

「变压器」

配电系统固态变压器拓扑综述

文/韶关供电局 陈 丽

2010年, 固态变压器被美国麻省理工学院 (MIT) 评为10个新型技术之一。固态变压器是一种结合了电力电子变换器和高频变压器而构成的电能变换装置。固态变压器除了具有传统变压器的电压变换和电气隔离功能外, 还具备无功补偿、谐波治理等功能, 另外具有功率密度高、可控性好、兼容性强和智能化等特点, 可在智能电网、铁路牵引和新能源并网等场合使用。结合新近的研究成果, 介绍了相关拓扑结构、工作原理以及各个电路拓扑的性能优缺点。

能源互联网有3个关键技术, 即插即用的功率接口、能源路由器和基于开放通信协议 (如TCP/IP或HTML) 的操作系统。能源互联网将由大量分布式可再生能源发电和储能组成, 而能源路由器的作用就是连接并管理这些设备。

在最近的十年里, 一种高功率、多功能转换器, 被命名为固态变压器 (solid-state transformer, SST), 也称为电力电子变压器 (power electronic transformer, PET), 或万能变压器 (intelligent universal transformer), 已引起广泛关注。

固态变压器不仅拥有传统变压器的所有功能, 还拥有电压调节、无功补偿、谐波治理和频率变换等功能, 可提供多端口 (不同电压和频率、直流/交流), 并管理、监控这些端口, 完成能源路由器的功能。

固态变压器的发展

1970年, GE公司的W.McMurray第一次提出了具有高频链接的AC/AC变换电路拓扑, 并申请了专利, 如图1所示。这实质上是一种相控变换装

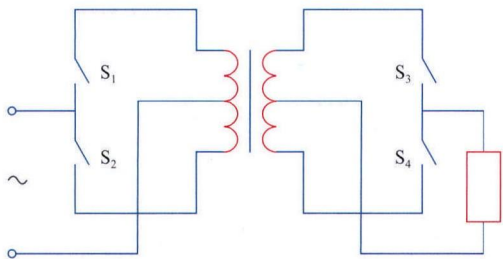


图1 具有高频链接的变换电路

置, 工作时, S1、S2高频交替导通, 输入的低频交流或者直流信号被调制成高频信号, 再经过变压器耦合到输出侧, 输出侧开关S3、S4的开关通过移相调节将输入侧的输入信号再进行还原。这种高频变换原理成为了固态变压器的基本原理。

根据电能变换次数, 固态变压器拓扑大体可以分为3类, 即单级型、双级型和三级型。

单极型固态变压器功能比较单一, 网侧不具备功率因数校正功能, 且对一次侧与二次侧开关信号的同步性要求非常苛刻, 双级型固态变压器在简化结构方面比单级型差, 在可控性方面却不如三级型, 所以双级型这一结构并不是很适合作为固态变压器拓扑结构。

随着电力电子技术应用技术的发展, 以及级联静态同步补偿器 (STATCOM) 和高压直流 (HVDC) 技术的广泛应用, 为固态变压器积累了丰富的经验。为了实现固态变压器的灵活控制、多样功能, 并满足配电网在高压大容量要求, 在固态变压器的结构中增加直流变换环节和采用级联形式已经成为共识。其中H桥级联和模块化多电平换流器 (MMC) 非常适合电力系统高压大功率领域的应用。

对于固态变压器, 目前已经有相关应用。2009年UNIFLEX研发的3.3 kV的300 kV·A三相固态变压器成功应用于智能电网, 转换效率达到92%。2012年美国电力研究协会 (electric power research institute, EPRI) 研制的2.4 kV的45 kV·A单相固态变压器成功应用于直流充电站, 转换

效率达到96%；2011年GE公司研制的13.8 kV的1 MV·A单相固态变压器应用于变电站，转换效率达到98%；2012年ABB公司研制的15 kV的1.2 MV·A单相固态变压器成功应用于铁路牵引，转换效率达到96%。

三级型拓扑

1. 单相级联固态变压器

目前研制成功的样机在高压侧基本上都采用了H桥级联，面向中高压配电网的固态变压器样机基本为单相结构。图2所示为FREEDM中心研制的固态变压器的拓扑结构。AC/DC级采用H桥级联，

相当于STATCOM，所以能完成STATCOM的所有功能；DC/DC级采用双主动全桥（dual-active-bridge, DAB），实现电气隔离以及功率的双向流动；DC/AC级采用三相全桥逆变器，直流端口可以连接新能源，交流侧可以连接配电网系统。这是最典型的固态变压器结构。

