

# 适合直流配电的有源前端控制器

刘 闯, 崔剑锋, 刘海洋, 蔡国伟

(东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 为使用户侧大量新能源能够充分地发挥作用并可对其有效管理, 提出一种基于有源前端控制器的直流供电系统结构, 在该结构中结合电力电子技术与高频隔离技术将配电降压变压器与低压 AC-DC 变换器一体化设计为有源前端控制器, 以完成中压交流配电网与低压直流网之间功率相互变换的过程。给出了有源前端控制器的基本类型及不同类型的实际应用。详细探讨了基于输入串联输出并联的级联型有源前端控制器的系统拓扑结构及其各自模块功能特点。通过基于双升压/降压全桥式变换器与 CLLC 谐振型直流变换器模块的级联型有源前端控制器小型实验系统验证了整体系统结构的可行性和控制策略的有效性。

**关键词:** 直流配电系统; 有源前端控制器; 高频隔离; 级联型; 变换器; 功率平衡

**中图分类号:** TM 76

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.07.016

## 0 引言

近年来随着全球经济的快速发展, 煤、石油等传统化石燃料的短缺现象日益严重, 世界各国都笼罩在能源危机的阴影下。为了应对不断加剧的能源危机, 人类要建立新的能源体系, 着重利用地球的可再生能源。目前, 我国可运用大型风力、光伏发电场将电能通过输电网络传输到负荷中心地区, 但对输电网络依赖过高, 无法应对电网瘫痪所带来的影响。为改善我国能源生产和供给的安全性、局部独立性以及环境友好程度, 在居民区及商业区附近大规模地采用分布式新能源发电将是一个新的发展趋势。

同时, 太阳能板发电系统、小型风力发电系统、电池能量储备系统 BESS (Battery Energy Storage System)、电动汽车的迅速发展, 使得未来家庭及商业用户用电更具灵活性、可控性。用户侧可将多余的风能、太阳能储存并交易, 电网故障时也可独立运行。目前, 用户侧新能源分布式发电系统采用交流并网的系统结构, 主要集中在微电网的研究<sup>[1-3]</sup>, 用来解决电力系统与分布式发电系统之间的矛盾, 提高分布式发电系统为电力系统和用户所带来的经济效益, 并提高电力系统运行的灵活性、可控性和经济性<sup>[4-5]</sup>。

美国弗吉尼亚理工学院暨州立大学的电力电子系统研究中心 (CPES) 提出了将微电网概念应用到 10~100 kW 低功率等级的用户配电系统, 该系统称为 nano-GRID<sup>[6-10]</sup>。通过采取网络测量、实时通信和远程控制等技术, 该 nano-GRID 可组成未来智能电网的基本单元。该系统可以建立在传统交流网上, 也可

以建立在直流网上。相比于 AC nano-GRID, DC nano-GRID<sup>[7-12]</sup>则具有很多优点:

a. 所需电力变换器较少, 具有较高的整体系统效率, 新能源系统接入直流网更简单;

b. 没有频率稳定性及无功问题, 无集肤效应及额外交流损耗;

c. 对于家庭电子设备, 直流供电更方便。

基于电力电子变压器的概念<sup>[13-14]</sup>, 美国北卡罗来纳州立大学的 FREEDM 系统研究中心同时提出了一种在未来适用的配电系统结构<sup>[14]</sup>, 可以为用户提供 2 种即插即用型接口, 分别为 400 V 直流母线接口和 120 V RMS 传统交流母线接口。新能源发电系统可以通过 400 V 直流母线进行并网, 组成 DC nano-GRID; 传统交流负载接入 120 V RMS 母线上, 组成 AC nano-GRID; 所有接入电网的设备都会被检测到, 通过分布式电网智能控制单元 (DGI) 统一管理。

可以看出整个系统的核心为固态变压器 (SST)<sup>[14-15]</sup>, 也可称为智能通用变压器 (IUT)<sup>[16-18]</sup> 或电力电子变压器 (PET)<sup>[19-23]</sup>, 它不仅在中压交流网与低压交流网之间起到电能变换的作用, 同时也为不同类型的用户设备提供了即插即用型直流和交流接口。电力电子变压器被认为是未来智能电网的重要组成部分, 是通过电力电子和高频隔离技术来完成中压交流网与低压交流网之间的电能变换, 既可以实现传统变压器电压等级转换和隔离功能, 也可以抑制电网电压跌落和频率变化对负载侧的影响并隔离来自负载侧的无功电流和谐波对电网的污染。因此, 电力电子变压器是未来的发展方向。

传统低频变压器作为当今电力系统的核心设备之一, 具有制作工艺简单、可靠性高等优点, 主要功能为电气隔离、电能传输和不同电压等级变换。但其存在体积、重量、空载损耗大, 不能隔离负载处故障,

收稿日期: 2015-07-04; 修回日期: 2016-04-26

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (51307021); 吉林省自然科学基金面上国家项目 (20140101076JC)

Project supported by the National Natural Science Foundation for Young Scholars of China (51307021) and Jilin Province Natural Science Foundation of China (20140101076JC)

无法消除电网与负载侧的相互干扰和过度依赖电网等缺点,这些都增加了电力系统运行成本,不利于电网建设。

电力电子变压器系统基本结构包含 3 个基本功率变换过程,分别为中压工频交流到中压直流的 AC-DC 功率变换过程、中压直流到低压直流的 DC-DC 功率变换过程(实现了高频隔离、能量传递和降压的功能)、低压直流到低压交流的 DC-AC 功率变换过程,来满足不同类型负载的要求。电力电子变压器具有体积小、重量轻,能为用户提供直流母线接口,保证高品质供电和具有独立性等特点,并且它可以作为中压交流网与用户侧之间的能量缓冲器,减小相互影响,这些特点都使得电力电子变压器更符合现代电网的要求。

