

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.01.003

移动负载的动态无线供电系统发展及关键技术

张政, 张波

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要:随着移动负载对动态无线充电功能的迫切需求,动态无线供电技术逐步进入人们的视野并成为新的研究热点。文中首先针对现有动态无线供电系统的主要结构及优缺点进行比较研究;然后分别从高频逆变电路、补偿网络、电磁耦合机构、供电线圈切换方法和电磁兼容等方面,探讨动态无线供电系统的关键技术;最后结合近年来国内外学者的研究成果,对动态无线供电技术的工程应用现状进行总结分析,并对动态无线供电技术在未来的发展趋势进行了预判,指出动态无线供电技术在自动导引车、变电站智能巡检机器人、移动式机电设备、轨道交通和电动汽车等领域将具有广阔的应用前景。

关键词:移动负载;动态无线供电;发展现状;关键技术;应用前景

中图分类号:TM74

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)01-0021-10

0 引言

与使用线缆传输电能的方式相比,无线供电技术的应用有着显著优势,如安全可靠、环境适应能力强、用户体验优越等。因此,近年来无线供电技术得到了飞速发展,有了全新的突破^[1-2],但同时也存在供电位置固定、抗偏移性能差的局限性,使得诸如电动汽车、有轨电车等移动负载只能停留在指定的位置进行无线充电。而移动负载的主要特点是充电位置的实时变化,由此产生的充电频繁、续航里程短、电池用量大等问题成为了无线充电技术在移动负载领域应用的发展瓶颈。在此背景下,动态无线供电技术(dynamic wireless power transfer, DWPT)应运而生,并成为移动负载无线供电的研究热点。

现有的DWPT系统基本采用磁耦合的形式进行能量传输,其原理是利用埋在负载移动轨迹下的发射线圈,在高频功率源的驱动下产生高频交变磁场,当负载在该轨迹上运动时,通过自身携带的接收线圈拾取电能,从而给储能设备或电机供电。其中,磁耦合式DWPT系统又可以根据其原理的不同分为磁耦合感应式和磁耦合谐振式。一般地,磁耦合谐振式DWPT系统应用于输出功率从几十瓦到几千瓦,并要求中远距离无线供电的场合;磁耦合感应式DWPT系统则应用于中大功率,但传输距离在几厘米以下的场合^[3]。在设计DWPT系统时,应根据实际应用场景和供电目标合理选择DWPT的形式,目前在电动汽车和轨道交通领域普遍采取磁

耦合感应式DWPT系统^[4],而在一些对传输距离较大的场合则采用磁耦合谐振式DWPT系统。DWPT技术的发展,不仅可以使得动力电池运行在浅充浅放状态,提高电池的使用寿命、减少所需安装容量、削减使用成本,甚至还可以彻底解放电池的使用,在不需要电池而是直接给电机供电的应用场景中,可大大节省电池用量、改善环境^[5]。移动负载的DWPT技术作为无线电能传输技术不断突破,实现大规模产业化、商业化进程中需要攻克的关键技术课题,是无线电能传输技术的必要补充,具有重要的战略意义和研究价值。

文中首先介绍了DWPT系统的基本结构,并归纳和比较了其优缺点,接着对DWPT系统的关键技术进行了详细地探讨,最后在总结国内外现有DWPT技术研究进展的基础上,对DWPT技术在未来各个领域的应用前景进行了展望。

1 DWPT系统的主要结构

DWPT系统主要由直流电源、高频逆变器、补偿网络、耦合机构、整流电路、DC/DC电路以及负载构成,如图1所示。移动负载要求电源在负载移动过程中对其进行持续稳定的无线充电,因此,DWPT系统能量接收侧的结构与静态无线供电系统基本相同,而能量发射侧的结构与静态无线供电系统存在较大的差异。DWPT系统的移动负载由接收线圈、补偿电容、整流电路、DC/DC电路和负载构成,而能量发射侧根据发射线圈供电方式的不同分为长导轨式、线圈阵列式和分段导轨式3种主要结构,如图2所示,其中线圈阵列式和分段导轨式结构又可以统称为分段线圈式DWPT系统。

收稿日期:2019-08-17;修回日期:2019-09-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51437005)

