

V2G 充电机拓扑结构综述

张宇探^{1,2}

(1. 国创新新能源汽车智慧能源装备创新中心(江苏)有限公司, 江苏 常州 213000;
2. 万帮数字能源股份有限公司, 江苏 常州 213000)

摘要: 通过应用车辆到电网(V2G)技术, 电动汽车可以作为电网的负载, 也可以作为分布式储能单元。双向充电机是电动汽车与电网间 V2G 的接口。综述了适用于 V2G 的双向充电机的电力电子拓扑结构。这些拓扑结构根据变换器级数可以被划分为两部分: 单级式双向充电机和多级式双向充电机。前者仅包含交流/直流变换级, 近年来受到学术界和工业界的广泛关注。后者是目前常用的结构, 主要包含交流/直流变换级和直流/直流变换级, 也可以根据需求增加其他级。最后总结 V2G 充电机的现状和未来发展趋势。

关键词: 电动汽车; 电力电子; 车辆到电网; 双向充电机; 交流/直流变换器; 直流/直流变换器

Review of charger topologies for vehicle-to-grid technologies

ZHANG Yutan^{1,2}

(1. NEV Smart Energy Equipment Innovation Center Co., Ltd., Changzhou 213000, China;
2. Wanbang Digital Energy Co., Ltd., Changzhou 213000, China)

Abstract: Electric Vehicle can behave either as loads or as a distributed energy resource via vehicle-to-grid technologies. Bidirectional charger is the interface between electric vehicle and grid. In this paper, power electronics topologies of bidirectional charger for V2G are reviewed. These topologies could be grouped in single-stage or multiple-stage type. The former only contains an AC-DC stage, are studied from both industry and academia. The latter is the current state-of-the-art, consists of AC-DC stage, DC-DC stage and others depending on the demand. Finally, the development situation and trend of bidirectional charger for V2G are summarized.

Key words: electric vehicle; power electronics; vehicle-to-grid; bidirectional charger; AC-DC converter; DC-DC converter

0 引言

电动汽车近年来得到了大力推动和发展。相对燃油汽车, 电动汽车有如下几点优点: 首先, 电动汽车使用电能作为能量来源, 因此动力结构相对燃油机更加简单, 需要的保养更少, 能量转换效率更高。并且, 刹车时的能量可以被电动汽车的动力结构回收, 提高了能量利用率。其次, 电能是最便于生产、远距离传输、利用的能源, 因此作为水能、风能、太阳能等环保能源生产利用的中间能源介质。燃油车只能使用化石燃料作为能量来源, 因此无法通过电能来利用新能源。同时会排放出尾气污染环境。而电动汽车使用电能作为能量来源, 可以充分利用这些环保能源。从国家安全考虑, 很多国家对进口化石能源有很大的依赖性, 并且相当一部分用于燃油汽车。电动汽车的发展可以减少化石能源的使用, 进而大幅提高国家能源安全^[1-2]。出于以上原

因, 很多国家出台了各种政策来推行电动汽车的发展和普及^[3-4]。

尽管电动汽车有很多优点, 但是普及电动汽车仍面临诸多挑战。这些挑战可以划分为两个方面: 电动汽车内部和电动汽车外部^[5-7]。

从电动汽车内部考虑, 用于提供驱动电机运行能量的储能电池的重量、体积、价格都较高, 并且有充电循环寿命的问题^[8]。充电速度过快, 会加快电池寿命的衰减。一般在短里程或非紧急情况时, 车主会使用小功率充电机在空闲时进行长时间充电, 减小电池寿命的损耗。但是在长里程或紧急情况下, 电动汽车需要快速充电。如果采用小功率充电桩, 电动汽车充电补能的速度较慢, 会引发车主的里程焦虑。因此在这种情况下, 电池需要快充充电机来进行充电, 从而减少等待时间。充电速度更快的充电机意味着更大的充电功率, 会产生更大的功率耗散引发温升, 对充电机散热提出严苛的要求。