另外,随着插拔式混合动力电动汽车/插拔式电动汽车(HEV/EV)技术的发展,例如丰田公司的混合动力汽车 Prius、尼桑的电动汽车 LEAF 和三菱的电动汽车 i-MiEV 等,电动汽车将是城市交通工具的一个新的趋势<sup>[24]</sup>。对于电网而言,电动汽车的普及将给局部配电网提供巨大的潜在电力支持;电网与电动汽车之间的桥梁就是电池充电系统<sup>[19-25]</sup>,该小型系统可以称为 pico-GRID。因此,提供直流母线接口可省去充电系统前端的整流环节,节省汽车内部空间,提高系统变换效率,进而节约能源。

### 1 有源前端控制器概念的提出

从电力电子变压器定义来看,变换的最终目的是低压交流输出满足传统用户需求;但是随着小型户用直流系统概念的实行及电动汽车的普及,直流供电系统将慢慢取代交流供电系统;同时电力电子变压器的前两个功率变换过程和最后一个可以完全独立开来。因此,本文将利用电力电子技术与高频隔离技术来实现中压交流配电网与低压直流网之间功率相互变换的装置作为有源前端控制器 AFEC (Active Front-End Controller),如图 1 所示;该控制器本质的功能是对低压直流侧母线进行电压调节控制,达到中压交流侧与低压直流侧的功率平衡;同时根据不同的实际要求,可达到无功补偿、有源滤波和功率双向变换等功能。

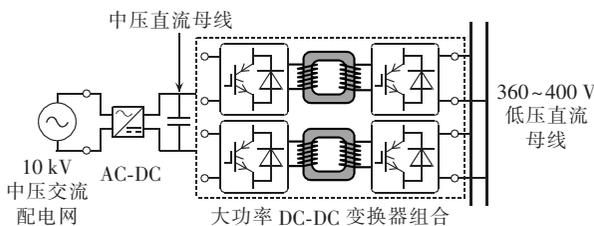


图 1 AFEC 结构  
Fig.1 Structure of AFEC

### 1.1 基于 AFEC 的直流配电系统

本文给出了一种基于 AFEC 的在未来适用的直流配电系统结构,如图 2 所示。与美国北卡罗来纳州立大学的 FREEDM 系统的基本区别在于所给出的配电系统结构已跳出了以电力电子变压器为基本框架的概念,将 AFEC 作为能量控制中心 ECC(Energy Control Center),同时供给 360~400 V 的直流配电网;通过直流电缆供给用户侧 DC-AC 逆变器来满足传统交流负载要求,因此 AFEC 与后端用户侧 DC-AC 逆变器已不再是统一的整体。

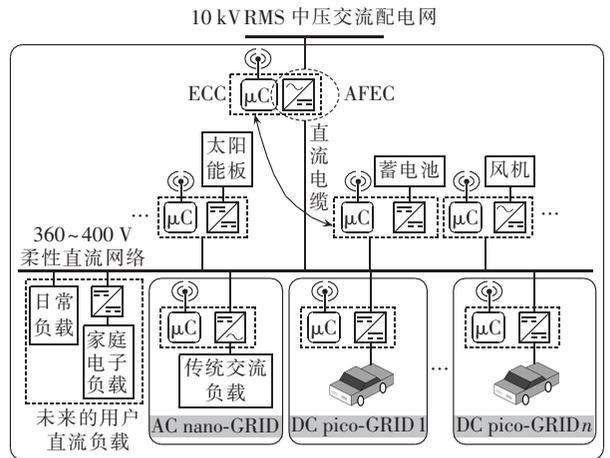


图 2 基于 AFEC 的未来适用的直流配电系统结构  
Fig.2 Architecture of DC distribution system based on AFEC

所给出的配电系统结构中,各部分功能如下。

(1)AFEC:对低压直流母线电压进行调节控制,实现中压交流网与低压直流网之间的功率相互变换;作为 ECC,与 BESS 有紧密的统一协作机制;随着电动汽车的普及,与各电动汽车单元的能量互动也将日益频繁,需要统一电动汽车能量管理机制进行协调控制;对于太阳能、风力分布式发电系统和 DC-AC 逆变器只需给予相应的上层命令,通过实时数据的交流来进行整个系统的优化运行。

(2)用户侧 DC-AC 逆变器:满足传统交流负载要求,可以单相或三相运行;负载侧的无功不再流入电网,由 DC-AC 逆变器独立完成;当负载侧接入非线性负载时,由后端 DC-AC 逆变器独自承担;当用户侧发生短路故障时,DC-AC 逆变器具有自我保护功能,同时不影响 AFEC 的正常运行;采取并联模块组合可使得系统在不同负载条件下优化运行,提高系统供电效率,节约能源。

(3)HEV/EV 车载电池充电器:HEV/EV 是一种新型负荷,在未来的配电系统中将占有特殊的位置,可为间歇新能源提供潜在的巨大支持。电动汽车与直流母线之间的接口为电池充电器,为了安全,要求采用隔离式 DC-DC 变换器。目前,该变换器仅是单

