

# 电力电子变压器的应用研究

白杰

(东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 介绍了电力电子变压器的工作原理及其主要拓扑结构, 分析了电力电子变压器在分布式电源并网、配电网供电质量改善方面的应用技术, 并研究了相应的控制策略。电力电子变压器和柔性交流输电技术相结合, 可以实现很多新的功能, 具有良好的应用前景。

**关键词:** 电力电子变压器; 分布式电源; 配电网; 柔性交流输电技术

**中图分类号:** TM41    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1007-3175(2009)11-0014-05

## Application Research of Power Electronic Transformer

BAI Jie

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Introduction was made to the operational principle of power electronic transformer and its topology. The application technology of power electronic transformer in connecting the distributed power and improving the quality of distribution network was analyzed. The corresponding control strategy was also researched. The connecting of power electronic transformer and flexible AC transmission technology can achieve a lot of new functions. So it has a good application prospect.

**Key words:** power electronic transformer; distributed power; distribution network; flexible AC transmission technology

### 0 引言

近年来随着经济的稳步发展, 电力供应缺口与人们对电力的需求增长之间的矛盾越来越明显。由于我国常规能源资源的有限性和环保的巨大压力, 能源建设必须走节电和开发利用可再生能源之路。分布式发电系统、电能质量控制的研究和开发得到了人们普遍的关注。其次, 越来越多的工业用户对电能质量以及供电可靠性提出了更高的要求。如何保证供给用户可靠和合乎标准的电能, 确保用户电气设备的安全经济运行已成为急需解决的课题。

随着大功率电力电子元器件及其控制技术的发展, 一种通过电力电子变换实现电力系统中的电压变换和能量传递的新型变压器——电力电子变压器(Power Electronic Transformer, PET)得到了越来越多的关注。电力电子变压器是一种含有电力电子变换器且通过高频变压器实现磁耦合的变电装置, 它通过电力电子变换技术和高频变压器实现

电力系统中的电压变换和能量传递。其突出特点在于它可以实现对变压器原副方电压幅值和相位的灵活控制, 可以满足未来电力系统很多新的要求。因此, 作为输配电系统最基本的组成设备, 这种新型变压器具备解决电力系统中面临的许多新课题的潜力, 有广阔的应用前景。

### 1 电力电子变压器的工作原理和实现方案

电力电子变压器主要是采用电力电子技术实现的, 其实现过程如图1所示。其基本原理为在原方将工频信号通过电力电子电路转化为高频信号, 即升频, 然后通过中间高频隔离变压器耦合到副方, 再还原成工频信号, 即降频。通过采用适当的控制方案来控制电力电子装置的工作, 从而将一种频率、电压、波形的电能变换为另一种频率、电压、波形的电能。因高频变压器起隔离和变压作用, 而铁心式变压器的体积与频率成反比, 所以高频变压器的体积远小于工频变压器, 其整体效率高<sup>[1-2]</sup>。

**作者简介:** 白杰(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

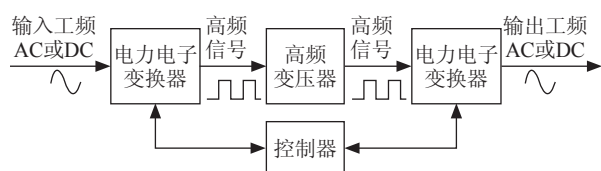


图1 电力电子变压器工作原理

利用不同结构的电力电子变换器, 研究者们已经提出了多种PET的实现拓扑电路。在这些实现方案中, 从在电力电子变换过程中是否存在中间直流环节来看, PET实现方案可以归结为两大类: 一种是在变换过程中不含直流环节, 即直接AC/AC变换, 如图2 a)所示; 另一种是在变换过程中存在直流环节, 即AC/DC/AC变换如图2 b)所示。