车身内部的散热空间和散热条件都较为有限,因此快充充电机更适合放在车体外部,采用直流充电的方式直接接入车载电池进行充电。

从电动汽车外部考虑,电动汽车充电会给电网带来巨大的负荷^[9]。即使仅考虑慢充,如果有大量的电动汽车集中在同一个时间段进行充电,电网的峰值负荷、电压稳定性等都会受到巨大影响。通过升级电网系统可以明显改善这些问题,但是成本会非常高。为了尽可能避免或减少升级电网系统的成本,很多论文提出了各种方法^[10-12]。通过电动汽车按时间顺序有序充电,来平衡用电负荷,可以减缓电网运行压力。在电网负荷处于峰值时,车载电池通过充电机放电回馈;在电网负荷处于谷值时,电网通过充电机给车载电池充电,实现削峰填谷的效果。因此,如果需要进行 V2G,充电机需要具备回馈和充电两种功能,即可以双向运行。

双向充电机需要高功率密度、高可靠性、低成本等特性。从安全角度考虑,双向充电机需要具备隔离特性,因此本文中仅考虑变压器隔离型双向充电机。隔离型双向充电机可以按照级数可以分为两种类型:单级型和多级型。多级型拓扑结构由交流-直流(AC-DC)级、直流-直流(DC-DC)级和其他级组成,一般有电容值直流母线电容和滤波电容进行功率缓冲^[13-14]。

本文对若干具备双向运行能力的充电机的拓扑结构进行了回顾和比较。这些拓扑结构可以满足 V2G 的需求。在第一部分和第二部分中,拓扑结构被分类为单级型结构和多级型结构分别进行讨论。单级型结构会按照矩阵式和非矩阵式进行分类。多级型结构的整流/逆变级(AC-DC)、直流变换级(DC-DC)、其他级会分别进行讨论。本文在第三部分中会对现状和未来趋势进行分析和展望。最后部分是结论。

1 单级型拓扑结构

单级型拓扑结构^[15-22]不分 AC-DC 和 DC-DC 级,主电路中也不包含电容值直流母线电容,因此体积较小,重量较轻,鲁棒性较好。缺点是没有母线电容做功率缓冲,因此输出电流会有很大的正弦波动,并且正弦波动的功率会给开关管和变压器带来额外的损耗,减少开关管寿命。除此之外,由于仅有一级,因此控制自由度较小。

1.1 非矩阵式拓扑

非矩阵式拓扑由于每个桥臂的电压不能工作在四个象限,因此需要电压折叠部分将交流电压的负半周电压折叠成正电压,母线电容的电压降在零至

交流电压峰值间波动。交流侧功率因数和输出电压由输出控制部分控制,因此策略较为复杂。



图 1 单级型拓扑结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single-stage topologies

如图 2 所示,该拓扑结构^[16]通过四个开关管 S1、S2、S3、S4 折叠交流电压,并通过双有源桥控制交流侧功率因数和输出电压。该拓扑结构的功率因数高、磁元件少。

如图 3 所示,该拓扑结构^[17]适合应用于三相交流电网。与文献[16]的区别是交流电压折叠部分是三相中点钳位结构。

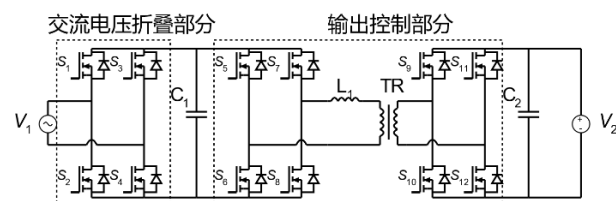


图 2 单相单级型非矩阵式拓扑结构

Fig. 2 Single-phase single-stage non-matrix topology

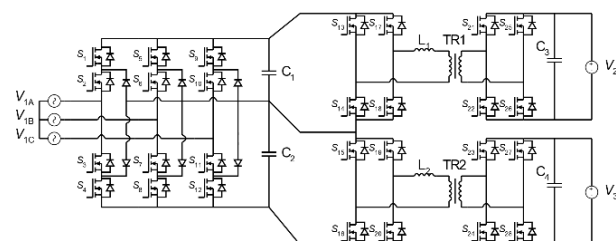


图 3 三相单级型非矩阵式拓扑结构

Fig. 3 Three-phase single-stage non-matrix topology

如图 4 所示,该拓扑结构^[19]是三相模块化结构,同样适合应用于三相交流电网。

应用于三相电网的双向充电机的电池端直流输入/输出电流纹波频率高,幅值相对单相较小。但是三相电压的电压折叠和交流侧功率因数控制相较单相更为困难,所用的开关管数量也更多。

