

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.02.026

电动汽车充电站直流接入技术研究综述*

俞哲人¹, 聂亮¹, 吕浩华¹, 张弛², 黄帅², 江道灼²

(1. 国网浙江省电力公司 电动汽车服务分公司, 浙江 杭州 310007;

2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对电动汽车及电动汽车充电站以直流方式接入电网的接口电路、控制方法等问题,对电动汽车接入直流电网的难点技术进行了研究。结合直流配电网技术的发展以及目前国内外已有的研究成果,提出了电动汽车充电站接入直流配电网的合理方式。同时,详细分析了以双向DC/DC变流器为主的接口换流装置的种类与功能,并以是否带电气隔离为切入点,将双向DC/DC变换器分为两类,并从拓扑结构、效率、控制难易等方面深入比较其利弊,最后针对三种典型的双向DC/DC变换器进行了比较与效率分析。研究表明,双向三电平变换器以其高效、拓扑结构简单、可靠等诸多优点最适于应用于接口技术中。

关键词: 电动汽车;直流配网;双向隔离式DC/DC变换器;双向非隔离式DC/DC变换器。

中图分类号: TM711 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)02-279-06

Review on the technology of EV charging station accessing to the DC system

YU Zhe-ren¹, NIE Liang¹, LV Hao-hua¹, ZHANG Chi², HUANG Shuai², JIANG Dao-zhuo²

(1. Division of Electrical Vehicle Service, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at resolving the absent difficulties of EV and EV charging station accessing to the grid in DC mode such as interface selection, control strategy. Based on the review of study that has been dressed, method of EV charging station connecting to DC distribution network was put forward. Then, bi-directional DC/DC converter were analyzed in detail from some aspects such as device types and functions. Taking the electrical isolation as a basis, the topologies was classified into two categories. Comparison about the performance of the topologies such as efficiency and control scheme has been made respectively. Three typical bi-directional DC/DC converter were compared and analyzed. In the final analysis, the results indicate that the two-way three level converters are most suitable for application and interface technology accessing to the DC distributed network with its high efficiency, simple structure and high reliability.

Key words: electric vehicles (EV); DC distribution; non-isolated bi-directional DC-DC converters; isolated bi-directional DC-DC converter

0 引言

为了应对全球能源危机和气候变化,近年来世界各国纷纷加速推进汽车产业的转型升级,以电动汽车

(包括燃料电池电动汽车、混合动力电动汽车、纯电动汽车)为代表的新能源汽车成为汽车产业发展的热点。全球主要的汽车制造商均积极进行电动汽车的研发与生产,文献[1]预测在2015年全球将有总数达到170万辆的插入式混合式电动汽车行驶于公路上。

收稿日期: 2014-10-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51361130)

作者简介: 俞哲人(1969-)男,浙江杭州人,工程师,主要从事充换电网络规划方面的研究。E-mail: shuai91629@126.com

发展电动汽车,势必涉及电动汽车接入电网并网的互动影响问题:一方面,规模化电动汽车接入电网(充电),将对电力系统的安全与经济运行带来重大挑战;另一方面,基于前沿信息技术和电动汽车接入电网(vehicle to grid, V2G)技术,可以利用规模化电动汽车构成分布式储能系统,以实现改善电网调频调峰、负荷削峰填谷及间歇性新能源并网发电等运行性能,达到提高系统能源综合利用效率的目的。上述电动汽车与电网互动技术问题,也是目前我国正在开展的智能电网关键技术研发的重要组成部分之一。

结合目前直流配电技术的发展,本研究针对电动汽车充电站接入电网的直流微网技术进行一定程度的综述分析,并在此基础上提出结合直流配网的电动汽车充电站接入方式。之后对直流接入关键技术、双向DC/DC变换器结合国内外文献进行综述与比较分析,分别对双向非隔离式DC/DC变换器,双向隔离式DC/DC变换器进行详细的综述与比较。

