ZHANG J, 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.

[55] ERBRINK J J. Diagnosis of onload tap changer contact degradation by dynamic resistance measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2121-2131.

[56] 涂春鸣, 肖凡, 兰征, 等. 微电网中电力电子变压器的电压质量控制策略研究[J]. 电工电能新技术，2018, 37(6): 1-9.
TU Chunming, XIAO Fan, LAN Zheng, et al. Voltage quality control strategy for power electronics transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(6): 1-9.

[57] 张晓东，张大海. 电力电子变压器在电网故障中的控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报，2014, 26(1): 39-43.
ZHANG Xiaodong, ZHANG Dahai. Control strategy of power electronic transformer for power grid fault[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(1): 39-43.

[58] GU C, ZHENG Z, 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.

[59] ZHANG J, LIU J, YANG J, et al. A modified DC power electronic transformer based on series connection of full-bridge converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3): 2119-2133.

[60] YANG J, MAO C, WANG D, et al. Fast and continuous on-load voltage regulator based on electronic power transformer[J]. IET Electric Power Applications, 2013, 7(6): 499-508.

[61] 李响, 郝瑞祥, 游小杰, 等. 一种级联电力电子变压器直流电压平衡控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(2): 238-245.
LI Xiang, HAO Ruixiang, YOU Xiaojie, et al. A DC voltage balance control strategy for the cascaded power electronic transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2): 238-245.

[62] DUAN Q, WANG J, MA C, et al. Flexible power distribution unit — a novel power electronic transformer development and demonstration for distribution system[C] // IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, November 2015, Yokohama, Japan: 534-537.

[63] 宋冬冬, 程林, 林志法, 等. 有载分接开关中电力电子技术应用综述[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(8): 45-55.
SONG Dongdong, CHENG Lin, LIN Zhifa, et al. Review of application on power electronic technology in on-load tap changer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(8): 45-55.

[64] FAIZ J, SIAHKOLAH B. Differences between conventional and electronic tap-changers and modifications of controller[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1342-1349.

[65] GU C, ZHENG Z, 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.

[66] HASAN E O, HATATA A Y, BADRAN E A, et al. Voltage control of distribution systems using electronic OLTC[C] // 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), December 18-20, 2018, Cairo, Egypt: 845-849.

[67] GUAN S, WANG Q, WANG T, et al. Research on a new type of on-load automatic voltage regulation technology[C] // 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), March 25-26, 2017, Chongqing, China: 2541-2544.

[68] WANG X, LIU J, OUYANG S, et al. Research on unbalanced-load correction capability of two power electronic transformer topologies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(6): 3044-3056.

[69] FAN B, LI Y, WANG K, et al. Hierarchical system design and control of an MMC-based power-electronic transformer[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(1): 238-247.

[70] LIU J, YANG J, ZHANG J, 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.

[71] LIU Liming, LI Hui. Reactive power compensation and optimization strategy for grid-interactive cascaded photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(1): 188-202.

[72] 彭志炜，胡国根，韩祯祥. 有载调压变压器调整对电力系统电压稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报，1998, 18(6): 408-412, 442.
PENG Zhiwei, HU Guogen, HAN Zhenxiang. The power system voltage stability affected by on-load tap changer[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(6): 408-412, 442.

[73] WU W, TIAN Z, ZHANG B. An exact linearization

method for OLTC of transformer in branch flow model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2475-2476.

[74] MUTTAQI K M, LE A D T, NEGNEVITSKY M, et al. A coordinated voltage control approach for coordination of OLTC, voltage regulator and DG to regulate voltage in a distribution feeder[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1239-1248.

[75] 彭志炜，胡国根，韩祯祥. 有载调压变压器对电力系统电压稳定性影响的动态分析[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(2): 61-65, 78.
PENG Zhiwei, HU Guogen, HAN Zhenxiang. Dynamic analysis of the power system voltage stability affected by OLTC[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(2): 61-65, 78.

[76] OHTSUKI H, YOKOYAMA A, SEKINE Y. Reverse action of on-load tap changer in association with voltage collapse[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(1): 300-306.

[77] ZHU T X, TSO S K, LO K L. An investigation into the OLTC effects on voltage collapse[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 515-521.

[78] KIM Y J, KIRTLEY J L, NORFORD L K. Reactive power ancillary service of synchronous DGs in coordination with voltage control devices[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 515-527.

[79] BAO L, DUAN X, HE Y. Analysis of voltage collapse mechanisms in state space[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2000, 147(6): 395-400.

[80] ARSHAD A, LEHTONEN M. A stochastic assessment of PV hosting capacity enhancement in distribution network utilizing voltage support techniques[J]. IEEE Access, 2019, 7: 46461-46471.

