

## 级联型电力电子变压器分级解耦控制

魏 星<sup>1</sup>, 朱信舜<sup>1</sup>, 袁宇波<sup>2</sup>, 周启文<sup>1,3</sup>, 葛雪峰<sup>2</sup>, 杨 晨<sup>1</sup>

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏省南京市 211002;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏省南京市 210003;

3. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏省南京市 211106)

**摘要:** 应用于交直流混合配电网的级联型电力电子变压器(PET)能够实现柔性互联、电压变换、电气隔离和功率控制等多种功能。由于级联型PET内部的级联H桥级和双有源桥级之间电气耦合程度高且控制目标不同,提出一种分级解耦控制方案,在简化控制架构的同时可实现各级的独立灵活控制。此外,针对级联型PET采用多个功率单元输入串联输出并联的拓扑结构,提出一种基于分级解耦控制的串联均压并联均流控制策略,以降低参数差异的影响。研制了一台额定交流电压为10 kV、额定直流电压为750 V、额定容量为500 kVA的级联型PET。实验结果验证了该控制方案工程应用的可行性及有效性。

**关键词:** 交直流配电网; 电力电子变压器; 级联型变换器; 分级解耦; 串联均压; 并联均流

### 0 引言

分布式能源接入传统的交流配电网的规模越来越大,出于稳定电压和频率的考虑,需要配置额外的就地式电力电子变换器,这将增加变换环节及损耗。此外,多个电力电子变换设备的控制目标不完全相同,需要增加额外的上层协同控制设备才能稳定运行。因此,需要一个集中式的电力电子变换设备实现能源接入、电网互联和灵活控制<sup>[1-3]</sup>。

电力电子变压器(power electronic transformer, PET)为满足上述应用需求的一种电力能量路由设备,也称为固态变压器(solid state transformer, SST)或智能型通用变压器(intelligent universal transformer, IUT)。它是一种采用电力电子器件和中(高)频变压器,通过电力电子变换技术实现电能变换的新型智能化变压器<sup>[4]</sup>,除了可以完成传统交流配电网电力变压器的电压转换、电气隔离和能量传输等基本功能外,还可以实现电压稳定可调、功率可控、谐波治理、无功补偿和故障隔离等功能,有效解决传统配电变压器应用在现代电力系统中的不足,进一步推进智能电网技术的发展<sup>[5-6]</sup>。

应用于交直流混合配电网的PET一端接入中压交流电网,另外一端接入低压直流电网,但是现阶段

段由于受到功率半导体器件耐压水平和通流能力的限制,通常需要采用多个模块化的功率单元进行串并联组合成级联型变换器,实现交流侧高电压、小电流与直流侧低电压、大电流应用。因此,级联型PET的中压交流侧采用三相级联H桥(cascaded H bridge, CHB)变换器拓扑,低压直流侧采用双有源桥(dual active bridge, DAB)变换器输出并联结构。

由于CHB变换器和DAB变换器采用级联型连接方式,两级之间存在较强的电气耦合,同时两级的控制目标也不完全相同,因此,必须选取合适的控制方案实现级联型PET的运行及控制模式的灵活切换。此外,串并联组合的各个功率单元的电气参数存在差异,CHB级串联环节会产生直流电压不平衡现象,DAB级并联环节会产生直流电流不平衡现象,影响PET系统的稳定运行。因此,保证CHB级的直流侧电压和DAB级的直流侧电流相对均衡非常重要<sup>[7-9]</sup>。

为了达到上述2个目的,文献[10]提出将PET的两级变换器分开进行控制,CHB级负责自身直流侧电压的均衡控制,DAB级负责直流侧功率的均衡控制。但是该方法的电流传感器需要检测中(高)频变压器的高频交变电流,难以实现精确计算,且对控制系统和采样精度要求较高,不利于工程应用。文献[11-13]提出将PET作为一个整体进行控制,CHB级负责低压直流侧的电压控制,DAB级负责CHB级直流侧电压的均衡控制,但是该方法需要考