1 电动汽车充电站直流接入技术

现有的文献针对直流微网已进行了一定的讨论和研究,通过将大量电动汽车接入直流配电微网中,将电动汽车电池作为储能原件以及分布式能源进行利用,与清洁可再生分布式能源配合,解决可再生能源的波动性与不确定性对电网的产生的影响,利于实现清洁能源的并网接入。以电动汽车作为储能系统的构建单元不仅可以降低对可再生能源接入所需配备的储能系统的构建成本,而且可为电动汽车所有者带来收益。针对V2G运营模式的电动汽车微网构建目前国内外已有一定研究。文献[2]提出了一种电动汽车充电站内的直流微网结构,如图1所示。该微网中的直流部分仅仅为充电站中采用的直流母线部分,利用直流母线可将多台充电设备(采用双向DC/DC变

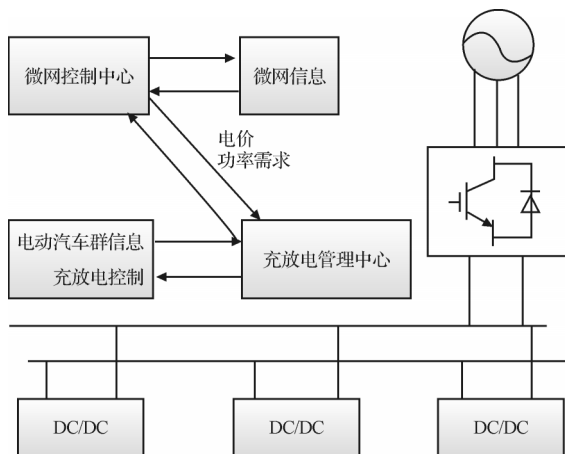


图1 电动汽车充电站直流微网部分

换器)连接为一个整体。而风机、光伏发电设备与燃料电池堆等仍然为接入交流母线之中。

文献[3]提出一种进一步考虑电动汽车直流接入的V2G形式直流微网。文献指出,电动汽车充电站也可建立其配套的光伏发电系统,风机系统或燃料电池堆形成具体的直流微网系统,文献[4]中给出了一个具体的两级直流连接系统,考虑混合型燃料电动汽车与光伏发电系统的拓扑建构与控制问题。结合直流配网的发展趋势,一种可行的电动汽车充电站入网结构如图2所示。文献中提供的结构仅为一个电动汽车充电站的结构拓扑,考虑通过750 V的直流母线将站内分布式能源发电设备如风机、光伏太阳能电池或是燃料电池堆以及电动汽车双向DC/DC充电装置、超级电容连为一体,并通过高功率双向AC/DC变换器接入电网。

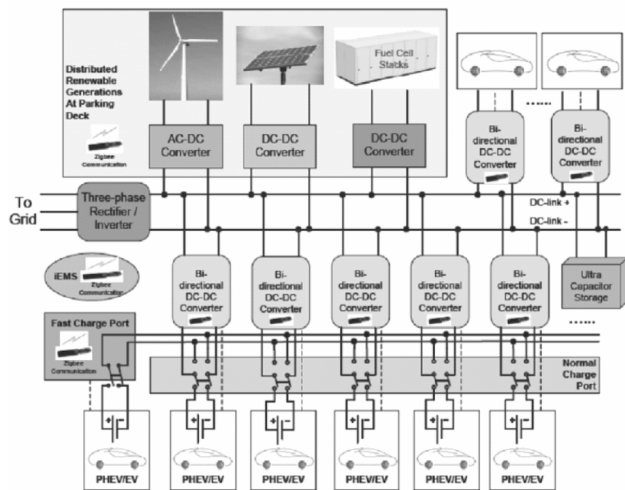


图2 一种可行的电动汽车充电站直流微网的结构拓扑

在直流微网的基础上结合直流配电网的发展,一种可以考虑将电动汽车充电站直接接入直流配网中,电动汽车充电站的发展趋势将与未来直流配电网的发展相辅相成,以直流方式通过双向DC/DC变换器直接将直流汽车充电站接入直流配电网中。直流配网可以非常容易地容纳电动汽车充电站、光伏发电设备、风电、超级电容等。光伏发电设备发出的一种随机波动的直流电,需要DC/AC变换器,并配置适当的储能装置和复杂的控制系统等才能实现交流并网;风电等则是一种随机波动的交流电,同样需要AC/DC/AC变换器,并配置适当的储能装置和复杂的控制系统才能实现交流并网,而在直流配电网情况下,实现分布式新能源并网发电及储能等的接口设备与控制技术相对要简单得多。电动汽车的充电设备本来就是在直流情况下工作的,考虑采用直流配网,则电动