一方向功率变换,但随着社会发展需求,双向将是必然的要求。

(4)分布式新能源发电系统:太阳能变换器是一个单方向升压式隔离型 DC-DC 变换器,工作在最大功率点跟踪 MPPT(Maximum Power Point Tracking)模式下;风能变换器是一个三相有源整流器,同样工作在 MPPT 模式下;在特殊情况下,太阳能、风能变换器都可对低压直流侧母线进行电压调节。

(5)BESS:采取双向 DC-DC 变换器,可工作在电流模式和电压模式下;当 AFEC 进行调压控制时,BESS 工作在电流模式;该局部智能通用配电系统可以工作在独立发电模式下,此时 BESS 主要负责低压侧直流母线的电压调节。

(6)未来用户直流负载:当直流负载得到应用时,传统交流负载比重将逐渐减小,最后将被直流负载所取代。

鉴于 AFEC 在直流配电系统中具有关键性的作用,本文将 AFEC 进行相关的论述及研究。

## 1.2 AFEC 的基本类型及应用

针对不同类型的实际应用,AFEC 可定义为 5 种基本类型,如图 3 所示,例如 AFEC-I 型单向 AFEC 仅能对低压直流侧进行有功功率供给,而 AFEC-II 型单向 AFEC 在保持对低压直流侧有功功率供给的同时还可以对电网进行无功补偿及有源滤波。对于 AFEC 的系统结构,可根据不同实际应用类型来选择前端 AC-DC 变换器和隔离式 DC-DC 变换器的拓扑结构,其中  $P_{MV}$  和  $Q_{MV}$  分别为中压交流网与高频隔离之间有功与无功交换, $P_{LV}$  为高频隔离与低压直流网之间有功交换。

图 4 展示了 AFEC 在并网功率变换器系统中发挥的重要作用。首先,在并网分布式发电系统中,如近海岸风力发电场、集中式光伏发电场等,可将电力功率变化系统与传统升压式变压器一体化设计,可采取 AFEC-III 型和 AFEC-IV 型。其次,在公共交通电力系统(地铁、高速电气化铁路、电动汽车充电站)中,AFEC-I 型和 AFEC-II 型将会改善目前实际中遇到的问题,如瞬间电压跌落、谐波污染等。最后,在未来智能配电网系统中,特别是在未来直流新能源用户用/办公微小直流用电系统和 PHEV/PEV 智能停车场/停车楼得到应用时,AFEC 将具有更大的潜在应用价值。

## 2 级联型 AFEC 的系统结构

AFEC 包含 2 个基本功率变换过程,分别为中压工频交流到中压直流的 AC-DC 功率变换过程和中压直流到低压直流的 DC-DC 功率变换过程,实现了

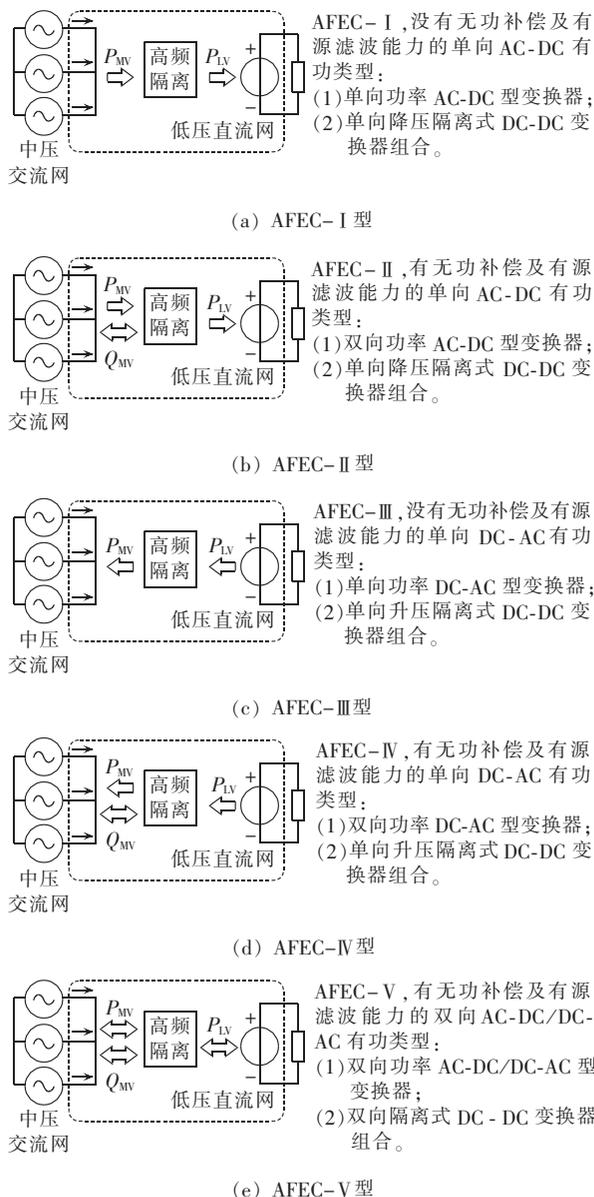


图 3 AFEC 的 5 种基本类型

Fig.3 Five basic types of AFEC

高频隔离、能量传递和降压的功能。为了能够充分地发挥 AFEC 的潜在价值,应使其具备较高的可靠性和系统效率,并且其构成元件容易获得。基于输入串联输出并联的系统拓扑结构得到了更多重视,该 AFEC 具有较好的模块性并可满足不同电压等级要求,称此类控制器为级联型 AFEC,如图 5 所示。其中, $f_{MV}$  为中压频率; $u_{MV}$  为中压电压; $i_{MV}$  为中压电流; $U_{MV,DC}$  为中间直流侧电压之和; $U_{dci}(i=1,2,\dots,n)$  为各项中间直流电压; $I_{dc}$  为低压直流母线电流; $I_{dci}(i=1,2,\dots,n)$  为各模块流入低压直流母线的电流; $U_{com}$  为低压直流母线电压。