收稿日期: 2020-02-27; 修回日期: 2020-04-21。

上网日期: 2020-06-29。

国家重点研发计划资助项目(2017YFB0903300)。

考虑PET启动、运行模式切换等暂态过程的影响,影响了工程应用的灵活性。

针对上述问题,本文结合工程应用提出一种适用于级联型PET的分级解耦控制方案,可有效实现两级独立控制且易于工程实施。在CHB级传统双闭环控制<sup>[14]</sup>的基础上,提出一种串联H桥变换器的均压控制策略,在DAB移相控制<sup>[15-16]</sup>的基础上,提出一种并联DAB变换器的均流控制策略,完成CHB级的串联均压和DAB级的并联均流。最后,通过实验验证了该控制方案在工程应用中的可行性和有效性。

## 1 级联型PET的拓扑结构

交直流混合配电网的架构如附录A图A1所示,通过PET实现中压交流配电网和低压直流配电网的柔性互联、电压变换、电气隔离和能量传输,同时为分布式能源和相关的负荷提供了一个稳定的低压直流接口。光伏、储能等直流电源以及直流负荷通过DC/DC变换器直接或间接地接入直流母线,同时风电等交流电源和交流负荷通过DC/AC变换器接入直流母线,相比于传统交流配电网方案,减少了电源的变换环节<sup>[17-18]</sup>。

级联型PET的功率单元电路结构如附录A图A2所示,由H桥变换器和DAB变换器两部分组成,DAB变换器包括DAB前级、中(高)频变压器和DAB后级。

基于上述功率单元串并联组合而成的三相星级联型PET整体拓扑结构如图1所示。

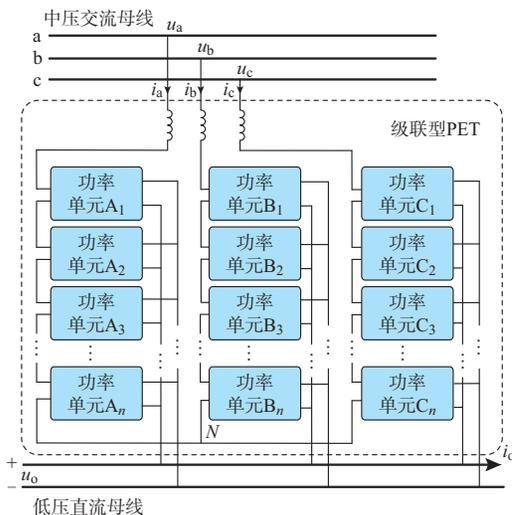


图1 三相级联型PET拓扑结构  
Fig. 1 Topology structure of three-phase cascaded PET

该拓扑具有模块化、易维护的特点,可以通过串联不同的级联单元数以扩展至不同的电压等级,并联不同的级联单元数以扩展至不同的电流等级<sup>[18]</sup>。图1中, $u_x$ 和 $i_x$ 分别为CHB级 $x$ 相( $x=a,b,c$ ,下文同)交流端电压和电流; $u_o$ 和 $i_o$ 分别为DAB级直流侧端电压和电流; $n$ 为功率单元总数。

级联型PET整体可以等效为输入串联输出并联(input-series output-parallel, ISOP)拓扑结构,由CHB级和DAB级组成。CHB级将各个功率单元内H桥变换器的交流端串联接入中压交流母线,类似于链式静止无功发生器(static var generator, SVG)拓扑。DAB级将各个功率单元内DAB变换器的一端与CHB级的各个H桥变换器独立的直流侧相连,另一端并联之后接入低压直流母线。首先,将直流电压先转换成带有正负电平的方波电压,从而耦合到中(高)频变压器的副边,然后再转换成稳定的直流电压<sup>[18]</sup>。

## 2 级联型PET的控制策略

级联型PET由于具备能量双向流动特性,尤其适用于带有分布式电源、储能和负荷的交直流混合配电网,因此,在与配电网联网状态时的运行模式可以分为V-S模式和P-Q模式<sup>[20-21]</sup>。其中,V-S模式即电压源模式,承担稳定低压直流配电网电压的作用;P-Q模式即负载模式,根据指令向配电网输送或吸收功率。