1.2 矩阵式拓扑结构

矩阵式拓扑结构控制开关管对(如图 4 中的 S1、S2)的通断,可以使桥臂四象限工作,即交流侧承受正负电压,并且能量可以双向流通,因此很适合在

单级型双向充电机中使用。但是矩阵式拓扑结构的控制相对复杂,开关管和反并联二极管导通损耗大。

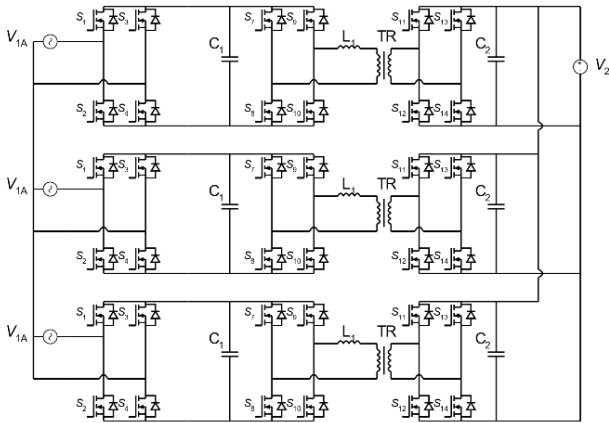


图4 三相单级型非矩阵式拓扑结构 2

Fig. 4 Three-phase single-stage non-matrix topology 2

图4中的单相矩阵式拓扑结构^[20]通过矩阵桥臂开关管 S1、S2 的通断,在交流电压的正负半周对交流电流和输出电流进行控制。电容 C1、C2 和电感 L1、L2 用于对输入电流和输出电流进行滤波。该拓扑结构开关管数量少,成本低。

如图5所示的三相矩阵式拓扑结构^[22]与图4中的单相矩阵式拓扑结构类似。差别在于交流输入侧电压由单相改变为三相,输出功率波动频率更高(六倍工频),幅值更小。缺点是需要更多的开关管,价格更高。

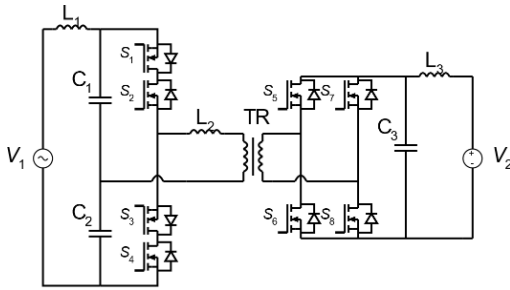


图5 单相单级型矩阵式拓扑结构

Fig. 5 Single-phase single-stage matrix topology

2 多级型拓扑结构

多级型拓扑结构中最常见的是两级型拓扑结构,如图7所示。两级型拓扑结构主要由AC-DC和DC-DC两个功率级组成,两级之间并联高容值的直流母线电容(电解电容)和高频滤波电容(薄膜电容)。多级型拓扑结构还可以包含其他功率级,例如有源功率解耦级。直流母线电容的主要作用是缓冲输入侧传递的二倍频功率波动。通过控制,大部分二倍

频功率波动会被母线电容吸收,因此直流侧电流较为平滑。并且,由于AC-DC级与DC-DC级的控制几乎没有耦合关系,所以控制自由度更高。缺点是直流母线电容体积大,且可靠性相对薄膜电容较差。

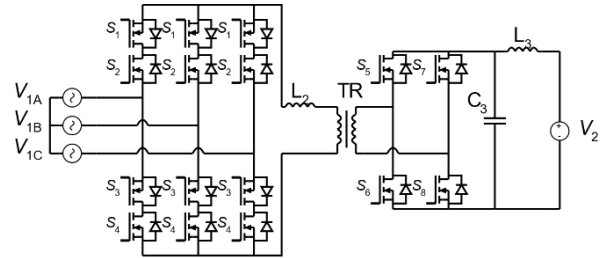


图6 三相单级型矩阵式拓扑结构

Fig. 6 Three-phase single-stage matrix topology

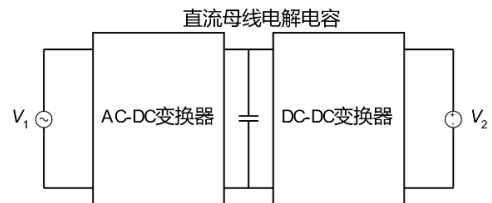


图7 两级型拓扑结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of two-stage topologies