首先,级联型变换器完成中压交流电能与直流电能之间的相互转换,同时将中压直流侧等效分成多个等级,达到了降低每个模块电压应力的功能。其次,输出并联的 DC-DC 变换器组合将低压直流侧与

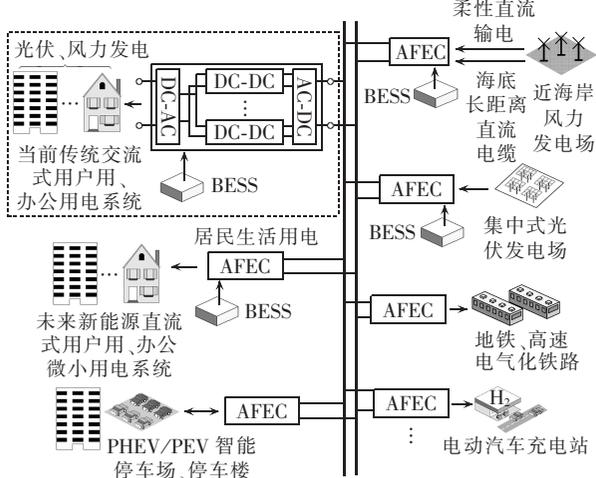


图 4 AFEC 在智能配电网结构下的应用  
Fig.4 Applications of AFEC in smart distribution grid

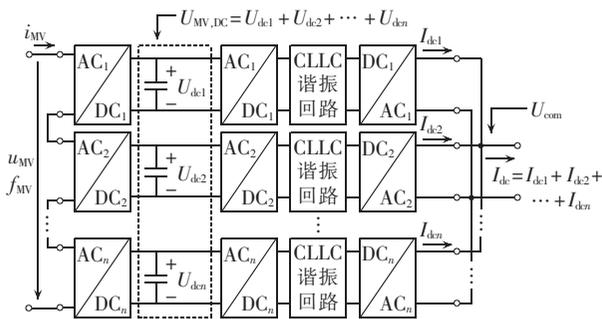


图 5 基于输入串联输出并联的 AC-DC 变换器系统结构

Fig.5 Topology of AC-DC converter system with series inputs and parallel outputs

级联型变换器相互独立的各直流侧建立成统一整体。目前,对于级联型 AFEC 的研究仅处于初步的理论探讨与实验验证阶段,主要难点如下。

### 2.1 系统拓扑结构方面

如何保证前端级联型 AC-DC 变换器和后端 DC-DC 变换器组合具有较高的可靠性、运行效率高、模块化等优点,同时可实现高频化,来降低系统体积?

#### (1)前端级联型 AC-DC 变换器模块。

采用传统 H 桥变换器和 3 电平中点箝位变换器<sup>[1]</sup>模块,存在的主要问题是:每个桥臂上存在串联主动开关,因此存在着直通问题;虽然开关等效频率随着级联模块数增加而增加,但是每个模块的开关频率还是受到限制,因为随着频率增加,死区时间的比重将越来越大,进而导致直流电压利用率降低;不能简单地直接采用 MOSFET,因为高压 MOSFET 的寄生二极管的特性非常差,因而失去了 MOSFET 的较低开关损耗、电阻性导通特性、高频化等优点。

#### (2)后端输出并联型 DC-DC 变换器。

采用 2 电平/3 电平双有源全桥变换器<sup>[12]</sup>,由于

其必须采取闭环控制移相角来保证电压输出特性,因此存在着低载稳定控制等难题;同时也可采用基于变频控制的谐振变换器,如串联谐振变换器<sup>[13]</sup>等,但是多模块的变频控制实现具有一定的复杂性。

### 2.2 系统控制策略方面

如何简化级联型 AFEC 的双级控制系统方案<sup>[14]</sup>,在保持对低压直流侧有功功率调节的同时,自然地达到前端级联型 AC-DC 变换器直流侧的均压控制和后端输出并联 DC-DC 变换器组合的均流控制?

#### (1)AFEC 前端级联型 AC-DC 变换器的控制策略基本功能。

中压交流侧正弦电流控制,同时使得中压交流侧与各独立直流侧达到整体功率平衡,并实现各级联模块直流侧电压平衡控制。

当  $n$  个模块串联连接时,期望各模块能够独立地调节自身功率,同时通过  $n$  个模块的共同作用来控制交流侧输入电感电流  $i_L$ ;由于串联关系,流通各模块的电流是相同的,所以各模块的功率传递又不是相互独立的。因此,对于级联型结构控制的主要难题是通过  $n$  个模块的开关组合来控制  $n+1$  个变量,分别为交流侧输入电感电流  $i_L$  和  $n$  个直流侧电压  $U_{dci}(i=1,2,\dots,n)$ 。