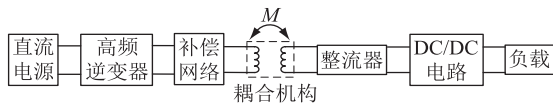


图1 DWPT系统的组成部分

Fig.1 The component of DWPT

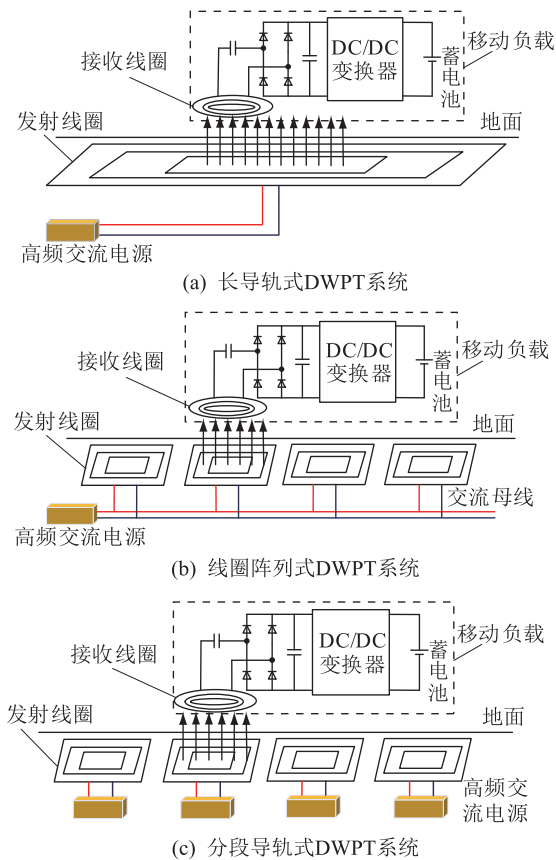


图2 DWPT的主要结构

Fig.2 The main structure of DWPT

长导轨式 DWPT 系统采用单个高频交流电源对单个发射线圈供电的方式,发射线圈沿负载的移动轨迹不间断铺设,其长度远远超过接收线圈,如图 2(a)所示。该结构的特点是负载在移动的过程中,收发线圈之间的耦合互感相对稳定,由负载移动造成的传输功率波动较小,但由于发射线圈过长会造成较大的电能损耗和电磁泄漏。

线圈阵列式 DWPT 系统采用单个高频交流电源对多个发射线圈供电的方式,其中多个发射线圈之间相互并联连接,如图 2(b)所示。其特点是发射线圈数量多,且存在大量的供电切换点,负载在移动的过程中,收发线圈之间的耦合互感变化大,传输功率波动较大,需要设计相应的能量控制策略,但所需高频交流电源数量少,维护成本低。

分段导轨式 DWPT 系统采用多个高频交流电源对多段发射线圈供电的方式,每一段发射线圈由一个高频交流电源单独供电,如图 2(c)所示。该结

构所需发射线圈数量较多,每段发射线圈大小形状相同,且一般较接收线圈更长,在负载的移动过程中,每段发射线圈与接收线圈之间的耦合互感变化较小,能量传输较稳定,但负载通过相邻两段发射线圈时的能量波动较大,需要设计相应的线圈切换供电方法,且高频交流电源较多,维护成本较大。

DWPT 系统的主要结构及优缺点如表 1 所示。

表 1 DWPT 的主要结构及优缺点

Table 1 The advantages and disadvantages of the main structure of DWPT

分类	发射线圈数量	系统效率	稳定性	建造成本
长导轨式	单个	控制简单,效率低	输出功率波动小,系统稳定	建造周期短,成本低
线圈阵列式	很多	控制复杂,效率高	切换点多,输出功率波动较大	建造周期较长,成本较高
分段导轨式	较多	控制较复杂,效率高	切换过程输出功率波动大,切换点较多	建造周期适中,成本较高

其中,在发射线圈数量方面,线圈阵列式和分段导轨式 DWPT 系统所需发射线圈数量较多,但线圈之间相互独立、互不影响,而长导轨式 DWPT 系统采用单个发射线圈,结构相对简单,但存在导轨中某一处发生故障时将影响整段发射导轨工作的缺点,可靠性较差;在系统效率方面,长导轨式 DWPT 系统控制简单,但由于发射线圈远远长于接收线圈,发射线圈上存在较大的损耗且电磁泄漏严重,而线圈阵列式和分段导轨式 DWPT 系统的效率较高,但往往需要设计复杂的能量控制方法,设计难度更大;在稳定性方面,长导轨式 DWPT 系统对负载移动过程中的互感变化鲁棒性更强,功率传输更稳定,线圈阵列式 DWPT 系统存在大量的供电切换点,输出功率波动较大,而在分段导轨式 DWPT 系统中,移动负载经过每一段发射线圈时的功率波动较大,需要设计精确的供电线圈切换策略;在建造成本方面,长导轨式 DWPT 系统结构简单,施工方便,建造周期最短,成本最低,而线圈阵列式 DWPT 系统发射线圈数量多,建造周期长,成本较高,分段导轨式 DWPT 系统建造周期适中,但由于每一段发射线圈均需要一个高频交流电源供电,建造成本最大。

2 DWPT 系统的关键技术

DWPT 系统不同于静态无线供电系统,负载的移动及轨迹的偏移使得耦合互感动态变化,从而引起传输功率的剧烈波动,且移动速度的大小、负载

的投切等因素也将给充电系统带来不利影响。国内外学者及研究机构的积极探索使 DWPT 技术得到了长足发展,但是相关理论和技术的研究尚未成熟,仍存在一些关键技术需要攻克,主要包括高频逆变器、补偿网络、电磁耦合机构、供电线圈切换方法和电磁兼容等方面。

2.1 高频逆变电路

在 DWPT 系统中,高频逆变器的功率传输能力、负载适应性、抗短路开路能力和工作频率等参数都会影响系统整体性能^[6]。由于现有 DWPT 系统的研究主要在电动汽车、轨道交通等大功率领域,因此对高频逆变器的研究集中在三相高频逆变电路,组合式逆变电路以及多电平逆变电路等方面^[7-11]。

三相桥式高频逆变电路如图 3 所示,其交流侧采用三相对称的连接方式给负载供电,由 6 个功率开关管构成。组合式高频逆变电路如图 4 所示,由 3 个完全相同的单相全桥逆变电路采用并联的方式组成,每个单相逆变电路输出一路电流,驱动一相发射线圈,三路驱动互不干扰,实现三相发射线圈独立控制。组合式高频逆变电路具有冗余作用,能有效提高 DWPT 系统的可靠性。近年来,多电平逆变电路因其功率因数高、输出功率大等特点被用于轨道交通的 DWPT 场合。三相三电平高频逆变电路如图 5 所示,其交流侧每相输出电压相对于直流侧有 3 种取值,分别为 $+U_d/2$ 、 $-U_d/2$ 和 0,该拓扑可以消除输出电压谐波,提高输出功率等级,但所用开关器件数量较多,控制复杂。