汽车充电站的配网接入将变得十分方便,采用双向DC/DC变换器即可接入电网。当电动汽车形成规模之后,利用电动汽车的电池作为能量储存设备,在V2G运行模式下可以很好地解决各种分布式能源:风机、光伏发电设备的间歇性问题,同时可对电网削峰填谷起到很好的作用。以直流环状拓扑结构的配网为例,电动汽车充电站接入的直流配网结构如图3所示。

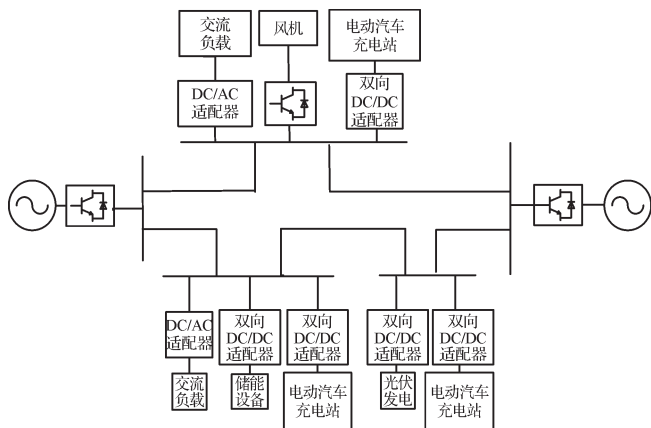


图3 电动汽车充电站接入的直流配网结构

对于电动汽车接入出电站直流系统以及电动汽车充电站接入直流配网的接入而言,双向DC/DC变换器最为其接口起了至关重要的作用,其能否高效、可靠运行对充电站而言至关重要。本研究将针对双向DC/DC变换器进行综述。

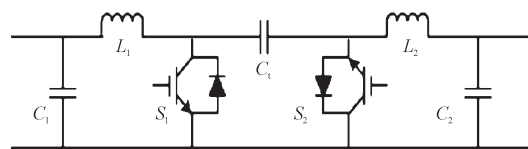
目前文献中针对电动汽车接口的双向DC/DC变换器的研究主要可以分为两大类,即为隔离式双向DC/DC变换器与非隔离式双向DC/DC变换器。下面笔者针对两种类型的变换器进行各种拓扑结构的综述与分析。

2 非隔离式双向DC/DC变换器

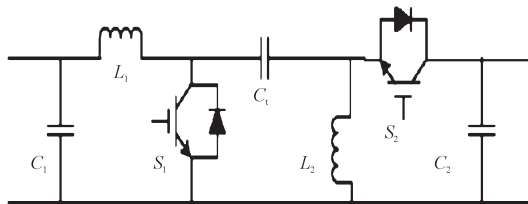
非隔离式双向DC/DC变换器结构简单,成本低,且具有很高的可靠性与转换效率。用于电动汽车接入的主要的几种拓扑方式主要有:半桥非隔离变换器,CuK变换器,SEPIC/Luo变换器和双向三电平变换器等,它们的部分拓扑结构如图4所示。

由以上基础拓扑结构衍生出的扩展结构有级联式半桥变换器、交错式半桥变换器等。其拓扑结构如图5所示。

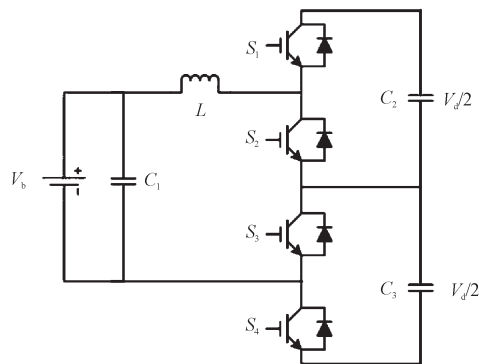
半桥式变换器的拓扑结构是非隔离式DC/DC变换器中应用最为广泛使用的一种结构,该结构可分别运行于Buck及Boost模式,实现能量的双向交换。CuK变换器,SEPIC/Luo变换器则通过两个动态开关