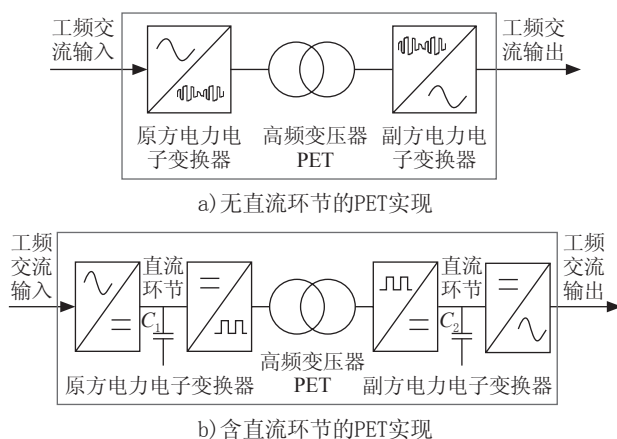


图2 PET的两类实现原理

参考文献[3]提出了一种典型的直接AC/AC变换型PET的实现方案, 其工作原理为: 工频信号首先被变换为高频信号(600 Hz~1.2 kHz)后通过隔离变压器耦合到其副方, 高频信号随后又被同步还原为工频信号, 当调整相移角 $\theta$ 时也可以有限度地改变输出电压基波的幅值, 但此时需额外加装输出滤波器。

参考文献[4]提出了一种最具有代表性的含直流环节的PET的电路结构, 这是一种双直流结构, 其工作过程为: 工频交流输入经三相全控整流器变换为直流, 再通过一个单相全桥逆变电路被调制成为高频方波后加载至高频变压器; 在变压器副方, 高频方波还原为直流电压后再逆变为所需的交流输

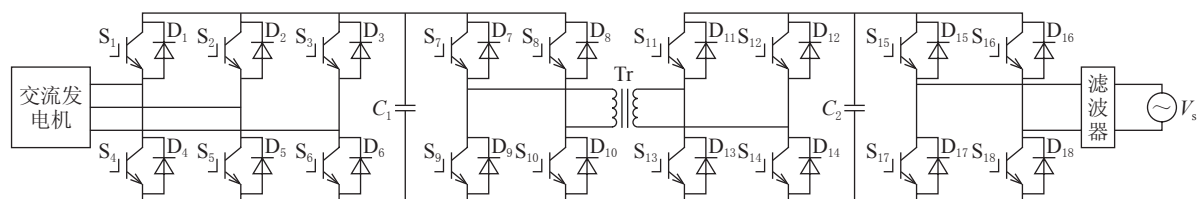


图4 风力和小水电单相并网逆变器结构图

出。该结构可以实现输入端功率因数校正, 同时可以抑制谐波的双向流动。

## 2 电力电子变压器在分布式电源并网中的应用

近年来, 分布式发电系统已成为重要的能源。分布式电源交直流兼有, 容量小, 分布广, 且其电压或频率波动性较大。传统逆变器采用工频变压器, 成本高, 体积大, 逆变效率难以提高, 同时需要额外的调压、调频设备才能保证供电质量。PET交直流环节兼有, 可灵活地将各种分布式电源接入电力系统, 另外由于能对整流、逆变部分进行控制, 可省去额外的调压、调频设备, 降低了成本<sup>[5-6]</sup>。图3为可再生能源并网发电系统组成结构图。

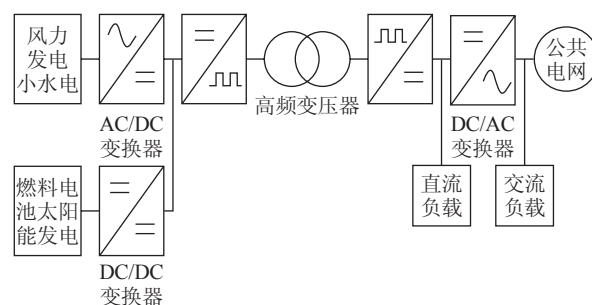


图3 可再生能源并网发电系统组成结构图

可再生能源有多种形态, 且转化为电能的方式不同, 决定了可再生能源在转化为直流电能时有不同的直流侧处理电路, 如光伏发电需使用DC/DC电路, 而风力发电则需使用AC/DC电路。然后经过电力电子变压器的隔离环节, 将直流电转化为高频交流电。通过高频变压器耦合到副方, 再整流成直流电压。高频变压器主要实现电压等级变换和分布式发电系统与电网的电气隔离作用。最后通过逆变器实现和公用电网并网。