级联型PET对外的控制目标为中压交流侧的功率(包括有功功率和无功功率)或者低压直流侧的电压。同时,由于整个系统为ISOP结构,因此,还需要增加对内的控制目标,包括CHB级各个H桥变换器的直流侧电压的均衡和DAB级各个DAB变换器的直流侧电流的均衡,即实现CHB级的串联均压和DAB级的并联均流。

因此,整个系统的控制策略存在多种组合方式,为了简化控制架构,优化控制性能便于实际工程应用,本文提出一种分级解耦的控制方案,将级联型的CHB级和DAB级分别进行独立控制,实现对外和对内不同的控制目标。

### 2.1 CHB级变换器的控制策略

CHB级变换器为降低交流端电压谐波、电流谐波以及电抗值,通常采用载波移相脉宽调制(carrier phase shift pulse width modulation, CPSPWM)的方法提高变换器等效的开关频率<sup>[22]</sup>。

由于CHB级各个串联H桥变换器所流过的电流完全相等,因此,从中压交流侧可以将其作为一个整体,进而可以借鉴三相脉宽调制(PWM)整流器

的传统双闭环控制策略<sup>[18-19]</sup>。如果各个H桥变换器的参数完全一致,传统双闭环控制策略可以直接用于三相CHB级变换器,使PET系统具备P-Q运行模式(控制交流无功功率功能)。但是电力电子器件的参数差异、驱动脉冲的延时差异、控制系统的延时等因素<sup>[23]</sup>将导致各个H桥变换器的直流侧电压不平衡。针对直流侧电压不平衡问题,在传统双闭环控制的基础上增加各个H桥变换器的直流电压平衡控制策略。

图2为CHB级变换器的整体控制框图。图中,直流侧电压的指令值 $U_{DC,ref}^*$ 和所有H桥变换器直流侧电压的平均值 $\bar{U}_{DC}$ 的差值经过闭环控制得到电流内环的指令值 $i_{d,ref}^*$ 和 $i_{q,ref}^*$ ,与Park变换得到的 $dq$ 轴电流值 $i_d$ 和 $i_q$ 经过 $dq$ 解耦控制<sup>[24]</sup>之后,通过Park反变换得到各个H桥变换器的原始调制波 $u_{ref,x,k}$ ,叠加各个H桥变换器的直流侧电压平衡控制策略的修正量 $\Delta u_{ref,x,k}$ ,得到各个H桥变换器的最终调制波 $U_{ref,x,k}$ ,再经过CPSPWM得到各个H桥变换器的驱动脉冲。其中, $u_d$ 和 $u_q$ 为CHB级 $dq$ 轴交流电压值; $\theta$ 为CHB级交流电压的锁相角。

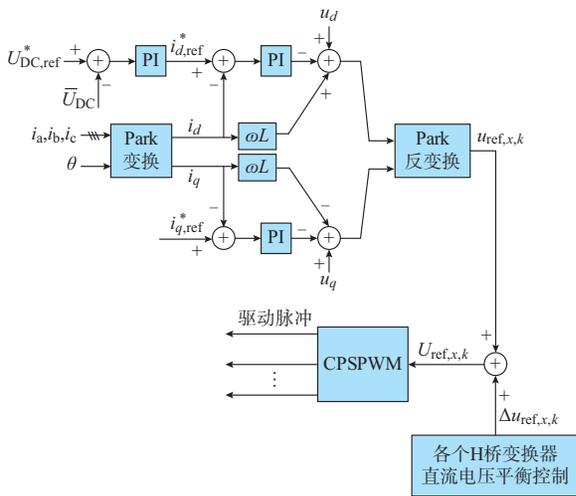


图2 CHB级变换器控制框图  
Fig. 2 Control diagram of CHB converter

由于CHB级各个H桥变换器交流侧为串联关系,可以得到各个H桥变换器的功率为:

$$P_{x,k} = u_{ac,x,k} i_x = d_{x,k} U_{DC,x,k} i_x \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$
 式中: $P_{x,k}$ 为 $x$ 相第 $k$ 个H桥变换器从网侧吸收的功率; $u_{ac,x,k}$ 、 $d_{x,k}$ 和 $U_{DC,x,k}$ 分别为 $x$ 相第 $k$ 个H桥变换器的交流端电压、占空比和直流侧电压。