2.1 AC-DC 级

AC-DC 级的主要作用是提供双向的直流功率传输,并对交流侧进行功率因数校正^[23]。目前双向充电机最常用的 AC-DC 是图腾柱式变换器。

如图8所示,图腾柱式变换器是应用范围非常广泛的双向 AC-DC 拓扑结构^[24-25]。该变换器通过控制两桥臂的开通关断,矫正交流侧电流的功率因数,并控制输出电容 C1 的电压。通过调节开关管的开关次序,即可实现整流/逆变模式的切换,具有结构简单、功率因数高、鲁棒性好等优点。

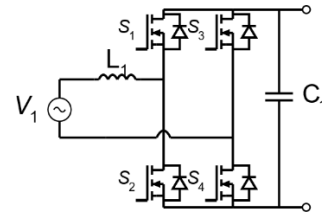


图8 单相图腾柱式变换器

Fig. 8 Single-phase totem-pole converter

如图9所示,三相功率因数校正器适合应用在三相双向充电机中^[26]。与图腾柱变换器结构和工作模式类似。值得注意的是,由于功率因数校正器的输出电流纹波频率更高(六倍工频),幅值更小,因此需要的直流母线电容更小,在可靠性和功率密度

方面有较大优势。图腾柱式变换器和三相功率因数校正器的主要缺点是开关管硬开关, 导致较大的开关损耗的电磁干扰(EMI)。硬开关问题可以通过辅助谐振换流极电路解决, 但需要增加开关管和谐振电感, 并且控制较为困难。

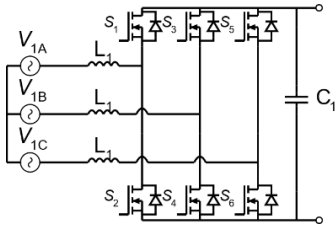


图 9 三相图腾柱式变换器

Fig. 9 Three-phase totem-pole converter

过去, 多电平变换器主要用于高电压高功率设备。但是随着功率半导体, 尤其是宽禁带半导体器件如 GaN 体积和成本的下降, 很多研究都表明在低压设备中使用多电平拓扑可以大幅降低变换器的磁件体积, 提高功率密度和效率^[27-28]。

如图 10 所示, 一个 N 电平的模块化多电平变换器(MMC)的输出纹波频率为开关频率 2N 倍, 因此可以极大地减小滤波电感的体积, 提升功率密度。此外, 通过采用性能表征(FoM)更好的低压开关管, MMC 可以实现比两电平变换器更高的效率^[29]。目前应用的主要难题是开关管和驱动成本高且控制复杂。