(a) CuK变换器

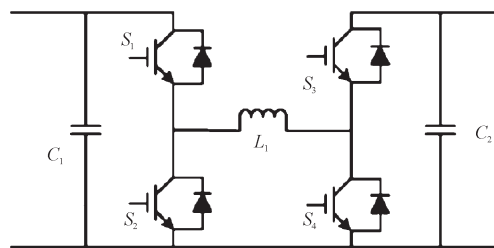


(b) SEPIC/LUO变换器

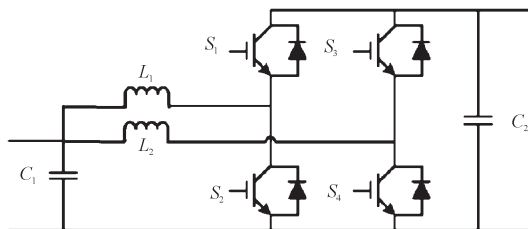


(c) 双向三电平变换器

图4 几种非隔离式DC/DC基本变换器的拓扑结构图



(a) 级联式半桥变换器



(b) 插入式半桥变换器

图5 几种扩展型非隔离式DC/DC基本变换器的拓扑结构图
的切换实现能量的双向交换。由于扩展型非隔离式DC/DC基本变换器的拓扑结构可以看做是半桥变换器的衍生,其分析也可基于基本半桥变换器。从拓扑结构而言,半桥变换器相比于CuK变换器,SEPIC/Luo变换器少用一个电感 L_2 以及一个电容 C_i 。针对3个电路中的电感电流以及晶体管中电流的分析比较可

知:在两端电压等级与传输能量相同时,3个变换中电感 L_1 的电流强度相当,而CuK变换器,SEPIC/Luo变换器中电感 L_2 将带来的额外能量损失;且CuK变换器,SEPIC/Luo变换器中的晶体管中电流强度及二极管中的电流强度均比半桥变换器中的要大。因此,半桥变换器相比于CuK变换器,SEPIC/Luo变换器具有更高的转换效率。

但当考虑到低压一侧的电压变化时,半桥变换器的效率会发生改变。以实际电动汽车充电时为例,其电池一侧的电压变化范围考虑为:180 V~360 V。当电池一侧电压较高时板桥变换器中的电容电流以及晶体管中电流均较低,但当电池一侧电压处于低压水平时,如为180 V时,此时变换器中电流将明显增大,带来转换效率的显著降低。针对此种情况,可采用变频脉宽调制的控制策略代替原来的普通脉宽调制进行控制。在低电电池电压水平下不论是Buck还是Boost模式采用变频脉宽调制均将使效率提高1%~2.5%。在此种控制策略下晶体管开关频率将随着低压一侧的电压大小而变化,将使得变换器在低压侧低电压水平时转换效率得以提高。不过,在变频脉宽调制的控制下相比原脉宽调制电感中的电流波动水平会稍有增大,但考虑到电容 C_1 的滤波作用,这一纹波电流不会对低压一侧产生明显影响^[4]。

三电平变换器可分为中性点钳位(Neutral Point Clamped)型,二极管钳位(Diode Clamped)型,灵敏电容(Flying Capacitor)型等。图4中的拓扑结构为中性点钳位(Neutral Point Clamped)型的三电平变换器,相比于半桥变换器更具有明显的优势。在同等电压水平下,三电平变换器的管压降仅为半桥变换器的管压降的一半,因此可选择轻型号的晶体管,而且三电平变换器使用的储能元件数明显减少,且所需电感规格大小仅为半桥中的三分之一。因此,三电平变换器相比半桥变换器具有更高的转换效率且更低的成本。文献[5-8]中提供的三电平变换器与半桥变换器的效率比较结果表明,三电平变换器相比变频脉宽调制的半桥变换器效率提高2%~3%。因此,在非隔离的双向DC/DC变换器中,三电平变换器更适于电动汽车及其充电站的接口实际应用。