式(1)从能量的角度说明了各个H桥变换器的功率与其直流侧电压及其相应的占空比存在密切的关系。为了在参数不一致的情况下,达到均衡CHB级各个H桥变换器的直流侧电压的目的,图2的整

体控制框图中还增加了各个H桥变换器的直流电压平衡控制策略,通过改变其吸收或发出的有功功率的方法来均衡直流电压。

假设PET工作在传输有功功率并输出感性无功功率进行功率因数补偿的工况下(工况1),功率因数角为 $\varphi$ ,如图3(a)所示。若要提高CHB级某个H桥变换器的直流电压,则需要吸收一定的有功功率,那么使其交流端再产生一个与交流电流 $i_{ac}$ 同向的电压 $u'_{ac}$ 即可;反之,若要降低CHB级某个H桥变换器的直流电压,则需要发出一定的有功功率,那么使其交流端产生一个与交流电流 $i_{ac}$ 反向的电压 $u''_{ac}$ 即可。同理,当PET工作在传输有功功率并输出感性无功功率进行功率因数补偿的工况下(工况2),如图3(b)所示。各个H桥变换器根据自身的直流电压情况,产生不同的交流端电压。

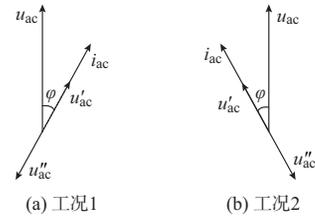


图3 CHB级变换器交流端电压电流矢量图  
Fig. 3 Voltage and current vector diagram of AC port of CHB converter

基于以上分析,可得出PET的CHB级所有H桥变换器的电压均衡由传统双闭环控制的 $d$ 轴控制环路实现,无功功率由 $q$ 轴控制环路实现,而各个H桥变换器的直流电压平衡即相内直流电压平衡需要增加额外的补偿量,各个H桥变换器的直流侧电压控制框图如图4所示。将CHB级三相直流电压的给定平均值 $U_{DC,ref}^*$ 与各个H桥变换器的直流电压 $U_{DC,x,k}$ 之间的差值经过闭环控制后,分别乘以三相各自的实时电流 $i_x$ ,得到各个H桥变换器有功功率调节的调制波修正量 $\Delta u_{ref,x,k}$ ,再将其与 $dq$ 解耦控制得到的原始调制波 $u_{ref,x,k}$ 相叠加,从而保证了各个H桥变换器的有功功率按需分配,实现了CHB级的串联均压。

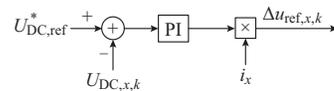


图4 各H桥变换器的直流侧电压平衡控制  
Fig. 4 Voltage balance control at DC side of each H-bridge converter

## 2.2 DAB级变换器的控制策略

由于单个DAB变换器的前级和后级均采用固

定占空比的驱动脉冲,因此,中(高)频变压器的原边和副边均为正负电平的方波电压。考虑到中(高)频变压器存在漏感或者额外增加中(高)频电感,可得等效电路如附录A图A3所示。

DAB变换器传递的功率 $P_{\text{DAB}}$ 满足<sup>[12]</sup>:

$$P_{\text{DAB}} = \frac{U_{\text{DC},x,k} u_o}{2\pi f_s L_k} \delta \left(1 - \frac{|\delta|}{\pi}\right) \quad (2)$$

式中: $f_s$ 为开关频率; $L_k$ 为中高频变压器的等效漏感; $\delta$ 为DAB前级和后级方波电压间的驱动脉冲移相角。

根据传递功率与移相角之间的关系,DAB变换器通常采用调节移相角的方式来调节传递功率。通过控制DAB前级和后级方波电压之间的移相角度 $\delta$ 来改变等效电感上的电压,从而控制电流以实现能量的双向可控流动<sup>[4-5]</sup>。