采用电力电子变压器实现的风力和小水电单相并网逆变器结构如图4所示, 该结构为交-直-交-直-交型双直流环拓扑。

输入环节为三相电压型PWM整流电路,将交流发电机的交流电变为直流,且实现直流输出电压可控、单位功率因数运行。对PWM整流电路可以采用电压外环、电流内环的双闭环控制方案<sup>[7]</sup>。电压外环是为了实现对输出电压的控制,电流内环是为了实现单位功率因数控制。为了获取快速的动态响应,电流环可以采用直接电流控制技术,电压环采用常规的PI控制。为了方便地实现有、无功电流的解耦控制,直接电流控制方案是基于同步旋转 $d-q$ 坐标系实现。在外环,反馈的直流电压与参考值比较后形成偏差电压,经控制器调节后作为 $d$ 轴电流分量(为有功分量)的参考值 $i'_d$ , $q$ 轴电流分量(为无功分量)的参考值可以根据功率因数的需要人为给定( $i'_q$ 给定为0,作为单位功率因数运行)。三相输入电流转换到 $d-q$ 轴系得到 $i_d$ 和 $i_q$ ,与参考值比较后得到的电流偏差量经电流PI调节器形成 $d-q$ 轴系中的调制信号,经变换后得到 $a-b-c$ 轴系的调制信号,传送给PWM发生器,形成控制脉冲序列。图5为输入级控制原理图。图中 $T(\theta)$ 为三相静止 $a-b-c$ 坐标系到旋转 $d-q$ 坐标系的变换阵,其定义为:

$$T(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin\theta & \sin(\theta-120^\circ) & \sin(\theta+120^\circ) \\ \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

其中, $\theta = \omega t$ , $\omega$ 为同步旋转角速度; $T^{-1}(\theta)$ 为其逆变换; $U_{dc}$ 为直流母线电压; $U'_{dc}$ 为参考值。

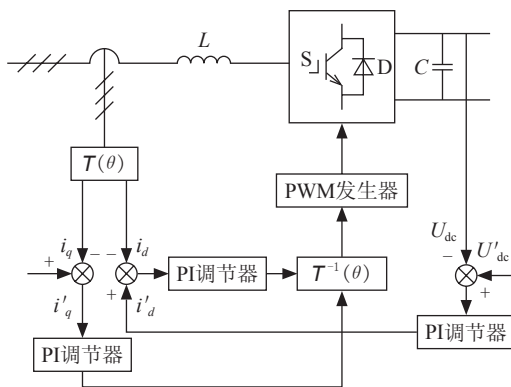


图5 输入级控制原理图

对于并网逆变器的隔离环节,高频变压器原边的单相逆变电路,在开关损耗允许和变压器磁芯允许的范围内,逆变器输出频率越高,变压器的体积和重量越小,只须达到高频逆变目的即可。对于变压器副边整流电路,只要能实现高频整流即可。因

此,变压器原边逆变电路和副边整流可以用开环控制方式实现,将直流调制成占空比为50%的高频方波,变压并耦合到高频变压器的副方绕组后再同步整流还原成直流。

输出环节为单相PWM逆变器,逆变器并网运行的目标:一是逆变器能够与电网稳定地并联运行,二是能将可再生能源以高功率因数回馈电网。为了使系统在并网工作时功率因数近似为1,则必须要求逆变器输出的并网电流为正弦波,且和电网电压同频率、同相位。多数并网逆变器对输出电流的控制是采用瞬时值控制方案。先进的瞬时值控制一般采用闭环反馈,最典型的是输出滤波电感电流反馈构成的电流跟随控制逆变器。比较常见的电流跟随控制技术有电流滞环瞬时值控制技术和电流正弦脉宽调制(SPWM)瞬时值控制技术。

对逆变器输出电流的控制,可以采用固定载波频率的SPWM强迫电流跟踪方式,控制框图如图6所示。其控制过程是:将与市电电压同频同相的参考电流给定值 $i'_c$ 与实际的并网电流瞬时反馈值 $i_c$ 进行比较,差值 $\Delta i$ 通过PI调节器处理,与引入的市电电压前馈补偿值相加后,得到的值经SPWM调制,输出正弦波脉宽调制信号,经驱动电路放大,驱动功率电子开关器件工作,产生与电网同频同相位的正弦波电流。这里加入市电电网电压的前馈控制,还可使电网电压对输出电流的影响为零。

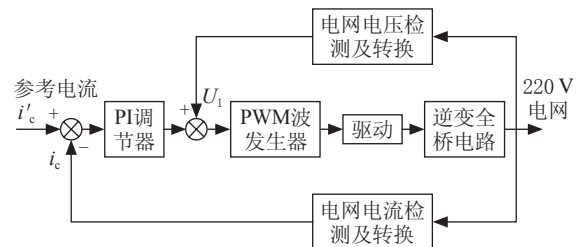


图6 输出级控制原理图

### 3 电力电子变压器在配电网中的应用

在配电网中,配电线路经常会出现各种电压扰动,如电压骤升、骤降、闪变、波动等。对于对电压敏感的负荷,如电脑、通信设备等,经常会造成巨大损失,如珍贵数据的丢失、通信的中断等。传统的动态电压恢复器可以解决配电线路电压扰动的问题,但是传统的动态电压恢复器用一个可调自耦变压器和隔离变压器去对系统注入一个补偿电压,这