3 隔离式双向DC/DC变换器

虽然非隔离式双向DC/DC变换器成本较低且结构简单,但出于安全性与可靠性的需要,在实际应用中,往往还需要考虑实现两端直流隔离,因此需要采用具有变压器隔离的双向开关变换器。隔离式双向

DC/DC变换器在V2G模式中的应用将具有提高能量密度,减少交换功率,提高运行安全可靠,限制故障电流的作用^[9-10]。

隔离式双向DC/DC变换器的基本拓扑结构可归纳为由电压型(voltage-fed)拓扑结构和电流型(current-fed)拓扑结构,两种基本拓扑结构如图6所示。

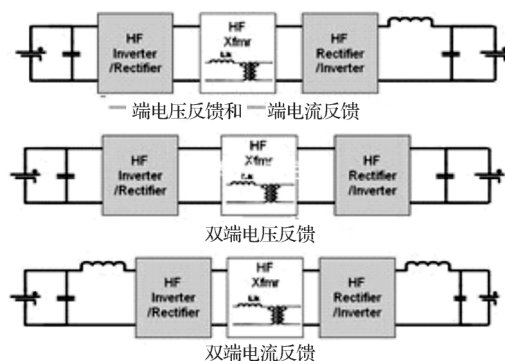


图6 由电压型及电流型组成输入输出端的隔离式双向DC/DC变换器基本拓扑结构

其组成的基本拓扑结构的原件为高频电感,高频变压器以及高频的变换器子电路。而基本的高频变换器子电路拓扑结构包括:全桥(full-bridge)变换器,半桥(half-bridge)变换器,推挽(push-pull)变换器,中心抽头(center-taped)变换器,L型半桥(L-type half-bridge)变换器和电流倍增(current-doubler)变换器。

文献[11]对目前主要研究与运用与实际的一种典型双向隔离式DC/DC变换器进行了综述研究与比较分析。

一种被广泛运用的拓扑结构为:一侧为电压源型,另一侧为电压源型的变换器及其衍生结构。其中比较分析后最具代表性的一个拓扑结构为电压源-电流源有源钳位(VCFFB)双向隔离式DC/DC变换器,其结构如图7所示。

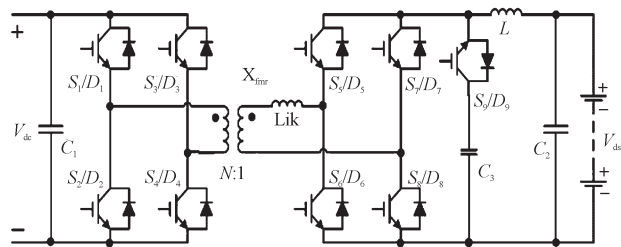


图7 电压源-电流源有源钳位(VCFFB)双向隔离式DC/DC变换器结构拓扑

这一拓扑结构具有如下优点:电流源一侧所有开关管均能实现零电压切换,而在电压源一侧则可实现零电压或零电流切换;由于不存在线路中的环流电流,其相比于普通的相控全桥变换器效率大大提高。

而其主要缺点为电流电流源一侧开关管的冲击电压值将比该侧的电压源 V_{ds} 电压值高。因此,该拓扑结构适宜用于 V_{ds} 为较低电压的电压源的情况下。这一拓扑结构也存在不少衍生结构,如将两侧全桥电路用半桥电路替代等。

另一种典型拓扑结构为双重有源桥电路(DAFB—dual active full-bridge bridges),其组成为两侧均使用电压源型的全桥电路,其拓扑结构如图8所示,该变换器拓扑结构广泛运用于能量储存系统与发动机驱动系统中^[12-14]。

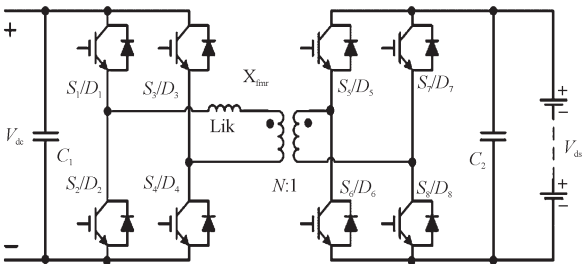


图8 两侧电压源型的双向DC/DC变换器

该变换器控制简单,两侧开关均可实现零电压切换,而且与VCFFB结果相比使用的开关管数也要少,由于开关管的电压冲击值较小,该拓扑结构的效率较高。该拓扑结构主要缺点为在轻载时功率因数较小,变换器效率较低。另一个缺点为实现最优运行时其电压范围较为狭窄。