针对 AFEC 中的级联型系统控制,文献[8]提出了一种将级联型系统进行解耦的无源控制策略,该策略的难点在于需要设计合理的无源控制器对各模块负载电导进行实时估计;文献[9]提出一种采取  $n$  个 PI 控制器对每个 H 桥模块进行单独控制的可行方法,即 1 个 PI 控制器通过控制整体直流侧电压来产生电流内环参考值,再通过电流内环控制器产生整体等效调制比命令,而其他  $n-1$  个 PI 控制器直接产生  $n-1$  个对应模块的调制比命令,可看出 2 个 PI 控制器具有不同动态反应特性,需要独立设计;文献[10]提出一种模块化控制策略,其中采取模拟控制器来调节整体直流侧电压,随后基于混合调制技术的电压平衡策略采取数字控制器来合成所需的整体交流电压并达到均压功能,可以看出该策略判断复杂,需要大量计算。

#### (2)后端输出并联型 DC-DC 变换器组合控制策略基本功能。

公共直流侧电压的调节控制,同时实现各输出并联型 DC-DC 变换器组合之间均流控制。文献[26]提出了一种可行的控制策略,该策略的主要思想为每个电流内环控制器的电流参考信号由共同的电压外环比例积分微分(PID)控制器来产生,进而达到各模块间功率平衡的目的。另外,电压外环 PID 控制器通过补偿负载侧的变化来达到对输出直流电压调节控制的目的。

因此可以看出, AFEC 的双级控制系统方案要通过多模块的协调控制才能实现公共直流侧电压的调节控制, 同时具有采集变量多、控制变量多及控制目标多等特点。随着级联模块数增加, 系统控制复杂程度越大, 将无法真正实现公共直流侧电压的调节控制。

### 3 基于双升压/降压全桥变换器+CLLC 谐振变换器模块的 AFEC

AFEC 作为未来直流配电的核心技术, 提出将双升压/降压全桥式变换器与 CLLC 谐振变换器模块作为 AFEC 本体拓扑结构的核心组成部分, 如图 6 所示, 采取输入串联、输出并联方式组合而成。串联而成的前端 AC-DC 变换器是级联型双升压/降压全桥式变换器, 相比于传统级联 H 桥变换器, 该变换器仍然是电压源型逆变器, 但是具有特殊拓扑结构和运行方式, 极大地避免了直通的可能性, 在一定程度上增加了系统的可靠性; 同时, 无需设置死区时间, 实现高频化的同时可以实现占空比最大化, 更好地提高了直流侧电压利用率。输出并联型 CLLC 谐振变换器组合将公共低压直流侧与级联型双升压/降压全桥变换器相互独立的直流侧建立成统一整体, 通过采取零电压开关(ZVS)-零电流开关(ZCS)控制, 很好地解决了能量双向流动及均流控制难题。

#### 3.1 基于单级控制系统概念的 AFEC

基于单级控制系统概念的 AFEC 的控制策略框图如图 7 所示。采取输出并联型 CLLC 谐振变换器组合将公共低压直流侧与级联型变换器相互独立的直流侧建立成统一整体, 利用谐振变换器自身工作特性达到均流及中间直流侧电压箝位作用来实现单级控制系统方案, 通过忽略 AFEC 中各谐振变换器自身及相互的高频动态调节过程, 可将一个多模块的高阶系统化简为简单低阶系统。由于 DC-DC 谐振变换器可工作在近似正弦高频交流模式下, 可采取铁氧体、纳米晶等高频磁芯材料制作高频变压器, 使其工作在 40~100 kHz 下来降低变压器体积与重

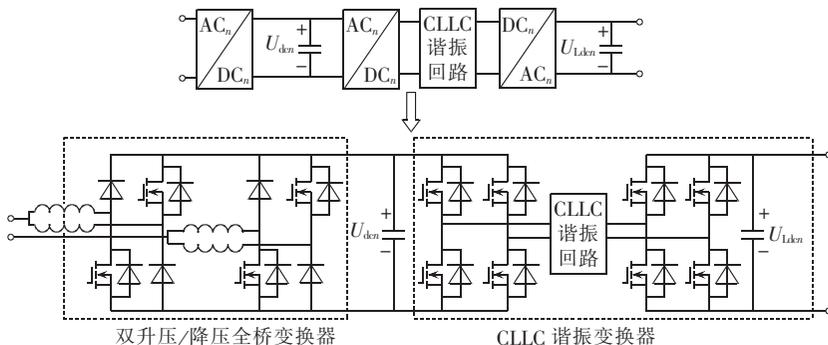


图 6 所提出的双升压/降压全桥变换器+CLLC 谐振模块

Fig.6 Dual Boost/Buck full bridge converter and CLLC resonance module

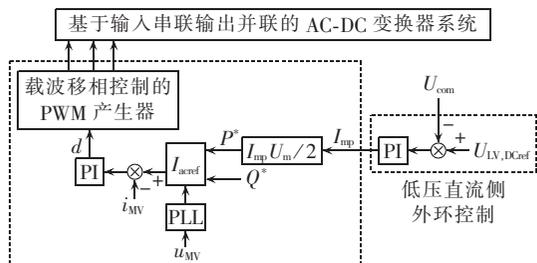


图 7 基于单级控制系统概念的 AFEC 统一控制策略框图

Fig.7 Block diagram of unified AFEC control strategy based on single-stage control system