种结构不但动态响应比较慢,而且大的工频变压器也是其主要缺点,工频变压器不仅体积大、成本高,而且变换效率低。

这里介绍一种基于电力电子变压器的动态电压恢复器。该动态电压恢复器分为三级,输入级为三相半桥PWM整流器,可以从电网中获取能量,从而实现可连续运行,可以使得整流器电网侧电流正弦化,大大降低低次谐波,实现单位功率因数运行。隔离级采用高频变压器来实现隔离、变压和能量传递,高频变压器原方的电压源变换器将直流电调制为交流电,通过高频变压器耦合到副方,然后通过副方的电压源变换器进行同步解调,还原为直流电。输出级采用三个单相电压源逆变器并联的模式,每个单相逆变器连接LC滤波器,通过电容器将补偿电压耦合到各相中去,实现对各相电压的调节。这种基于电力电子变压器的动态电压恢复器的工作原理为利用传感器、检测电路检测出电源侧电压;通过控制电路产生补偿给定信号;由SPWM形成PWM信号;再由驱动电路去控制电压型逆变器的功率开关;最后通过滤波器滤除高次电压谐波,在串联电容器上产生与畸变分量相反的补偿电压,从而提高负载侧的电能质量,使电能质量敏感负荷免受电压跌落、不对称、闪变、波动及谐波的影响。

该动态电压恢复器的输入级的三相半桥PWM整流器用于实现三相高频整流,在理论上,不但可以实现输入电流正弦,且可以实现原方输入功率因数可控、直流输出电压可控。输入级高频整流一般需要采用双环控制,即直流电压外环和交流电流内环,这和分布式电源并网逆变器结构中输入级PWM整流器的控制方式是一样的。

隔离级作用是将输入级的高压直流调制成中频方波信号,经中频变压器变压并耦合到副方后再转换成低压直流。这一级实现隔离及直流降压功能。采用开环控制,由PWM技术调制直流电压成高频方波,耦合到中频变压器副方后再同步解调成直流。

输出级的三个单相电压源逆变器通过电容器将补偿电压耦合到各相线路中去。可以采取复合控制方式,同时检测电网侧和负载侧电压作为电压补偿指令<sup>[8]</sup>,控制策略分析如图7所示。 $U_s$ 为电网侧电压, $U_p$ 为负载侧电压。 $G_s(s)$ 为检测电网侧电压补偿指令传递函数,其输出包括电压谐波和

电压跌落; $Gl(s)$ 为检测负载侧电压补偿指令传递函数, $k'$ 为放大系数; $Gg(s)$ 为补偿电压发生器传递函数,可以看成是一个时间常数很小的一阶惯性系统; $G_b(s)$ 为变压器传递函数。在补偿电压指令中,检测电网侧电压形成的指令部分主要完成电压谐波补偿,有利于提高控制的稳定性和动态响应能力,而检测负载侧电压形成的指令部分能修正变压器内阻和漏抗对副边输出电压的影响,可以不需要很大的 $k'$ 值。显然,将电网侧电压检测和负载侧电压检测结合在一起形成的复合控制策略,能兼具前馈和反馈控制策略的优点,改善电压补偿效果。

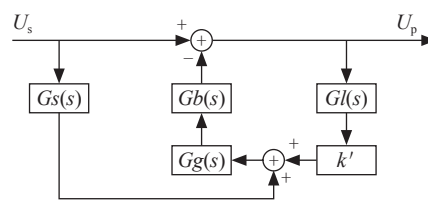


图7 输出侧的控制原理图

#### 4 电力电子变压器与柔性交流输电技术的结合应用

电力电子变压器可以比较容易地与许多柔性交流输电(FACTS)技术相结合,从而具有许多传统工频变压器难以实现的功能。

##### 4.1 输电网高压短路限流器

随着电力系统发展以及负荷的增大,系统互联就会使短路电流水平不断提高,电力电子型故障限流保护装置FCL容易实现,控制迅速,能有效地限制短路电流的峰值,是目前最可取的限流方法。电力电子型FCL与电力电子变压器技术相结合就可实现综合型多功能FACTS器件,具有非常好的发展前景。参考文献[9]提出了一种电力电子变压器型FCL。FCL模块被串联在电力电子变压器输入模块前端,控制器通过检测其输出端电流以及输入端电流对FCL模块中的开关进行控制。当系统正常工作时,开关断开电流通过串补电容变流,这样既实现了串补功能,又实现了开关零损耗。当故障时,检测的电流达到临界电流值,开关迅速闭合,电容和电感谐振实现高导通阻抗,就实现了短路电流的限制。