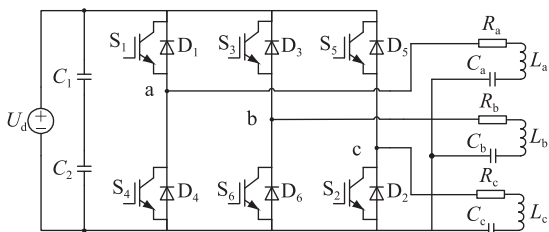


图 3 三相桥式逆变电路

Fig.3 Three-phase bridge type inverter circuit

在实际应用中,高频逆变电路基本都是基于以上拓扑进行改进优化的。为提高输出功率范围,文献[7]将三相供电轨道替换为单轨供电,成功应用于移动玩具车的 DWPT 系统,但该方法中各轨道相位之间的相互耦合仍需要额外补偿以确保三相电流的平衡。为解决组件容差导致的不均匀功率共享问题,文献[10]通过并联 3 个 2 kW 逆变器,构建了 1 个 6 kW 的组合式高频逆变电源,效率可达 94%,对于组合式逆变电路,一般还可以通过并联相

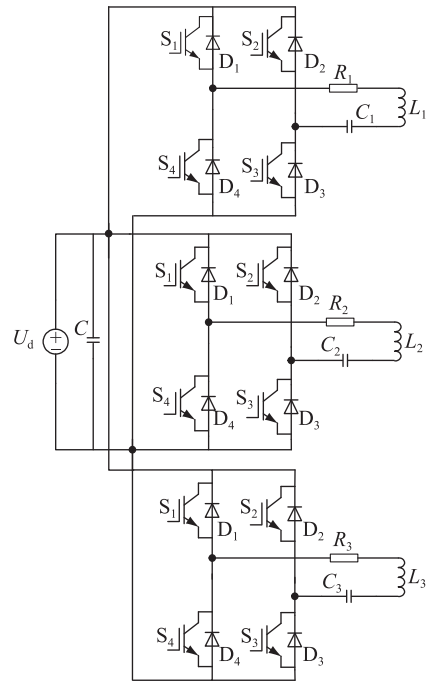


图 4 组合式逆变电路

Fig.4 Combined inverter circuit

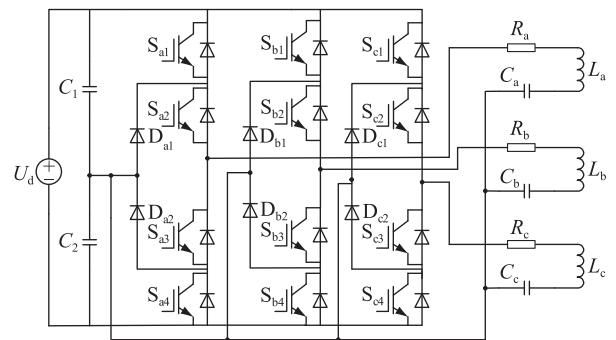


图 5 三相三电平逆变电路

Fig.5 Three-phase three-level inverter circuit

同的模块来实现灵活的输出功率。文献[11]基于逆变器多种组合方式实现了输出功率 3 kW、效率可达 93.5%的样机,所提方法能够有效消除各个并联逆变器之间的环流,且能够自动分配功率,保证系统高效、稳定的运行。此外,多电平逆变电路也适用于高功率、高频率的 DWPT 系统,文献[12]提出的 MOSFET-IGBT 多电平逆变电路,开关管的电应力低,有效降低了开关损耗和电压谐波,提高了逆变器的输出功率和效率。文献[13]中的基于阶梯波移相合成方法的级联型多电平逆变器的 DWPT 系统,验证了在相同容量的开关器件下,两单元五电平级联逆变器能有效提高无线供电系统的输出功率。

2.2 补偿网络

在 DWPT 系统中,无功补偿网络的拓扑结构主要由 SS 型和 LCL-S 型 2 种基本拓扑及其衍生拓扑

构成^[14-17],考虑实际工况下的电路运行参数易受器件制造工艺、耦合线圈有无磁芯、工作环境等因素影响而比较复杂,因此文中仅当系统满足在工作频率下达到完全谐振状态的理想条件时,归纳其输出特性如表 2 所示。

表 2 DWPT 系统常见补偿网络的输出特性对比
Table 2 Comparison of output characteristics of DWPT system's compensation networks

补偿网络拓扑	输出电压	输出电流	输出特性
SS	$\pi UR_L / (2\sqrt{2}\omega M)$	$2\sqrt{2}U / (\pi\omega M)$	恒流源
SP	$\pi UL_s / (2\sqrt{2}M)$	$2\sqrt{2}UL_s / (\pi MR_L)$	恒压源
S-LCL	$\pi U / (2\sqrt{2}\omega^2 MC_s)$	$2\sqrt{2}UL_s / (\pi MR_L)$	恒压源
LCL-S	$\pi MU / (2\sqrt{2}L_p)$	$2\sqrt{2}MU / (\pi L_p R_L)$	恒压源
LCL-LCL	$\pi MUR_L / (2\sqrt{2}L_p L_s \omega)$	$2\sqrt{2}MU / (\pi L_p L_s \omega)$	恒流源

注: U 为高频电压源; M 为发射线圈与接收线圈之间耦合互感; ω 为高频逆变器输出电压频率; L_p 为发射线圈的自感; L_s 为接收线圈的自感; C_s 为接收侧的补偿电容; R_L 为负载。