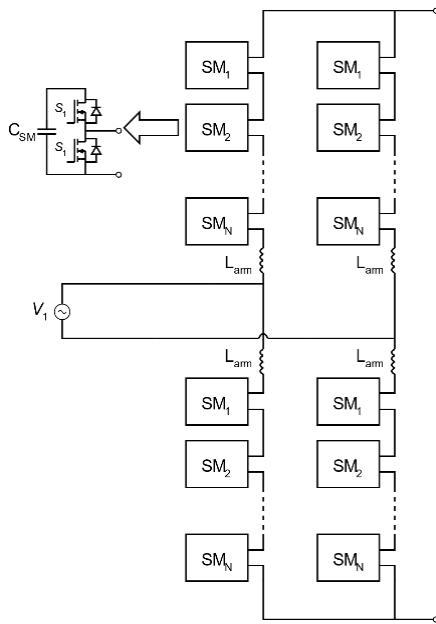


图 10 模块化多电平变换器

Fig. 10 MMC topology

2.2 DC-DC 级

应用较为广泛的双向 DC-DC 变换器有双有源桥^[30]、串联谐振变换器^[31]、CLLC 变换器^[32]等。如图 11 所示, 传统的双有源桥变换器通过原副边桥臂的单移相控制(SPS), 结构简单、频率固定、体积小、鲁棒性好、动态特性好。但是双有源桥在轻载和输入输出电压不匹配时导通和关断损耗较大、容易丢失软开关。通过双移相(EPS)^[33]、扩展移相(DPS)^[34]、三移相(TPS)^[35]等控制方法可以一定程度减轻这些问题, 但控制相对复杂, 并且受寄生参数、元器件散差等影响较大。如图 12 所示, 串联谐振作为双向变换器需要变频和移相控制^[31], 控制策略相对复杂。但串联谐振变换器峰值效率高、损耗小、调频范围窄、功率密度高, 因此被应用于台达等公司的车载充电机产品中。如图 13 所示, CLLC 拓扑结构也被用于双向充电机中, 通过调频可以实现全功率、电压范围的软开关^[32]。但由于电池电压变化范围较大, CLLC 拓扑结构常需要辅以移相控制, 以限制轻载时的调频范围。CLLC 拓扑结构的宽变频控制决定了其变压器需要按照最低频率和最高功率进行设计, 并且由于对谐振参数精度敏感, 谐振电感无法集成, 导致电容、电感、变压器成本较高, 体积较大。

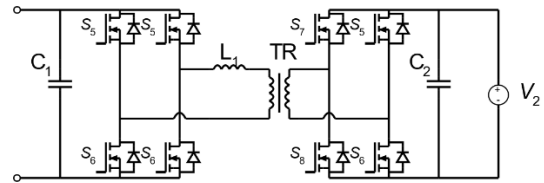


图 11 双有源桥

Fig. 11 Dual active bridge

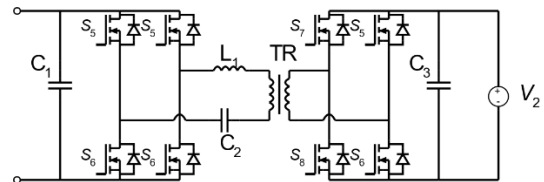


图 12 串联谐振变换器

Fig. 12 Series resonant converter

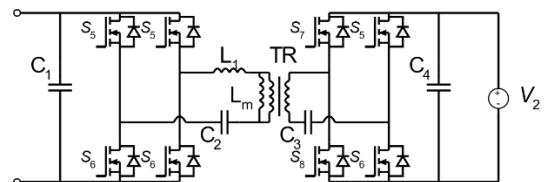


图 13 CLLC 谐振变换器

Fig. 13 CLLC resonant converter

2.3 有源功率解耦级

为了吸收电网侧的二倍频功率波动,解决直流母线电容体积大的问题,可以在两级型拓扑结构的基础上,增加使用有源功率解耦(Active Power Decoupling)拓扑^[36]。有源功率解耦器有很多形式,可以在交流侧、母线侧、直流侧使用。如图 14 所示是一种应用相对广泛的有源功率解耦器,并联在 AC-DC 级和 DC-DC 级之间或输出级之间,替代直流母线电容,从而大幅减小电容需要的容值和体积,十分适合高功率密度场合。缺点是成本较高且有开关损耗。

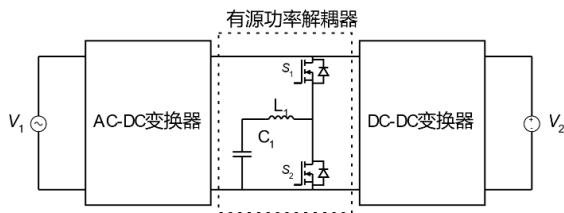


图 14 一种包含有源功率解耦的多级拓扑结构示意图

Fig. 14 Schematic diagram of a kind of multi-stage topologies containing active power decoupling

3 现状与未来趋势

目前充电机的主流拓扑结构还是以单向为主,原因是单向结构控制简单、成本低、可靠性高。但随着 V2G 的不断推广,双向充电机的市场份额在持续扩大。如果未来 V2G 得到全面普及,双向充电机会替代单向充电机占据主流。

综合来看, V2G 双向充电机拓扑结构未来可能会有如下几种趋势:

1) 随着电池电压和能量密度不断提升,价格不断下降,充电机的充放电功率需求也会持续上升。功率提升要求充电机有更高的功率密度、更高的效率、更低的损耗,也对拓扑结构改进提出需求。由于磁件体积和成本的限制,多电平变换器等对磁件依赖小的拓扑结构可能会是潜在的技术趋势。

2) 宽禁带半导体器件的发展,也给充电机带来新的机遇。宽禁带半导体(SiC、GaN)器件耐压高、损耗小、体积小,非常适合应用在需要高功率密度低损耗的场合。可以预见未来的充电机会大量使用宽禁带半导体器件。宽禁带半导体器件开关损耗(尤其是关断损耗)极低,因此未来拓扑结构会着重于开关频率提升和软开通的实现。