##### 4.2 不间断供电技术

应用在配电网中的电力电子变压器可在直流环

节加上蓄电池组,组成在线式不间断电源(UPS)。由于在线式UPS总是处于稳压、稳频供电状态,输出电压动态响应特性好,波形畸变小,并通过监控输入电压的状态对蓄电池组进行投切。当电网正常时,市电通过电力电子变压器对负载供电,对电网的畸变和干扰有很好的抑制作用。当电网掉电时,由蓄电池组向逆变器供电,以保证负载不间断供电。如果逆变器发生故障,UPS则通过静态开关切换到旁路,由旁路供电。当故障消失后,UPS又重新切换到由逆变器向负载供电。因此可以更好的保证供电质量。当电力电子变压器应用在分布式能源发电系统时,也可以把蓄电池组接入直流环节,作为中间储能环节。利用蓄电池和分布式能源构成独立的供电系统来向负载提供电能,当分布式能源输出电能不能满足负载要求时,由蓄电池来进行补充,而当其输出的功率超出负载需求时,将电能储存在蓄电池中。

## 5 结语

本文详细介绍了电力电子变压器的工作原理和典型的拓扑结构。分析了电力电子变压器在分布式电源并网、配电系统供电以及与柔性交流输电技术结合等方面的应用。电力电子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,因此具有广阔的应用前景,并将逐渐取代传统电力变压器。

(上接第13页)

常陡峭,持续时间非常短暂,因此含有极其丰富的高频成分,这就导致在干扰波形的传输过程中,会有一部分干扰从传输的线缆中逸出,这样设备最终受到的是传导和辐射的复合干扰。针对脉冲群干扰来说,最通用的脉冲群干扰抑制办法主要采用滤波(电源线和信号线的滤波)及吸收(用铁氧体磁芯来吸收)。其中采用铁氧体磁芯吸收的方案非常便宜也非常有效。即用粗漆包线穿入轴向有几个孔的铁氧体芯,就构成了高频扼制器件。将其串入电源线或地线中可阻止高频信号从电源/地线引入。DW45、DW450 脱扣器就是采取了这种抗干扰措施,对抑制脉冲群干扰起到了很好的效果。

## 参考文献

- [1] 毛承雄, 范澍, 黄贻煜, 等. 电力电子变压器的理论及其应用(I) [J]. 高电压技术, 2003, 29(10): 4-6.
- [2] Ronan E R, Sudhoff S D, Glover S F, et al. A Power Electronic-Based Distribution Transformer[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2002, 17(2): 537-543.
- [3] Kang M, Enjeti P N, Pitel I J. Analysis and Design of Electronic Transformers for Electric Power Distribution System[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 1999, 14(6): 1133-1141.
- [4] Manjrekar M D, Kieferndorf R, Venkataramanan G. Power Electronic Transformers for Utility Application[R]. Piscataway: Conference Record of the 2000 IEEE Industry Application Conference, 2000: 2496-2502.
- [5] 毛承雄, 范澍, 黄贻煜, 等. 电力电子变压器的理论及其应用(II) [J]. 高电压技术, 2003, 29(12): 1-3.
- [6] 赵剑锋. 输出电压恒定的电力电子变压器仿真[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 30-33.
- [7] 王丹, 毛承雄, 陆继明, 等. 基于电子电力变压器的电能质量调节方法 [J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 63-65.
- [8] 何益宏, 王群, 卓放, 等. 串联电压控制器的控制策略[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 67-70.
- [9] 邓卫华, 张波, 胡宗波. 电力电子变压器电路拓扑与控制策略研究 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 40-48.

收稿日期: 2009-06-09

## 5 结语

综上所述,智能断路器抗干扰的根本措施在于硬件结构,软件抗干扰起到的是补充作用,在系统设计时只有二者兼顾,相互结合、互补才能达到较好的抗干扰效果。

## 参考文献

- [1] 高锋. 单片微型计算机原理与接口技术[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] GB 14048. 2—2001 低压开关设备和控制设备 低压断路器[S].

收稿日期: 2009-06-19