在 DWPT 系统中,无功补偿网络的设计目标主要是克服由移动负载特性带来的系统参数动态变化,即考虑负载移动过程中供电系统的参数变化规律,并结合具体应用场景的要求,设计能有效提高 DWPT 系统鲁棒性的无功补偿网络。文献[14]基于 SS 型 DWPT 拓扑,利用交替绕组设计无间隙的多发射线圈,增强了整体的磁通密度,但未能解决负载移动过程中功率波动较大的问题。一般地, LCL-S 型拓扑较 SS 型具有输出电压不受负载影响的优势,更加适合应用于 DWPT 系统。在文献[15]中发射侧采用 LCL 无功补偿拓扑,使每段发射线圈都能共享同一个逆变电路,提高了系统的功率密度。此外,高阶无功补偿网络有利于增加能量传输的平滑度,且更易实现分段式 DWPT 系统的自动配电^[15-17]。在文献[16]中发射侧电路由单个高频逆变器激励多个并联的 LCC 无功补偿网络组成,通过控制每段发射线圈的工作状态便能实现系统根据负载的要求自动配电。文献[17]则改进了传统的 LCL 无功补偿拓扑,从传输效率、能量传输平滑度和耦合因子的角度出发,对全局参数进行了优化。

2.3 电磁耦合机构

由于负载移动使得耦合互感动态变化,因此 DWPT 系统对电磁耦合机构抗偏移能力提出了较高的要求。结合 DWPT 系统的基本结构,考虑施工和电磁干扰条件,电磁耦合机构的研究主要集中在发射侧线圈的设计。目前,在 DWPT 系统的电磁耦合机构研究方面,新西兰奥克兰大学和韩国高等技术研究院(KAIST)的研究成果最具有代表性,本节主要以其典型成果展开综述。

新西兰奥克兰大学是最早研究 DWPT 耦合机构的团队之一,于 2008 年提出了用于长导轨式 DWPT 系统的矩形长线圈,并设计了 2 种不同结构的接收线圈: E-pickup 和 Coaxial pickup^[18],有效改善了线圈位置偏移导致系统无法工作的问题。随后提出了具有里程碑意义的 Double D 线圈,采用 2 个相同的 D 型线圈并行排列,较等比例的圆环线圈拓宽了 5 倍的有效充电区域,接着提出的 DDQ 线圈在 Double D 线圈的基础上加入一个与之正交的小线圈,进一步增强了磁耦合机构的偏移鲁棒性,非常适用于 DWPT 系统^[19]。为进一步改善线圈未对齐对能量传输的影响,他们于 2017 年提出一种三线线圈结构的 Tripolar Pad(TPP)线圈,利用 TPP 线圈之间的相互去耦得到最佳原边电流,改善副边线圈未对准传统拓扑结构的有效耦合系数,并符合国际非电离辐射防护委员会指导的漏磁通量标准^[20]。

韩国 KAIST 在长导轨式 DWPT 系统的耦合机构上进行了深入的研究,处于世界领先水平。他们在 2009 年推出了其第一代 E 型磁芯供电导轨,同年又提出一种 U 型磁芯的供电导轨,较第一代磁芯传输距离提高至 17 cm^[21]。随后,他们提出采用 W 型磁芯的供电导轨和交错的双接收线圈作为电磁耦合机构,并以此方案建成 3 条电动车 DWPT 线路,效率达到 83%。接着又推出了一种具有双极性磁路的 I 型磁芯供电导轨,能够在 24 cm 的横向偏移距离下实现能量的稳定传输^[22]。随后推出的超薄 S 型磁芯供电导轨,导轨宽度仅仅 4 cm^[23]。2015 年提出一种使用两相高频交流电流 d 相和 q 相供电的 dq 型供电导轨。 d 相和 q 相磁极交替排列成一行,实现了感应电压在空间上的均匀拾取^[24]。奥克兰大学和韩国 KAIST 不同阶段研制的耦合机构总结分别如图 6 和图 7 所示,其对比如表 3 所示。

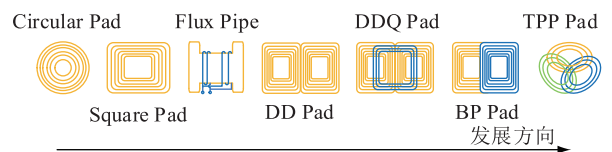


图 6 奥克兰大学不同阶段研制的耦合机构

Fig.6 Coupling mechanism developed at different stages of the University of Auckland

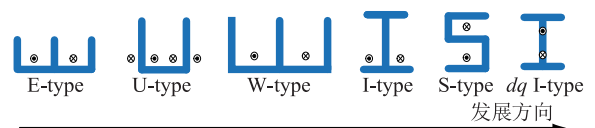


图 7 KAIST 不同阶段研制的耦合机构

Fig.7 Coupling mechanism developed at different stages of KAIST

表3 DWPT系统的磁耦合机构对比
Table 3 Comparison of magnetic coupling mechanism of DWPT system

DWPT系统结构	线圈/磁芯结构	有无极性	优点	缺点
长导轨式	E型、U型、W型	无	磁场分布均匀, 能量传输稳定	侧移敏感, 效率低
	I型、S型、dqI型	有	侧移敏感低, 电磁泄漏少	磁场分布不均, 存在耦合零点
线圈阵列式	CP、SP	无	功率传输平稳, 成本较低	施工面积大, 功率密度低
	DD、DDQ、BP、TPP	有	鲁棒性强, 功率密度高	磁场不均匀, 制作成本高