量等, 同时高频可以提高谐振变换器自身动态调节的反应速度。

#### 3.2 级联型 AFEC 的实验验证

为了进行实验验证, 实际研制了一台带高频隔离型直流变压器模块, 容量为 20 kV·A, 频率为 48 kHz, 变比为直流 900 V/400 V。该模块利用 CLLC 谐振电路结构实现了逆变器 ZVS 和整流器 ZCS, 大幅降低了开关损耗。图 8 为该高频变压器模块在不同负载 (2 kW、10 kW、20 kW) 条件下高频变压器一次侧交流方波电压  $u_{pri}$ 、一次与二次侧高频变压器交流电流 ( $i_{pri}$ 、 $i_{sec}$ )、二次侧直流输出电压  $u_o$  的主要实验波形图, 其最高温度分别为 50.44 °C、59.63 °C 和 89.06 °C, 验证了该模块在不同功率条件下的运行特性和可靠性。

对于两模块双升压/降压全桥变换器+CLLC 谐振模块 AFEC 实验系统, 实验系统参数为: 开关工作频率为 20 kHz, 因采用载波移相控制技术, 故该两模块级联型系统的等效开关工作频率为 40 kHz; 电网电压为 120 V RMS, 50 Hz; 直流侧电压参考命令值  $U_{ord}$  为 215 V。

图 9 给出了在稳态条件下单向双模块级联型 AFEC 的纯有功模式的实验波形, 此时系统功率大约为 830 W, 取决于直流侧公共端的电阻; 图 9(a) 为交流网侧电压  $u_{ac}$ 、电流  $i_{ac}$  和中间直流侧电压  $U_{dc1}$ 、 $U_{dc2}$  的实验波形; 图 9(b) 为交流网侧电压  $u_{ac}$  及电流  $i_{ac}$ 、

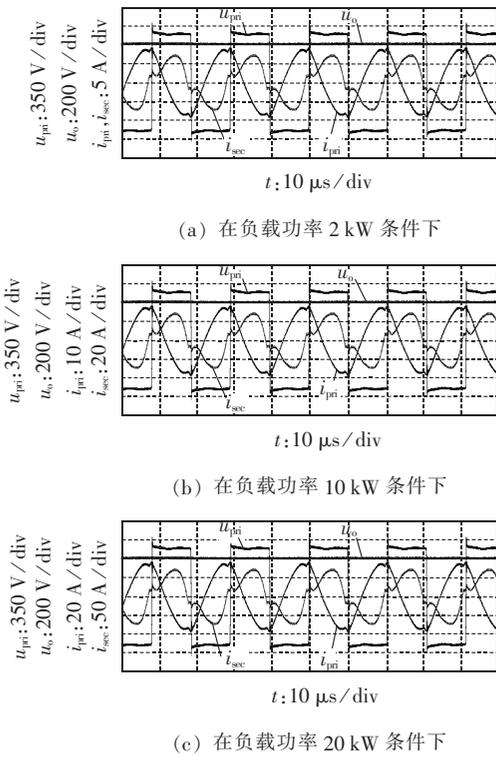


图 8 900 V 输入电压实验波形

Fig.8 Experimental waveform of 900 V input voltage

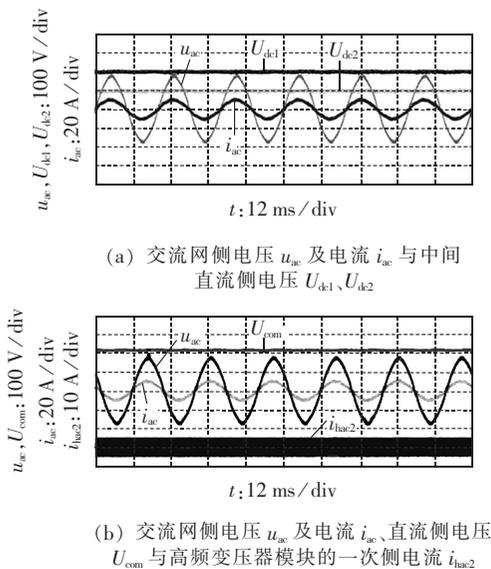


图 9 纯有功模式下的稳态实验波形

Fig.9 Experimental waveforms under steady-state condition in pure active power mode

直流侧电压  $U_{com}$  和某一高频变压器一次侧电流  $i_{hac2}$  的实验波形。从图 9 中可以看出基于谐振变换器的单级控制策略在纯有功模式下能够有效地控制 2 个双升压/降压变换器模块的中间直流侧电压  $U_{dk1}$  和  $U_{dk2}$ , 此时  $U_{dk1}=194.70\text{ V}$ ,  $U_{dk2}=195.42\text{ V}$ ,  $u_{ac}=119.46\text{ V (RMS)}$ ,  $i_{ac}=7.07\text{ A (RMS)}$ ,  $U_{com}=214.4\text{ V}$ 。

当低压直流侧电压参考命令  $U_{LV,DCref}$  发生变化时, 2 个中间独立直流侧电压 ( $U_{dk1}$ 、 $U_{dk2}$ ) 的变化动态

实验波形如图 10 所示, 可以看出输出并联型 DC-DC 谐振模块起到了相应自然调节的作用, 同时能够实现均流及中间直流侧电压箝位的功能, 验证了基于谐振变换器的单级控制策略的正确性和有效性。

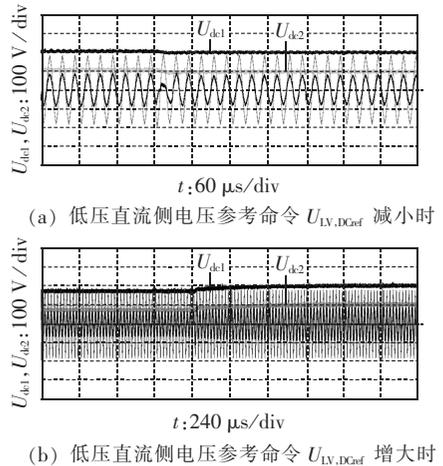


图 10 基于单级控制系统概念的两模块 AFEC 实验波形

Fig.10 Experimental waveforms of two-unit AFEC based on single-stage control system