3) V2G 馈网的工作曲线和电池充电不同,更多的工况集中在低功率段。为了保证 V2G 的馈网效率,低功率下依然有高效率的拓扑结构可能会更加受到青睐。

4) V2G 技术也对充电机的稳定性和可靠性提出了更高的要求。由于电池能量需要馈网,充电机需要有足够的稳定性和可靠性,才能确保馈网电流干净稳定,不会对电网的稳定性产生影响。

4 结论

本文对适用于 V2G 的充电机的拓扑结构进行系统的综述,并总结了现状和未来的发展趋势。目前市场上多级型双向充电机已经较为成熟,拓扑选择范围也相对小。而单级型充电机目前主要处于学术研究阶段,尚未市场化。技术尚未成熟导致单级型充电机拓扑结构很多,目前还没有优势特别突出的结构。但考虑到单级型充电机小体积、高功率密度、无电解电容等优秀特性,未来会得到越来越多的关注和商业化应用。结合正弦充电、脉冲充电等新的充电方式,可以有效利用单级型充电机的输出电流纹波。此外,随着宽禁带半导体价格逐渐下降、集成化程度逐渐提高,适合使用宽禁带半导体的拓扑结构也会更多的得到关注。最后,由于磁件体积和成本较高,多电平变换器也会成为未来研究的方向。

参考文献

- [1] XUE F, YU R, HUANG A Q. A 98.3% Efficient GaN isolated bidirectional DCDC converter for DC microgrid energy storage system applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(11): 9094-9103.
- [2] EVERTS J, KRISMER F, KEYBUS J V D, et al. Comparative evaluation of soft-switching, bidirectional, isolated AC/DC converter topologies[C] // 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2012, Orlando, FL, USA: 1067-1074.
- [3] MILLER J F, HOWELL D. The EV everywhere grand challenge[C] // 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 2013, Barcelona, Spain: 1-6.
- [4] ZHANG X, YANG J, SUN B, et al. Study on the policy of new energy vehicles in China[C] // 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009, Dearborn, MI, USA: 35-40.
- [5] 王彪, 尹霞. 实时电价下含 V2G 功能的电动汽车理性充放电模型及其分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 90-96.
WANG Biao, YIN Xia. Modeling and analysis on the rational charging and discharging of electric vehicle with V2G function under real-time prices[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 90-96.