通过以上分析可知, DWPT系统的电磁耦合机构研究还不成熟, 应用案例主要都是依据静态无线供电系统的经验进行设计, 均存在系统工作不稳定、全局参数难以最优化设计等缺陷。另外, 针对电动汽车、轨道交通等大功率的应用场合, 汽车或轨道车辆在移动时自身的机械振动导致传输距离的变化以及相对预定轨道的偏移会引起互感随机动态变化^[25], 且在兆瓦级的功率传输场合, 传输线圈中的高频交流磁场对系统周边的铁磁材料产生的涡流发热和电磁泄露问题不可忽视。因此, 具有强鲁棒性、磁场均匀、电磁兼容表现优异等特点的磁耦合机构还亟待研究。

2.4 供电线圈切换方法

分段线圈式 DWPT 系统较长导轨式具有更高的传输效率和更低的维护成本, 更具有发展前景。然而, 在分段线圈式 DWPT 系统中, 原副边线圈的相对位置实时变化, 任何一对原副边线圈相互耦合的时间都很短, 存在大量的供电切换点, 这将使得负载在移动过程中接收到的功率剧烈波动, 严重影响整个系统的工作性能。因此, 设计高品质的供电线圈切换控制策略, 使 DWPT 系统主动匹配移动中的负载, 以保证能量的持续平稳传输至关重要。供电线圈切换方法按照控制参数的不同可分为主动切换和被动切换 2 种。主动切换是检测系统的互感、电流等电参数变化来控制供电线圈, 被动切换需要添加额外的位置传感器、通信设备等外置电路来获取负载的移动位置, 从而控制供电线圈的切换。

在主动切换方面, 通常可复用发射线圈和接收线圈, 通过检测到的接收线圈来控制相应的发射线圈的供电状态, 进而实现负载定位和线圈切换供电^[26]。在文献[27]中复用了原副边线圈和电流互感器, 但该方法存在需要设置投切开关, 系统稳定性差等不足, 而利用线圈的电参数则可简化检测系统, 通过测量原副边线圈间的互感变化规律, 得出

发射线圈中电流滞后电压的相位角的变化情况, 继而通过检测此相角变化可确定供电线圈的切换时刻^[28]。文献[29]通过检测发射线圈的电压、电流值, 并与设置阈值进行比较来判断该段发射线圈上方是否存在负载, 从而控制该发射线圈工作在能量发射模式或信号探测模式, 其原理结构如图 8 所示。此外, 文献[30]提出了一种面向长距离电动车 DWPT 的分布式导轨集群系统模式, 采用集散式组态驱动控制策略实现供电导轨的平滑切换, 保证系统工作的稳定性, 该方案为探索 DWPT 系统线圈切换方法提供了新的思路。

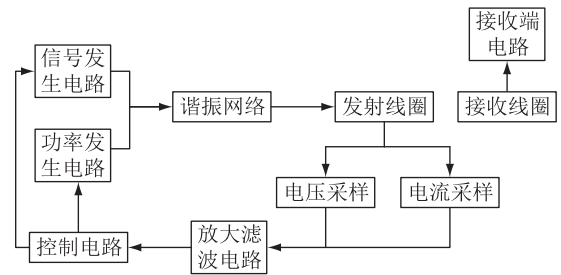


图8 双模供电线圈切换方法

Fig.8 Dual mode power supply coil switching method

在被动切换方面, 文献[31]通过检测线圈与接收线圈的电压差值来判断负载的移动方向和位置, 但检测线圈与接收线圈之间的相互耦合会影响检测的精度。利用传感器来检测负载位置是被动切换方法最常用的方案, 可在相邻两段能量发射导轨的交接处安装位置传感器, 通过顺序控制实现各段发射导轨工作状态的有序切换^[32]。文献[33]利用位置传感器与外设通信设备相互配合, 构成如图 9 所示的双闭环控制电路, 其中, a, b 为信号调整模块; k_{p1} , k_{p2} 为位置补偿系数; U_{ref} 为预设的参考电压值。该电路实现了负载移动过程中供电线圈输出功率的快速调节, 但当负载移动速度过快时, 通信造成的延时将无法满系统的工作要求。此外, 文献[34]提出在副边线圈上安装永磁体, 在每个发射线圈中心安装高灵敏度三轴磁传感器, 通过检测发射线圈上方磁场的变化值来确定负载位置, 从而实现线圈切换供电。

综上所述, DWPT 系统按负载的移动特性可以分为移动充电和切换充电 2 部分, 如何保证系统工作在这 2 种状态时都能稳定供电是评价 DWPT 系统性能的核心指标。针对负载切换充电的功率波动问题, 探索更加精确易行的负载位置检测技术, 实现供电线圈无缝切换功能, 提高负载在高速移动状态下的稳定充电从而推动分段导轨式 DWPT 技术的产业化将是未来重要的研究方向。此外, 目前