2. 三相级联固态变压器

为满足大功率应用场合的需求，一般需要三相SST。而利用已有的SST电路拓扑在构成三相SST时需要三套单相的SST。根据低压侧三相连接方式，分为单独相连接（SPC）和交叉相连接（CPC），如图3所示（以功率单元为H桥为例）。

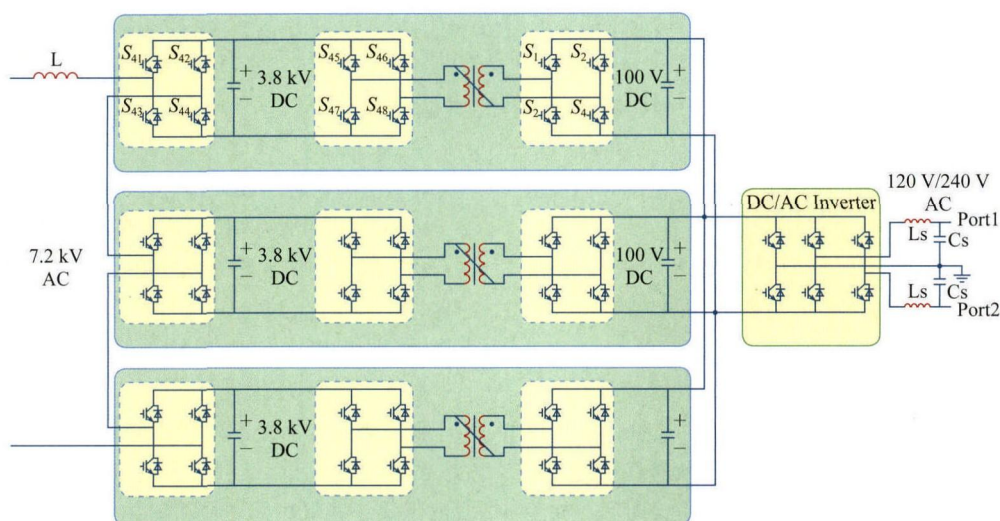


图2 单相级联固态变压器拓扑

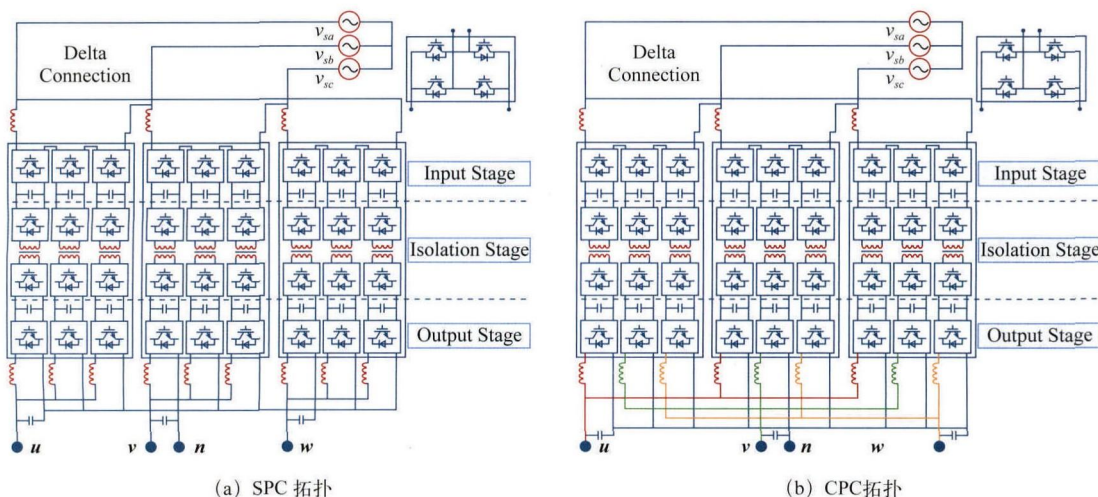


图3 三相级联固态变压器拓扑

相对于单相SST，三相SST容量可以做到更大，特别是能治理电网不平衡，这是单相SST不具备的功能。

3. 基于MMC的固态变压器

一种基于MMC的新型拓扑如图4所示。该SST由高压交流侧的MMC、中间的输入串联输出并联

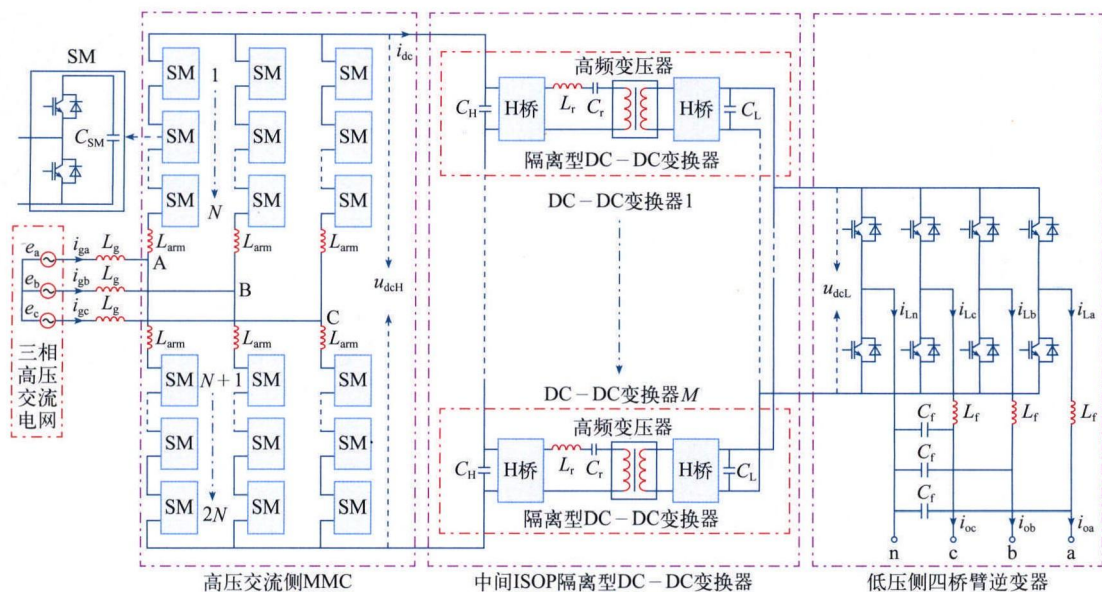


图4 基于MMC的固态变压器电路拓扑

(input series output parallel, ISOP) 的DAB以及低压侧的三相四桥臂逆变器构成。

相对三相H桥级联拓扑（图2）来说，基于MMC的拓扑结构（图4）具有如下的特点和优势。

- 1) 可提高直流输出电压质量。
- 2) 可显著减少高频变压器的数量
- 3) 可减少电力电子开关器件的数量。

基于MMC的拓扑结构的主要优势在于DC/DC级，因为DC/DC级三相共用一条直流母线，减少了DAB数量，而在高压整流级则比H桥级联复杂很多，虽然每个功率单元的功率器件数量减少，但是功率单元数量明显增加，整机体积相对更大，

控制相对更为复杂。IGBT的使用量明显增加。所以基于MMC的拓扑结构不适用于单相固态变压器。

由于拥有高压直流母线，基于MMC的固态变压器是交直流混合输配电的理想变压器，交直流混合输电的设想最初在输电技术领域提出。

4. 低压固态变压器

低压固态变压器不需要级联来达到高压的目的，结构相对简单，应用范围也很广，如优质电力园区等。某低压固态变压器拓扑结构如图5所示。由于没有高压侧，成本相对很低，所以很容易设计和方便试验，对于研究固态变压器的一些性能研究与试验，使用这个拓扑结构非常有优势。