由于各个并联DAB变换器的中(高)频变压器等元件的参数存在差异以及CHB级直流侧电压存在不同,造成各个DAB变换器传递的功率不均衡,在轻载和满载运行等条件下导致环流和过流等问题<sup>[18]</sup>。因此,DAB级变换器的控制不仅需要稳定并联直流电压或功率,还需要实现各个并联DAB变换器的功率均衡即电流均衡。如图5所示,提出了一种移相闭环叠加控制策略,包括主移相闭环控制和辅助移相闭环控制两个环路,其中, $u_{o,\text{ref}}$ 为并联直流电压的指令值; $P_{\text{ac},\text{ref}}$ 和 $P_{\text{ac}}$ 分别为CHB级交流侧有功功率的指令值和实际值,经过闭环控制得到所有并联DAB变换器的主移相角度 $\delta_{\text{main}}$ ; $\bar{i}_o$ 和 $i_{o,x,k}$ 分别为各个并联DAB变换器的直流电流平均值和实时值,经过闭环控制得到各个并联DAB的辅助移相角度 $\Delta\delta$ ,最终经过叠加得到各个并联DAB变换器的实际移相角度 $\delta_{x,k}$ 。

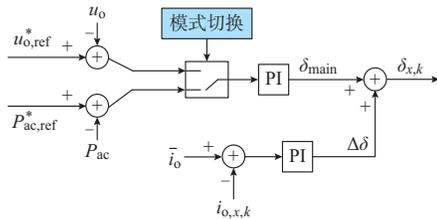


图5 DAB级变换器控制框图  
Fig. 5 Control diagram of DAB converter

该控制策略可保证各个并联DAB变换器的功率分配,实现了DAB级的并联均流,使PET系统实现了V-S运行模式(控制低压直流电压功能)和P-Q运行模式(控制交流有功功率功能),同时可以实现2种模式的在线切换,有效简化控制架构,提升了工程应用的灵活性。

### 3 实验验证

为了验证上述控制策略,在应用于中国江苏省苏州同里综合能源服务中心的级联型PET系统上进行了实验。为了提高效率,成套设备采用了全商用碳化硅(SiC)1 200 V/50 A功率器件。附录A表A1为三相级联型PET设备的系统参数。

附录A图A4至图A9为级联型PET系统的实验波形。

能量正向流动时(中压交流侧为输入端,低压直流侧为输出端),PET的CHB级输入交流电压 $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$ 和交流电流 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 以及DAB级输出直流电压 $u_o$ 的实验波形如附录A图A4所示,可以看出交流电压与电流同相位,实现了中压交流侧单位功率因数整流以及低压直流侧电压的稳定。能量反向流动时(低压直流侧为输入端,中压交流侧为输出端),CHB级输出交流电压 $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$ 和交流电流 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 以及DAB级输入直流电压 $u_o$ 的实验波形如附录A图A5所示,可以看出交流电压与电流反相位,实现了中压交流单位功率因数能量回馈以及低压直流侧电压的稳定,适用于分布式能源和储能的接入。

附录A图A6为正向功率流动时中压交流侧的电流谐波分析结果,总谐波畸变率(THD)为2.402%。附录A图A7为反向功率流动时中压交流侧的电流谐波分析结果,THD为1.932%。附录A表A2为不同负载情况下的低压直流侧的电压值,根据附录B式(B1)计算可得最大控制偏差为0.27%。

级联型PET满载情况下,CHB级各个H桥变换器的直流侧电压 $U_{\text{DC},x,k}$ 和DAB级各个DAB变换器的直流侧电流 $i_{o,x,k}$ 的实验波形分别如附录A图A8和图A9所示。根据瞬时功率理论可知,CHB级各个H桥变换器的直流侧电压和DAB级各个DAB变换器的直流侧电流均既有直流分量又有二倍频分量<sup>[25]</sup>。根据附录B式(B2)计算可得,满载条件下CHB级各个串联H桥变换器的直流侧电压离散度为0.92%,DAB级各个并联DAB变换器的直流侧电流的离散度为0.43%。