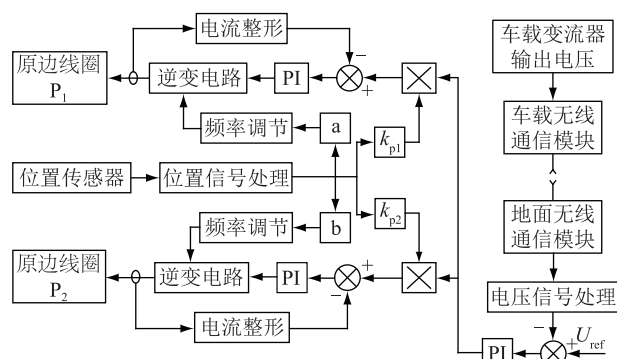


图9 双闭环控制电路

Fig.9 Double closed loop control circuit

对 DWPT 系统中传输能量的控制策略研究较少,由于负载移动速度的大小必定会给通信的实时性带来不利影响,而副边控制方法不需要原副边线圈建立通信,只需按照优化设计的参数设置好原边电路,接着在负载侧建立控制电路就能实现精确的功率控制。因此,将精确的功率控制方法与可靠的供电线圈切换策略相互配合,保证 DWPT 系统具有强鲁棒性的功率传输特性,是未来 DWPT 技术发展必须攻克的关键技术。

2.5 电磁兼容

DWPT 系统依靠电磁场的耦合完成电能传输,且能量发射线圈铺设距离远,电磁辐射范围广,周围电磁环境十分复杂,而电磁兼容问题与能量传输质量、系统效率、对人体和环境造成的影响等方面都息息相关。根据国际非电离辐射防护委员会(IC-NIRP)制定的标准,在 20~200 kHz 的频段内,人体可承受的磁场强度必须小于 100 μT ,超出该限值将会对人体造成神经系统危害等不利影响^[35]。

DWPT 系统的电磁兼容研究主要集中在电磁屏蔽方面,现有的电磁屏蔽方法可分为主动屏蔽和被动屏蔽 2 种。主动屏蔽利用主动屏蔽线圈产生一个与源磁场幅度相近、相位相差 180° 的磁场,进而抵消源磁场的作用,该方法具有成本低、性价比高的优点^[36]。文献[37]通过调节副边屏蔽线圈的阻抗,产生一个相位与发射磁场完全相反,幅度相近的抵消磁场,有效地减少了电磁泄露水平。被动屏蔽可由铁磁材料或金属导体实现,铁磁材料主要是利用其高磁导率,引导并改变源磁通的方向,从而约束周围空间磁场分布,利用铁磁材料设计电磁兼容还可以提高磁耦合机构的互感系数^[38-39],但利用铝板进行屏蔽时,实验结果表明负载侧方存在一定的电磁泄露,且涡流损耗会降低系统效率^[40]。而金属导体是利用涡流效应产生一个与源磁场相反的高频磁场,适用于高频环境,但是涡流损耗将不可

避免的降低系统整体效率^[41]。

总体而言,DWPT 系统的电磁兼容问题研究还处于探索阶段,特别是应用于轨道交通等大功率场合时,高频磁场对周围生命体和设备的影响以及在金属物上所产生的的涡流效应不可忽视,下一步工作还应综合考虑系统参数动态变化、多供电线圈相互影响以及应用场合的具体要求等因素,高效、可靠地解决 DWPT 系统的电磁兼容问题。

3 DWPT 系统的工程进展及前景展望

DWPT 系统实现工程化的关键之处在于如何克服负载运动过程中的变参数特性,最大限度地提升供电系统的性能,保证系统的高效稳定运行。经过国内外学者近年来的积极探索,已取得了一些成果。

美国加州大学伯克利分校最早于上世纪七十年代首次进行了巴士的 DWPT 测试,采用单个长导轨式结构,功率达到 60 kW,但整体效率仅为 60%^[42]。新西兰奥克兰大学于 1993 年成功研制出用于工业流水线搬运的单轨行车 DWPT 系统,随后于 1997 年推出自动导引车(automated guided vehicle, AGV)的无线供电系统,设定的导轨有效偏移距离仅为 $\pm 10 \text{ mm}$ ^[43]。此后,德国 Wampfler 公司在此基础上试验了时速 37.8 km/h 的载人列车模型,功率达到 150 kW^[44]。韩国 KAIST 近年来采用长导轨式 DWPT 技术,开发出系列 OLEV(on-line EV)产品,目前 KAIST 已研发出四代 OLEV 系统,并形成了规模化的商业运行模式,KAIST 的研究成果极大地推进了 DWPT 技术实用化的进程^[22,45-46]。加拿大 Bombardier 公司于 2012 年在德国推出基于分段线圈式 DWPT 的轻轨示范线,电能传输功率最高达到 500 kW,设计最高时速为 80 km/h^[47-48]。犹他大学同年成立的 WAVE 公司推出商业化的 DWPT 巴士,传输功率为 20~25 kW^[49-50]。美国橡树岭国家实验室(ORNL)于 2013 年采用分段线圈的 DWPT 技术改造一款高尔夫球车,验证 DWPT 系统的能量发射装置与负载之间的位置偏移会对传输功率和效率产生较大的影响^[51-52]。美国高通公司于 2018 年推出的 Halo 无线供电技术,宣称目前已经具备了半动态充电的能力,可在最高 30 mile/h 的速度下进行电能传输^[53]。

国内学者对 DWPT 技术的研究起步较晚,但是通过各研究团队的积极探索,近年来取得了一定的成果。重庆大学对 DWPT 的结构、系统方案和功率传输控制方法等方面进行了深入研究,提出了非线性规划模型,于 2013 年开发出了一套电动汽车动态

无线充电的示范项目,能够实现电动汽车的实时动态供电^[30,32],并在2018年与东南大学合作建成一条DWPT公路^[54]。哈尔滨工业大学于2015年提出了一种基于多发射线圈并联连接的DWPT方法,通过三轴磁传感器获取电动汽车行驶方向的磁场强度,实现了电能接收端的实时精确定位^[34]。西南交通大学同年研制出一套40 kW级的DWPT样机,随后又在此基础上将传输功率进一步提高至100 kW^[55-56]。广西电网与高校合作提出一种多导轨供电模式的DWPT方法,并在2015年建成一条电动汽车DWPT车道^[57]。此外,南京航空航天大学、东南大学、华中科技大学等团队也对DWPT技术的无功补偿、磁耦合机构、系统建模等方面进行了深入的研究^[58-60]。国内外DWPT系统的工程应用现状如表4所示。