#### 4 结论

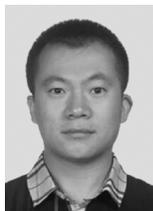
本文以直流配电系统为研究对象, 提出了一种以 AFEC 为基础的未来适用的直流配电系统结构。该系统以用户侧直流电网为基础, 主要包含 AFEC、用户侧 DC-AC 逆变器、电动汽车车载充电器、BESS、分布式新能源发电系统及未来用户直流负载。通过基于双升压/降压全桥变换器与 CLLC 谐振型直流变换器模块的级联型 AFEC 小型实验系统验证了整体系统结构的可行性和单级控制策略的有效性。

#### 参考文献:

- [1] 王晶, 陈江斌, 束洪春. 基于可靠性的微网容量最优配置[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 120-127.  
WANG Jing, CHEN Jiangbin, SHU Hongchun. Microgrid capacity configuration optimization based on reliability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 120-127.
- [2] 王成山, 王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4.  
WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4.
- [3] 袁越, 李振杰, 冯宇, 等. 中国发展微网的目的方向前景[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 59-63.  
YUAN Yue, LI Zhenjie, FENG Yu, et al. Development purposes, orientations and prospects of microgrid in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 59-63.
- [4] 王成山, 杨占刚, 王守相, 等. 微网实验系统结构特征及控制模式分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 99-105.  
WANG Chengshan, YANG Zhangang, WANG Shouxiang, et al. Analysis of structural characteristics and control approaches of

- experimental microgrid systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 99-105.
- [5] 缪源诚,程浩忠,龚小雪,等. 含微网的配电网接线模式探讨[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 17-23.
- MIAO Yuancheng, CHENG Haozhong, GONG Xiaoxue, et al. Evaluation of a distribution network connection mode considering microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 17-23.
- [6] THACKER C T, DONG D, FRANCIS G, et al. Future home uninterruptible renewable energy system with vehicle-to-grid technology[C]//Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Blacksburg, USA: [s.n.], 2009: 2675-2681.
- [7] BOROYEVICH D, CVETKOVICI, DONG D, et al. Future electronic power distribution systems—a contemplative view[C]//12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM). Blacksburg, USA: [s.n.], 2010: 1369-1380.
- [8] BOROYEVICH C D, MATTAVELLI P, LEE F C, et al. Non-linear, hybrid terminal behavioral modeling of a DC-based nanogrid system[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE. Fort Worth, TX, USA: IEEE, 2011: 1251-1258.
- [9] DONG D, LUO F, BOROYEVICH D, et al. Leakage current reduction in a single-phase bidirectional AC-DC full-bridge inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(10): 4281-4291.
- [10] DONG D, THACKER T, CVETKOVICI, et al. Modes of operation and system-level control of single-phase bidirectional PWM converter for micro grid systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 93-104.
- [11] 吴卫民,何远彬,耿攀,等. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 98-106.
- WU Weimin, HE Yuanbin, GENG Pan, et al. Key technologies for DC micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 98-106.
- [12] NILSSON D, SANNINO A. Efficiency analysis of low- and medium-voltage DC distribution systems[C]//Power Engineering Society General Meeting. Denver, CO, USA: [s.n.], 2004: 2315-2321.
- [13] XU S, LUKIC S, HUANG A Q, et al. Performance evaluation of solid state transformer based microgrid in FREEDM systems [C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE. Fort Worth, TX, USA: IEEE, 2011: 182-188.
- [14] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) system[J]. The Energy Internet, IEEE Proceedings, 2011, 99(1): 133-148.
- [15] XU S, 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.
- [16] LAI J S, MAITRA A, MANSOOR A, et al. Multilevel intelligent universal transformer for medium voltage applications[C]//Industry Applications Conference. Hong Kong, China: [s.n.], 2005: 1893-1899.
- [17] LAI J S, MAITRA A, GOODMAN F. Performance of a distribution intelligent universal transformer under source and load disturbances[C]//Industry Applications Conference. Tampa, FL, USA: [s.n.], 2006: 719-725.
- [18] SUNDARAM M A, GANDHI M, BIRD S, et al. Intelligent universal transformer design and applications[C]//20th International Conference and Exhibition, CIRED 2009. Electricity Distribution-Part 1. Prague, Czech Republic: [s.n.], 2009: 1-7.
- [19] LEE Y J, KHALIGH A, EMADI A. Advanced intergrated bidirectional AC/DC and DC/DC converter for plug-in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(8): 3970-3980.
- [20] KIM J S, CHOE G Y, JUNG H M, et al. Design and implementation of a high-efficiency on-board battery charger for electric vehicles with frequency control strategy[C]//Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Suwon, Korea: IEEE, 2010: 1-6.
- [21] FASUGBA M A, KREIN P T. Gaining vehicle-to-grid benefits with unidirectional electric and plug-in hybrid vehicle chargers [C]//Proceeding of IEEE Vehicle Power Propulsion Conference. Illinois, USA: IEEE, 2011: 1-6.
- [22] GAUTAM D, MUSAVI F, EDINGTON M, et al. An automotive on-board 3.3 kW battery charger for PHEV application[C]//Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Columbia, British: IEEE, 2011: 1-6.
- [23] YILMAZ M, KREIN P T. Review of charging power levels and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles [C]//Electric Vehicle Conference (IEVC). Urbana, USA: IEEE, 2012: 1-8.
- [24] SABER A Y, VENAYAGAMOORTHY G K. One million plug-in electric vehicles on the road by 2015 [C]//Intelligent Transportation Systems (ITSC). St. Louis, MO, USA: [s.n.], 2009: 141-147.
- [25] EMADI A, LEE Y J, RAJASHEKARA K. Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric and plug-in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(6): 2237-2245.
- [26] 吕志鹏,罗安,周柯,等. 静止同步补偿器与微网在配电网无功电压协同控制中的联合运用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(增刊): 18-24.
- LÜ Zhipeng, LUO An, ZHOU Ke, et al. Combined application of DSTATCOM and micro-grid in reactive power and voltage collaborative control on distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(Supplement): 18-24.