由此验证了本文提出的分级解耦控制策略的可行性和有效性,在简化控制架构的同时实现分级独立灵活控制,还可以实现良好的串联均压和并联均流效果。

### 4 结语

针对应用于交直流混合配电网的三相级联型PET,提出了一种两级解耦独立闭环控制方案。对

于CHB级变换器,在传统三相PWM整流器的双闭环控制的基础上,增加了直流侧电压均衡控制,实现了很好的串联均压效果。对于DAB级变换器,在移相控制的基础上,增加了并联DAB的均流闭环控制,实现了很好的并联均流效果。最后,通过工程应用的系统实验,充分验证了控制方案的可行性和有效性。该控制方案有利于推动级联型PET在分布式能源接入和交直流配电网柔性互联方面的工程化应用。但是本文并没有对级联型PET稳定性的相关问题进行分析,后续可以在相关方面开展研究。

本文工作受到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019126)的资助,特此感谢。

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] 王建,李兴源,邱晓燕.含有分布式发电装置的电力系统研究综述[J].电力系统自动化,2005,29(24):90-97.  
WANG Jian, LI Xingyuan, QIU Xiaoyan. Power system research on distributed generation penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 90-97.
- [2] 王成山,李鹏.分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J].电力系统自动化,2010,34(2):10-14.  
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14.
- [3] 梁得亮,柳轶彬,寇鹏,等.智能配电变压器发展趋势分析[J].电力系统自动化,2020,44(7):1-18.  
LIANG Deliang, LIU Yibin, KOU Peng, et al. Analysis of development trend for intelligent distribution transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 1-18.
- [4] 武琳.级联型电力电子变压器控制策略研究[D].北京:北京交通大学,2014.  
WU Lin. Control strategy for cascaded power electronic transformer[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [5] 王丹.配电系统电力电子变压器[D].武汉:华中科技大学,2006.  
WANG Dan. Electronic power transformer for distribution system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2006.
- [6] 张明锐,刘金辉,金鑫.应用于智能微网的SVPWM固态变压器研究[J].电工技术学报,2012,27(1):90-97.  
ZHANG Mingrui, LIU Jinhui, JIN Xin. Research on the SVPWM solid state transformer applied in smart micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 90-97.
- [7] 刘文亚,姚钢,何雯,等.基于级联多电平的有源滤波器直流侧电压平衡控制[J].电力系统保护与控制,2015,43(4):94-101.  
LIU Wenya, YAO Gang, HE Luan, et al. Research of DC voltage balance control based on multi-level cascaded APF[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 94-101.
- [8] LI Houzhi, WANG Yubin, YU Chenghao. Research on voltage balance and power balance control for three-phase cascaded multilevel converter based power electronic transformer[C]//42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 24-27, 2016, Florence, Italy: 120-123.
- [9] 孙玉巍,武承杰,付超,等.级联式电力电子变压器的主动非均衡功率控制[J].电力系统自动化,2020,44(6):155-170.  
SUN Yuwei, WU Chengjie, FU Chao, et al. Active unbalanced power control of cascaded power electronic transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(6): 155-170.
- [10] ZHAO Tiefu, WANG Gangyao, ZENG Jie, et al. Voltage and power balance control for a cascaded multilevel solid-state transformer[C]//Twenty-fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), March 18, 2010, Palm Springs, USA: 761-767.
- [11] 杨景熙,刘建强,张捷频,等.基于双有源桥式DC-DC变换器的电力电子牵引变压器的电压平衡控制[J].电工技术学报,2016,31(增刊1):119-127.  
YANG Jingxi, LIU Jianqiang, ZHANG Jiepin, et al. Voltage balance control of a power electronic traction transformer based on dual active bridge DC-DC converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(Supplement 1): 119-127.
- [12] 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.
- [13] 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 power electronic transformer based on hybrid pulse width modulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 101-107.
- [14] 刘凤君.多电平逆变技术及其应用[M].北京:机械工业出版社,2007.  
LIU Fengjun. Multilevel inverter technology and its application[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [15] INOUE S, AKAGI H. A bidirectional isolated DC-DC converter as a core circuit of the next-generation medium-voltage power conversion system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 535-542.
- [16] LI H, PENG F. Modeling of a new ZVS bi-directional DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(1): 272-283.
- [17] 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, et al. The power control of power electronic transformer in hybrid AC-DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 50-57.