其中,文献[15]还提及一种重要的拓扑结构为带有钳位电容的双向串联谐振变换器(The bi-directional series resonant DC-DC converter with clamped capacitor voltage, 简称为 Resonant), 结构如图9所示。

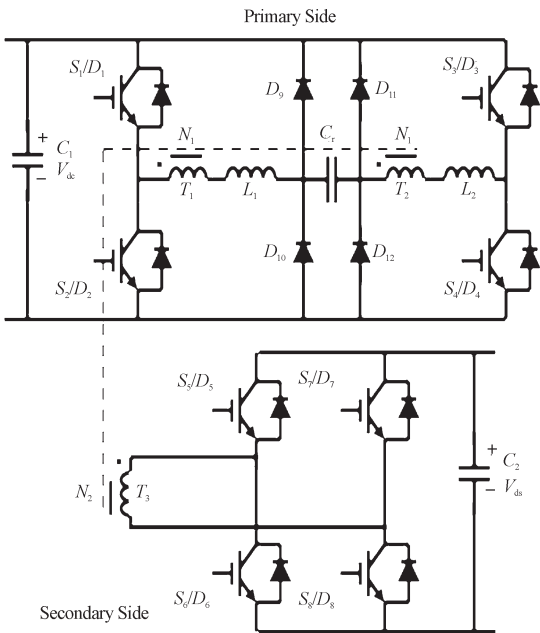


图9 带有钳位电容的双向串联谐振变换器

相比DAFB变换器实验分析表明,带有钳位电容的双向串联谐振变换器在轻载时冲击电流大大减小,其轻载时的环流电流大小也比DAFB变换器小,因此在轻载时其效率相对于DAFB变换器明显提高。文献[11]中提供了DAFB变换器与带有钳位电容的双向串联谐振变换器(Resonant)在35 kW满载时的双向实验效率比较结果,实验表明 Resonant 变换器相比 DAFB 变换器在输出电压较高时效率提高2%左右,而在输出电压较低时 DAFB 变换器较 Resonant 变换器效率高出约1%左右。

综合比较3个电路拓扑结构如表1所示。本研究从原件个数、冲击电压与冲击电流大小、轻载环流情况、软开关切换范围、输出错误容许度、控制复杂性等各方面进行了优、劣势比较。

表1 3个DC/DC变换器的综合比较

参数	VCCFB	DAFB	RESONANT
开关频率/kHz	50	50	50
恒定频率	是	是	是
恒定电流	否	是	否
IGBT数	9	8	8
二极管数	9	8	12
$s_1 \sim s_4$ 电压/V	750	750	750
$s_5 \sim s_8$ 电压/V	920	600	600
串联电感/ μ H	2.0	26.3	2×11.6
缓冲电容/ μ H	0	0	0.9
滤波电感/ μ H	100	0	0
软开关	ZCS/ZVS	ZVS	ZVS
短路电流限制能力	否	是	是
电压应力	高	低	低
控制难易	一般	简单	复杂

4 结束语

本研究针对电动汽车及电动汽车充电桩以直流方式接入电网的技术进行了综述。首先,结合现有文献与研究中对电动汽车充电桩直流微网的有关研究进行了综述与比较,在此基础上结合直流配电网技术的发展提出了基于直流配电网技术的电动汽车充电桩接入方式。其次,针对电动汽车及电动汽车充电桩直流接入的主要技术:双向DC/DC变换器进行了综述分析。分别针对双向隔离式DC/DC变换器与双向非隔离式DC/DC变换器的各种拓扑结构进行了综述,结合相关文献以及相关研究结果对各种拓扑结构进行了比较分析。在双向非隔离式DC/DC变换器的综述中,最后得出结论:双向三电平变换器以其高效,拓扑结构接单可靠等诸多优点最适于应用与接口技术