- [6] 王鑫, 周步祥, 唐浩. 考虑用户因素的电动汽车有序充放电控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 129-137.
WANG Xin, ZHOU Buxiang, TANG Hao. A coordinated charging/discharging strategy for electric vehicles considering customers' factors[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 129-137.
- [7] 刘辉, 魏岩岩, 汪旒, 等. 电动汽车入网一次调频控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 90-95.
LIU Hui, WEI Yanyan, WANG Ni, et al. V2G control for EVs participating in primary frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 90-95.
- [8] ZOU C, HU X, WEI Z, et al. Electrochemical estimation and control for lithium-ion battery health-aware fast charging[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6635-6645.
- [9] SASSI H B, ERRAHIMI F, ESSBAI N, et al. V2G and wireless V2G concepts: state of the art and current challenges[C] // 2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), 2019, Fez, Morocco: 1-5.
- [10] LIU C, CHAU K T, WU D, et al. Opportunities and challenges of vehicle-to-home, vehicle-to-vehicle, and vehicle-to-grid technologies[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(11): 2409-2427.
- [11] YILMAZ M, KREIN P T. Review of the impact of vehicle-to-grid technologies on distribution systems and utility interfaces[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12): 5673-5689.
- [12] MONTEIRO V, PINTO J G, AFONSO J L. Operation modes for the electric vehicle in smart grids and smart homes: present and proposed modes[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(3): 1007-1020.
- [13] YILMAZ M, KREIN P T. Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2151-2169.
- [14] KHALIGH A, D'ANTONIO M. Global trends in high-power on-board chargers for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4): 3306-3324.
- [15] VAISHNAV S N, KRISHNASWAMI H. Single-stage isolated bi-directional converter topology using high frequency AC link for charging and V2G applications of PHEV[C] // 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2011, Chicago, IL, USA: 1-4.
- [16] EVERTS J, KRISMER F, KEYBUS J V D, et al. Optimal ZVS modulation of single-phase single-stage bidirectional DAB AC-DC converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 3954-3970.
- [17] LU J, BAI K, TAYLOR A R, et al. A modular-designed three-phase high-efficiency high-power-density EV battery charger using dual/triple-phase-shift control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 8091-8100.
- [18] GU L, PENG K. A single-stage fault-tolerant three-phase bidirectional AC/DC converter with symmetric high-frequency Y- Δ connected transformers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 9226-9237.
- [19] CHEN W W, ZANE R, CORRADINI L. Isolated bidirectional grid-tied three-phase AC-DC power conversion using series-resonant converter modules and a three-phase unfold[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(12): 9001-9012.
- [20] LU J, JAUCH F, BIELA J, et al. Single-phase single-stage bidirectional isolated ZVS AC-DC converter with PFC[C] // 2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012, Novi Sad, USA: 1-8.
- [21] TAYEBI S M, XU W, WANG H, et al. A single-stage isolated resonant SiC DC/AC inverter for efficient high-power applications[C] // 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2020, New Orleans, LA, USA: 399-404.
- [22] VARAJAO D, MIRANDA L M, ARAUJO R E. AC/DC converter with three to single phase matrix converter, full-bridge AC/DC converter and HF transformer, International Patent Application WO2 016 024 223[P]. 2016-02-18.
- [23] SINGH B, SINGH B N, CHANDRA A, et al. A review of single-phase improved power quality AC-DC converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(5): 962-981.
- [24] HUBER L, JANG Y, JOVANOVIĆ M M. Performance evaluation of bridgeless PFC boost rectifiers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1381-1390.
- [25] TANG Y, DING W, KHALIGH A. A bridgeless totem-pole interleaved PFC converter for plug-in electric vehicles[C] // 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2016, Long Beach, CA, USA: 440-445.
- [26] WANG X, JIANG C, LEI B, et al. Power-loss analysis and efficiency maximization of a silicon-carbide MOSFET-

- based three-phase 10-kW bidirectional EV charger using variable-DC-bus control[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2016, 4(3): 880-892.
- [27] ASHOURLOO M, ZAMAN M S, NASR M, et al. Opportunities for leveraging low-voltage GaN devices in modular multi-level converters for electric-vehicle charging applications[C] // 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia), May 20-24, 2018, Niigata, Japan.
- [28] PALLO N, CODAY S, SCHAADT J, et al. A 10-level flying capacitor multi-level dual-interleaved power module for scalable and power-dense electric drives[C] // 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2020, New Orleans, LA, USA: 893-898.
- [29] OLIVEIRA E D, ARAUJO S, DOMBERT B, et al. Onboard battery chargers in electric cars: benchmarking a novel 5-level hybrid converter with a full SiC-based approach[C] // PCIM Europe 2014, International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2014, Nuremberg, Germany.
- [30] DE DONCKER R W A A, DIVAN D M, KHERALUWALA M H. A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high-power applications[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1991, 27(1): 63-73.
- [31] LIU G, JANG Y, JOVANOVIĆ M M, et al. Implementation of a 3.3-kW DC-DC converter for EV on-board charger employing the series-resonant converter with reduced-frequency-range control[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(6): 4168-4184.
- [32] LI B, LI Q, LEE F C, et al. A high-efficiency high-density wide-band gap device-based bidirectional on-board charger[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2018, 6(3): 1627-1636.
- [33] BAI H, MI C. Eliminate reactive power and increase system efficiency of isolated bidirectional dual-active-bridge DC-DC converters using novel dual-phase-shift control[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, 23(6): 2905-2914.
- [34] OGGIER G G, GARCÍA G O, OLIVA A R. Switching control strategy to minimize dual active bridge converter losses[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(7): 1826-1838.
- [35] HUANG J, WANG Y, LI Z, et al. Unified triple-phase-shift control to minimize current stress and achieve full soft-switching of isolated bidirectional DC-DC converter[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(7): 4169-4179.
- [36] SUN Y, LIU Y, SU M, et al. Review of active power decoupling topologies in single-phase systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(7): 4778-4794.

收稿日期：2018-09-11； 修回日期：2018-11-24

作者简介：

张宇探(1994—)，男，通信作者，硕士，研究方向为电力电子技术与电力传动等。E-mail: yutan.zhang@wanbangauto.com