#### 作者简介:



刘 闯

刘 闯(1985—),男,辽宁新民人,副教授,博士,研究方向为能源互联网柔性功率变换与空间无线电力传输技术(E-mail: victorliuchuang@163.com);

崔剑锋(1989—),男,吉林榆树人,硕士,研究方向为电力电子技术;

刘海洋(1988—),男,吉林长春人,硕士,研究方向为电力电子功率变换技术;

蔡国伟(1968—),男,吉林吉林人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统稳定与控制。

(下转第117页 continued on page 117)

- on Industrial Electronics,2014;20-28.
- [16] CHATURVEDI P,JAIN S,AGARWAL P. Carrier-based neutral point potential regulator with reduced switching losses for three-level diode-clamped inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2014,61(2):613-624.
- [17] 韦微,陈新,樊轶,等. 单周期控制的三相三电平 VIENNA 整流器输出中点电位分析及控制方法研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(15):29-37.
- WEI Zheng,CHEN Xin,FAN Yi,et al. Study and analysis of neutral-point potential and control methods for one-cycle controlled three-phase three-level VIENNA rectifier[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(15):29-37.
- [18] 吕建国,吴馥云,胡文斌,等. 动态搜索调节调制波偏置的 SPWM 三电平逆变器中点电压平衡控制方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):73-79.
- LÜ Jianguo,WU Fuyun,HU Wenbin,et al. Modulation wave offset adjustment by dynamic search to balance neutral-point voltage of three-level SPWM inverter[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):73-79.
- [19] 谢路耀,金新民,吴学智,等. 基于零序注入的 NPC 三电平变流器中点电位反馈控制[J]. 电工技术学报,2012,27(12):117-128.

XIE Luyao,JIN Xinmin,WU Xuezhi,et al. Neutral point voltage feedback control based on zero sequence injection for NPC three-level converter[J]. Transactions of China Electro-technical Society,2012,27(12):117-128.

#### 作者简介:



高铁峰

高铁峰(1986—),男,江苏南京人,博士研究生,主要研究方向为多电平变换器、谐振变换器建模及控制等(**E-mail**:gtf-bryant\_008@163.com);

仲宙宇(1992—),女,江苏常州人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子变换器建模及控制(**E-mail**:zhongzhouyu1992@163.com);

张森(1990—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子变换器控制等(**E-mail**:cumtzhz@126.com);

赵剑锋(1972—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力节能技术、新能源并网技术、电能质量分析治理等(**E-mail**:jianfeng\_zhao@seu.edu.cn)。

## Neutral-point voltage balancing based on one-cycle control for three-phase three-level PFC rectifier

GAO Tiefeng,ZHONG Zhouyu,ZHANG Sen,ZHAO Jianfeng

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

**Abstract:** A dynamic model of three-phase three-level PFC(Power Factor Correction) rectifier is developed based on the generalized state space averaging method. The cause of neutral-point voltage imbalance is studied and the expression of zero-sequence duty ratio is derived,which influences the neutral-point voltage. A modified OCC(One-Cycle Control) is proposed,which introduces the feedforward compensation of zero-sequence duty ratio and the feedback control of neutral-point voltage in single integral cycle,resulting in the enhanced neutral-point voltage balancing capability and the better steady-state and transient performances. Simulative and experimental results validate the correctness and effectiveness of theoretical analysis.

**Key words:** power factor correction; electric rectifiers; neutral-point voltage balancing; one-cycle control; feedforward compensation; feedback control

(上接第 110 页 continued from page 110)

## Active front-end controller for DC distribution

LIU Chuang,CUI Jianfeng,LIU Haiyang,CAI Guowei

(Northeast Dianli University,Jilin 132012,China)

**Abstract:** A DC distribution system architecture based on AFEC(Active Front-End Controller) is proposed to effectively employ and manage the renewable energy resources at customer side,which adopts the AFEC designed based on power electronics technique and high-frequency isolation technique to integrate the distribution step-down transformer with the AC-DC converter for the power conversion between medium-voltage AC grid and low-voltage DC grid. The basic types and different practical applications of AFEC are introduced. The system topology of cascaded AFECs with series inputs and parallel outputs,as well as the functions of its different modules,are analyzed in detail. A small experimental system based on the cascaded AFECs integrating dual Boost/Buck full-bridge converter with CLLC resonance module is built to verify the feasibility of the overall system architecture and the validity of its control strategy.

**Key words:** DC power distribution system; active front-end controller; high-frequency isolation; cascade; electric converters; power balancing