中。而针对双向隔离式DC/DC变换器的综述,分别对各有利弊的3种主要拓扑方式:VCFFB变换器,DAFB变换器,Resonant变换器进行了拓扑比较与效率分析。

目前,关于电动汽车的各种技术研究仍处于不是十分完善的阶段,大量有关电动汽车充电站的直流接口技术的研究与工作仍待进一步开展。

参考文献(References):

- [1]. The Global Outlook for PHEVs: Business Issues, Technology Issues, Key Players, Market Forecasts[R], Pike research, 2009.
- [2] CUI Shu-mei, LIU Xiao-fei, TIAN De-wen, et al. The Construction and Simulation of V2G System in Micro-grid[C]. IEEL 2011 Electrical Machines and Systems (ICEMS), International Conference, 2011:1-4.
- [3] GURKAYNAK Y, KHALIGH A. Control and Power Management of a Grid Connected Residential Photovoltaic System with Plug-in Electric Vehicle (PHEV) Load[C]. IEEE 2009 Applied Power Electronics Conference, 2009:2086-2091.
- [4] DU Yu, ZHOU Xiao-hu, BAI San-zhong, et al. Review of Non-isolated Bi-directional DC-DC Converters for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charge Station Application at Municipal Parking Decks[C]. IEEL 2010 Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010: 1145-1151.
- [5] RUAN X, LI B, CHEN Q, et al. Fundamental considerations of three-level DC - DC converters: topologies, analyses, and control[J]. **IEEE Transactions on Circuits and Systems**, 2008, 55(11): 3733-3743.
- [6] CUZNER R M, BENDRE A R, FAILL P J, et al. Implementation of a Non-Isolated Three Level DC/DC Converter Suitable for High Power Systems[C]. IEEE 2007 Industry Applications Conference, 2007: 2001-2008.
- [7] SHI Y, JIN Z, CAI X. Three-Level DC-DC Converter: Four Switches $V_{smax}=V_{in}/2$, TL Voltage Waveform before LC Filter[C]. IEEE 2006 Power Electronics Specialists Conference, 2006.
- [8] YOUSEFZADEH V, ALARCON E, MAKSIMOVIC D. Three-level buck converter for envelope tracking in rf power amplifiers[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2006, 21(2): 549-552.
- [9] AGGELER D, CANALES F, ZELAYA-DE LA PARRA H, et al. Ultra-fast DC-charge infrastructures for EV-mobility and future smart grids [C]. IEEE 2010 PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, 2010: 1-8.
- [10] KUTKUT N H, DIVAN D M, NOVOTNY D W, et al. Design considerations and topology selection for a 120 kW IGBT converter for EV fast charging[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 1998, 13(1): 169-178.
- [11] YU D, LUKIC S, JACOBSON B, et al. Review of High Power Isolated Bi-directional DC-DC Converters for PHEV/EV DC Charging Infrastructure[C]. IEEL 2011 Energy Conversion Congress and Exposition. 2011: 553-560.
- [12] DYLAN C E, OMER C O, KHALIGH A. Bi-Directional Charging Topologies for Plug-in Hybrid Electric Vehicles [C]. IEEL Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE. 2010: 2066-2072.
- [13] INOUE S, AKAGI H. A Bi-Directional DC/DC Converter for an Energy Storage System. In 2007 Applied Power Electronics Conference[C]. APEC 2007-Twenty Second Annual IEEE. 2007: 761-767.
- [14] 曾耀国. 电动汽车用高性能双向 OC/OC 变换器的研究[D]. 广州: 广东工业大学信息工程学院, 2011.
- [15] YU Du, XIAO Bian, LUKIC S, et al. A Novel Wide Voltage Range Bi-directional Series Resonant Converter with Clamped Capacitor Voltage[C]. IEEL 2009 Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE. 2009: 82-87.

[编辑: 张 豪]

本文引用格式:

俞哲人, 聂 亮, 吕浩华, 等. 电动汽车充电站直流接入技术研究综述[J]. 机电工程, 2015, 32(2): 279-284.

YU Zhe-ren, NIE Liang, LV Hao-hua, et al. Review on the technology of EV charging station accessing to the DC system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(2): 279-284.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>