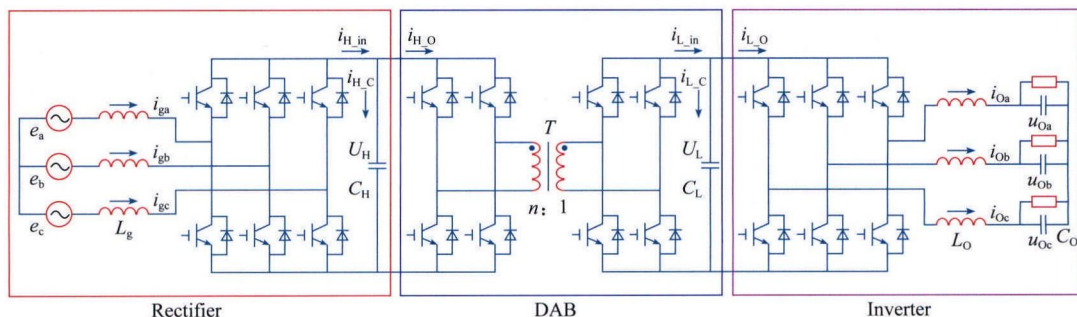


图5 某低压固态变压器拓扑结构

直流固态变压器

图6为直流固态变压器（DCSST）的拓扑结构，它由 n 个完全相同的DAB模块组成，每个DAB模块由两个全桥、一个高频隔离变压器构成。 n 个

DAB模块在高压侧串联接入HVDC母线，而在低压端以并联方式接入低压直流（LVDC）母线。

对比图4与图6，可以发现，将基于MMC的固态变压器拓扑结构中的直流母线左侧的MMC去

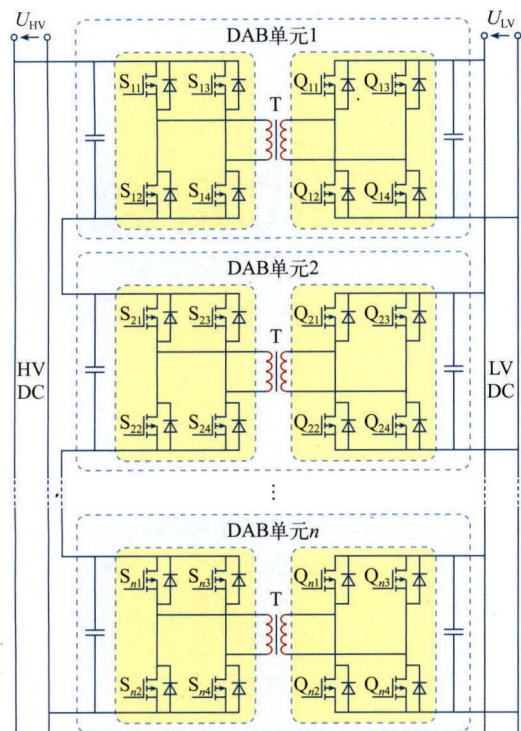


图6 直流固态变压器的拓扑结构

掉，就跟图6的直流固态变压器完全一样。

直流固态变压器可以应用于柔性直流配电系统，通过直流固态变压器，可以连接直流输电系统和直流配电系统，方便新能源的接入。

事实上，直流固态变压器只有一级，既DC/DC级，在低压直流微电网中，DAB模块本身就可以作为一个最基本的DCSST。

性能比较

1. 功能比较

对于以上几种固态变压器，二次侧功能基本都相同，图6中直流固态变压器也可以增加交流输出口，所以这里只对一次侧功能进行比较，如表1所示。

表1 SST实现功能比较

一次侧功能	单相级联	三相级联	基于MMC	直流	低压
电压变换	✓	✓	✓	✓	×
电压调节	✓	✓	✓	✓	✓
无功补偿	✓	✓	✓	—	✓
谐波补偿	✓	✓	✓	—	✓
三相不平衡	×	✓	✓	—	✓

从表1中可以看出，三相级联型固态变压器和基于MMC的固态变压器功能最为丰富。直流固态变压器因没有交流母线，所以没有无功、谐波和三相不平衡等问题。

2. 应用场合

对于单相固态变压器，非常适用于单相供电的机车牵引，本身具备的电压调节能力，可以保证输出的电压质量。

能量双向流动的低压固态变压器在智能家居（smart home）领域拥有广阔的应用前景，可借鉴模块化有源电力滤波器（APF）模块化的设计理念，成本低，方便并联扩容，在提高用电质量的同时，不会为电网带来无功、谐波和负序等电能质量问题。

三相固态变压器，适用于大功率场合，解决三相不平衡以及其他电能质量问题。

直流固态变压器可以应用于直流柔性配电系统。

3. 成本比较

因为应用场合不同，所以结构会有所不同，成本也会有很大的差异，需根据具体应用环境进行比较。

4. 控制复杂程度比较

SST控制复杂程度比较如表2所示。

表2 SST控制复杂程度比较

	单相级联	三相级联	基于MMC	直流	低压
控制	☆☆	☆☆	☆☆	☆☆	☆☆
复杂程度	☆☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆	☆☆

这里复杂程度是指完成相应功能需要的控制，主要对高压侧的三相不平衡、无功补偿、谐波治理和模块直流电压均压，低压侧的逆变器控制。

结束语

综上所述，固态变压器基本都采用三级型（直流固态变压器除外），都使用了高频变压器和DAB结构，主要是因为高频变压器的体积小，传输效率高，以及DAB能实现能量双向流动。

虽然固态变压器较传统变压器有很多优势，但损耗大、可靠性低、成本高和短路特性等都是固态变压器的弱点。但是固态变压器由于拥有传统电力变压器所不具备的强大功能和诸多优点，随着电力电子器件技术的发展和电力电子变换技术的进步，固态变压器造价会逐渐降低，可靠性会逐步提高，效率会不断提升，取代传统变压器成为可能，而控制灵活、功能强大的特点也使得固态变压器具有更广阔的应用前景。EA

（收稿日期：2016.05.05）

（编辑：刘群鑫）