[81] DARATHA N, DAS B, SHARMA J. Coordination between OLTC and SVC for voltage regulation in unbalanced distribution system distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 289-299.

[82] BAHADORNEJAD M, NAIR N C. Intelligent control of on-load tap changing transformer[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2255-2263.

[83] DYANTYI A, MBULI N, PRETORIUS J. Effect of the tap changer position of Zeus 765/400 kV transformer on the steady state and voltage stability performance of the Cape system[C] // 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2012, Venice, Italy: 563-567.

[84] 赵兴勇，张秀彬，何斌. 优化有载调压变压器改善电压稳定性的新算法[J]. 高电压技术，2007，33(10): 170-173, 182.
ZHAO Xingyong, ZHANG Xiubin, HE Bin. Novel algorithm of improving voltage stability by optimizing modification of OLTC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(10): 170-173, 182.

[85] LONG C, OCHOA L F. Voltage control of PV-rich LV networks: OLTC-fitted transformer and capacitor banks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 4016-4025.

[86] MA Zhaoxing, CHEN Hao, CHAI Yanli. Analysis of voltage stability uncertainty using stochastic response surface method related to wind farm correlation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 211-219. DOI: 10.1186/s41601-017-0051-3.

[87] SHIREK G J, LASSITER B A. Photovoltaic power generation: modeling solar plants' load levels and their effects on the distribution system[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2013, 9(12): 63-72.

[88] HE Jinghan, LIU Lin, DING Fanfan, et al. A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 102-110. DOI: 10.1186/s41601-017-0043-3.

[89] BATTU N R, SENROY N, ABHYANKAR A R. Effect of capacitors on frequency of OLTC tap changes in the presence of wind generation[J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2015, 16(4): 385-395.

[90] 李振坤，鲍新雨，邵宇鹰，等. 考虑多种调压措施的分布式光伏消纳能力研究[J]. 电力系统保护与控制，2018, 46(8): 10-16.
LI Zhenkun, BAO Xinyu, SHAO Yuying, et al. Studying accommodation ability of distributed photovoltaic considering various voltage regulation measures[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 10-16.

[91] KABIRI R, HOLMES D G, MCGRATH B P, et al. LV grid voltage regulation using transformer electronic tap changing, with PV inverter reactive power injection[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4): 1182-1192.

[92] LIU X, NIU X, ZHU Y, et al. Influence of regulation of OLTC transformation ratio on voltage stability[C] // 2013 Fourth International Conference on Digital Manufacturing & Automation, 2013, Qingdao, China: 696-700.

[93] 兰征，涂春鸣，肖凡，等. 电力电子变压器对交直流混合微网功率控制的研究[J]. 电工技术学报，2015, 30(23): 50-57.
LAN Zheng, TU Chunming, XIAO Fan, el at. The power

control of power electronic transformer in hybrid AC-DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 50-57.

[94] EKSTRÖM R, THOMAS K, LEIJON M. Fast solid-state on-load tap change using two current-controlled voltage-source inverters[J]. IET Power Electronics, 2014, 7(10): 2610-2617.

[95] YU X, SHE X, ZHOU X, et al. Power management for DC microgrid enabled by solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 954-965.

[96] 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.

[97] 钟声, 余晓峰, 吴海泉, 等. 220 kV 变压器成本敏感度及成本估算模型[J]. 广东电力, 2015, 28(6): 87-92.
ZHONG Sheng, YU Xiaofeng, WU Haiquan, et al. Research on cost sensitivity and cost estimation model of 220 kV transformer[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(6): 87-92.

[98] 黄延曼, 林煜. 变压器阻抗保护缺陷的分析[J]. 广东电力, 2002, 15(5): 27-29.
HUANG Yanman, LIN Yu. Analysis on defects of impedance protection for transformer[J]. Guangdong Electric Power, 2002, 15(5): 27-29.

[99] RANAMUKA D, AGALGAONKAR A P, MUTTAQI K M. Online voltage control in distribution systems with multiple voltage regulating devices[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 617-628.

[100] 张祥龙, 周晖, 肖智宏, 等. 电力电子变压器在有源配电网无功优化中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 80-85.
ZHANG Xianglong, ZHOU Hui, XIAO Zhihong, et al. Power electronic transformer applied to optimization of reactive power in active distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 80-85.

收稿日期：2019-08-11；　　修回日期：2019-11-06

作者简介：

王　鹤(1983—)，男，博士，研究方向为新能源发电经柔性直流输电外送、大规模分布式光伏发电接入配电网的运行控制、主动配电网和微电网运行控制等；E-mail: wanghe_nedu@163.com

栾钧翔(1994—)，男，硕士研究生，主要研究方向为有载调压对电力系统稳定性的影响。E-mail: 516398243@qq.com

(编辑 周金梅)