- [18] 季振东,李东野,孙毅超,等.一种三相级联型电力电子变压器及其控制策略研究[J].电机与控制学报,2016,20(8):32-39.  
JI Zhendong, LI Dongye, SUN Yichao, et al. Research on a three-phase cascaded power electronic transformer and its control strategy [J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(8): 32-39.
- [19] 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.
- [20] FALCONES S, MAO Xiaolin, AYYANAR R. Simulation of the FREEDM green hub with solid state transformers and distributed control [C]// Future Renewable Electric Energy Distribution Management Annual Conference, October 4-6, 2009, Raleigh, USA: 10-14.
- [21] 张明锐,王之馨,黎娜.下垂控制在基于固态变压器的高压微电网中的应用[J].电力系统自动化,2012,36(14):186-192.  
ZHANG Mingrui, WANG Zhixin, LI Na. Application of droop control in high-voltage microgrid based on solid state transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 186-192.
- [22] MCGRATH B, HOLMES D. Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 858-867.
- [23] 耿俊成,刘文华,袁志昌.链式STATCOM电容电压不平衡现象研究:(二)数学模型[J].电力系统自动化,2003,27(17):35-39.  
GENG Juncheng, LIU Wenhua, YUAN Zhichang. Research on the voltage unbalance of DC capacitors of cascade STATCOM: Part two mathematical model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17): 35-39.
- [24] 张崇巍,张兴.PWM整流器及其控制[M].北京:机械工业出版社,2003.  
ZHANG Chongwei, ZHANG Xing. PWM rectifier and its control[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [25] 张航,李耀华,高范强,等.级联H桥型电力电子变压器隔离级高频电流波动抑制策略[J].电力系统自动化,2020,44(7):130-150.  
ZHANG Hang, LI Yaohua, GAO Fanqiang, et al. High-frequency current fluctuation suppression strategy for isolation stage of cascaded H-bridge based power electronic transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 130-150.

魏 星(1986—),男,通信作者,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力电子技术在电力系统中的应用等。E-mail: weix@nrec.com

朱信舜(1988—),男,硕士,工程师,主要研究方向:电力电子技术在电力系统中的应用等。E-mail: zhuxs@nrec.com

袁宇波(1975—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:电力系统继电保护、智能变电站技术、高压直流输电控制保护技术及柔性输电技术等。E-mail: yyb97104@sina.com

(编辑 施冬敏)

## Hierarchical Decoupling Control of Cascaded Power Electronic Transformer

WEI Xing<sup>1</sup>, ZHU Xinshun<sup>1</sup>, YUAN Yubo<sup>2</sup>, ZHOU Qiwen<sup>1,3</sup>, GE Xuefeng<sup>2</sup>, YANG Chen<sup>1</sup>

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China;

3. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Cascaded power electronic transformer (PET) for hybrid AC/DC distribution networks can realize multiple functions such as flexible interconnection, voltage conversion, electrical isolation and power control. Due to the high degree of electrical coupling between the cascaded H-bridge and the dual active bridge stage in the cascaded PET with different control objectives, a hierarchical decoupling control scheme is proposed to simplify the control architecture and achieve independent flexible control at all levels. Since the topology of cascaded PET adopts input-series output-parallel (ISOP) of multiple power units, a control strategy of series voltage equalization and parallel current equalization based on hierarchical decoupling control is proposed to reduce the influence of parameter differences. A cascaded PET with rated AC voltage of 10 kV, rated DC voltage of 750 V and rated capacity of 500 kVA is developed, and the experimental results verify the feasibility and effectiveness of the engineering application of the control scheme.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2017YFB0903300).

**Key words:** AC/DC distribution network; power electronic transformer; cascaded converter; hierarchical decoupling; series voltage equalization; parallel current equalization