表4 DWPT系统的工程应用进展
Table 4 Progress in engineering application of DWPT system

研究机构	应用现状	年份	
加州大学伯克利分校	60 kW 长导轨式 DWPT 测试	1970	
奥克兰大学	AGV 无线供电系统	1997	
Wampfler 公司	150 kW DWPT 载人列车	2015	
国外	KAIST	已研发出四代 OLEV 系统,并规模化商用	2013
	Bombardier	500 kW 轻轨示范线	2012
	犹他大学	20~25 kW 无线供电巴士	2012
	ORNL	分段线圈式 DWPT 的高尔夫球车	2013
	美国高通公司	Halo 无线供电技术	2018
国内	重庆大学	电动汽车动态无线充电的示范项目	2013
	东南大学	苏州同里 DWPT 公路	2018
	哈尔滨工业大学	提出多发射线圈并联连接的 DWPT 方法	2015
	西南交通大学	100 kW 级 DWPT 样机	2015
	广西电网	建成一条电动汽车 DWPT 车道	2015

由表4可见,目前国内的工程进展情况与国外相比还存在较大差距,国外已经开始向产业化方向发展,而国内的研究内容仍集中在系统理论分析、系统供电策略和原理样机验证阶段。

在此基础上,随着现代科技的进步和发展,DWPT技术的应用也将迎来新的机遇和挑战,未来主要的应用领域见10,具体体现为以下方面:

(1) 仓储、物流、制造等行业正向全自动化、智能化方向发展,大量物流机器人、AGV等的充电方式需DWPT技术来实现其自动、高效的工作特点;

(2) 变电站智能巡检模式可实现24 h不间断

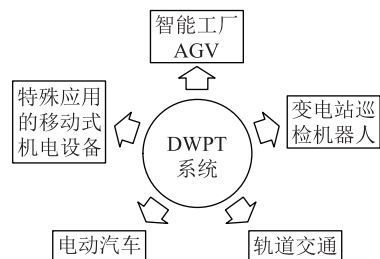


图10 DWPT系统的应用领域

Fig.10 Application areas of DWPT system

自动巡检的功能,达到无人值守的目的,将彻底改变变电站现有的人工或半自动化的巡检模式,这就需要DWPT技术对巡检机器人进行不间断供电,从而解决其出现电量不足时必须返回充电站进行充电的问题;

(3) 井下有轨矿车、水下作业设备和服务型机器人等特殊应用场景的移动式机电设备,往往存在电缆因磨损裸露、施工困难、工作区域受限等问题,DWPT技术的应用,将避免充电头摩擦、腐蚀带来的危害,且受天气和外部环境等条件的影响较小,可大大提高供电系统的安全性和可靠性;

(4) 目前DWPT技术在电动汽车和轨道交通领域的应用已有商业化尝试,但在人工智能和物联网技术逐渐兴起的背景下,电动汽车和轨道交通的DWPT将出现新的发展机遇,如实现电动汽车与电网友好互动,控制电动汽车智能合理的充放电,不仅能够有效抑制电动汽车充电对城市电网的冲击,还能实现“削峰填谷”功能,提高可再生能源的消纳能力,通过宏观调控建立起绿色、友好、可持续发展的能源利用新模式。

4 结语

文中对比研究了几种主要的DWPT系统结构及其优缺点,总结了DWPT技术的国内外工程应用进展情况,并在此基础上,对DWPT系统的关键技术进行了详细探讨,得出了以下结论:

(1) DWPT技术具有灵活便捷、负载续航里程长、节省储能设备用量等优点,弥补了静态无线供电技术的不足,在AGV、变电站智能巡检机器人、移动式机电设备、轨道交通和电动汽车等领域具有广阔的应用前景;

(2) DWPT技术的研究正处于攻坚克难的阶段,要想加速推进DWPT技术的发展,尽早实现产业化和商业布局,还需要国内外学者和专家们的不懈努力和积极探索,特别是DWPT技术与储能技术、物联网技术之间的融合发展,新的DWPT模式

以及相关产业标准亟待研究制定;

(3) 在现有无线供电原理的基础上还可以积极探索新型无线电能传输机理,从能量传输机理层面解决负载位置偏移带来的输出功率波动大、传输效率低等问题,使无线供电技术的发展得到新的突破。

参考文献:

- [1] HUI S Y R, ZHONG W, LEE C K. A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(9):4500-4511.
- [2] 张波,疏许健,黄润鸿. 感应和谐振无线电能传输技术的发展[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(18):3-17.
ZHANG Bo, SHU Xujian, HUANG Runhong. Development of inductive and resonant wireless power transmission technology [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(18):3-17.
- [3] 野泽哲生,蓬田宏树,林咏. 伟大的电能无线传输技术[J]. *电子设计应用*, 2007(6):42-54.
NOZAWA Zhesheng, PENG Tian Hongshu, LIN Yong. Great wireless power transmission technology [J]. *Electronic Design Application*, 2007(6):42-54.
- [4] LIU C, HU A P, WANG B, et al. A capacitively coupled contactless matrix charging platform with soft switched transformer control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(1):249-260.
- [5] ANYAPO C, TEERAKAWANICH N, MITSANTISUK C, et al. Experimental verification of coupling effect and power transfer capability of dynamic wireless power transfer[C]//2018 International Power Electronics Conference, Niigata, 2018.
- [6] 韩冲,张波. 谐振式无线电能传输系统中高频逆变器的特性分析和参数设计[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(21):5036-5050.
HAN Chong, ZHANG Bo. Characteristic analysis and parameter design of high frequency inverter in resonant wireless power transmission system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(21):5036-5050.
- [7] COVIC G, BOYS J T, KISSIN M L G, et al. A three phase inductive power transfer system for roadway powered vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(6):3370-3378.
- [8] KISSIN M L G, BOYS J T, COVIC G. Interphase mutual inductance in polyphase inductive power transfer systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(7):2393-2400.
- [9] XIA C Y, ZHANG J, JIA N, et al. Asymmetric magnetic unit of three-phase WPT system for achieving effective power transmission [J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(11):717-719.
- [10] HAO H, COVIC G, BOYS J T. A parallel topology for inductive power transfer power supplies[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(3):1140-1151.
- [11] 李勇. 基于组合式逆变器的无线电能传输系统功率提升技术研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017.
- [12] RAHNAMAEE H R, MADAWALA U K, THRIMAWITHANA D J. A multi-level converter for high power-high frequency IPT systems [C]//2014 IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, Galway, 2014.
- [13] LI Y, MAI R, LU L, et al. Active and reactive currents decomposition-based control of angle and magnitude of current for a parallel multi-inverter IPT system[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 32(2):1602-1614.
- [14] ZHANG Z, CHAU K T. Homogeneous wireless power transfer for move-and-charge [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(11):6213-6220.
- [15] EAN K K, KAI S, SUKPRASERT P, et al. Two-transmitter wireless power transfer with LCL circuit for continuous power in dynamic charging[C]//2015 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power, Daejeon, 2015.
- [16] ZHOU S, MI C C. Multi-paralleled LCC reactive power compensation networks and their tuning method for electric vehicle dynamic wireless charging[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(10):6546-6556.
- [17] FENG H, CAI T, DUAN S, et al. An LCC-compensated resonant converter optimized for robust reaction to large coupling variation in dynamic wireless power transfer[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(10):6591-6601.
- [18] RAABE S, BOYS J T, COVIC G A. A high power coaxial inductive power transfer pickup [C]//2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, 2008.
- [19] BUDHIA M, BOYS J T, COVIC G A, et al. Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(1):318-328.
- [20] KIM S, COVIC G A, BOYS J T. Tripolar pad for inductive power transfer systems for EV charging[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(7):5045-5057.
- [21] CHOI S Y, GU B W, LEE S W, et al. Generalized active EMF cancel methods for wireless electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(11):5770-5783.
- [22] CHOIS Y, GU B W, JEONG S Y, et al. Advances in wireless power transfer systems for roadway-powered electric vehicles [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2015, 3(1):18-36.
- [23] CHOI S Y, JEONG S Y, GU B W, et al. Ultra slim S-type power supply rails for roadway-powered electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(11):6456-6468.
- [24] PARK C, LEE S, JEONG S Y, et al. Uniform power I-type inductive power transfer system with DQ-power supply rails for on-line electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(11):6446-6455.

- [25] HU C, SUN Y, WANG Z H, et al. Design of magnetic coupler for EVs' wireless charging[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2013, 43(3): 195-205.
- [26] 东南大学. 基于多线圈仿中继结构定位的分段发射线圈切换控制方法: 201710574609.3[P]. 2017-07-14.
Southeast University. Segmented transmit coil switching control method based on multi-coil pseudo-relay structure positioning: 201710574609.3[P]. 2017-07-14.
- [27] 赵锦波. 分段式动态无线充电的抗偏移及中继接力方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
ZHAO Jinbo. Research on anti-offset and relay method of segmented dynamic wireless charging[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [28] DENG Q, LIU J, CZARKOWSKI D, et al. Edge position detection of on-line charged vehicles with segmental wireless power supply[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(5): 3610-3621.
- [29] 广西电网有限责任公司电力科学研究院. 一种双模式电动汽车动态无线充电系统及其控制方法: 201810950492.9[P]. 2018-08-20.
Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd. A dual-mode electric vehicle dynamic wireless charging system and its control method: 201810950492.9[P]. 2018-08-20.
- [30] 田勇. 基于分段导轨模式的电动车无线供电技术关键问题研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
TIAN Yong. Research on key issues of wireless power supply technology for electric vehicles based on sectional guide mode [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [31] NAGENDRA G R, CHEN L, COVIC G A, et al. Detection of EVs on IPT highways[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(3): 584-597.
- [32] 孙跃, 田勇, 苏玉刚, 等. 电动车在线供电系统高效配电方案[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(2): 236-242.
SUN Yue, TIAN Yong, SU Yugang, et al. Efficient power distribution scheme for electric vehicle online power supply system [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(2): 236-242.
- [33] 范满义, 史黎明, 殷正刚, 等. 移动式感应电能传输系统分段供电控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2112-2120, 2226.
FAN Manyi, SHI Liming, YIN Zhenggang, et al. Research on segmentation power supply control strategy for mobile inductive power transmission system [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2112-2120, 2226.
- [34] 宋凯, 朱春波, 李阳, 等. 用于电动汽车动态供电的多初级绕组并联无线供电技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4445-4453.
SONG Kai, ZHU Chunbo, LI Yang, et al. Parallel wireless power supply technology for multiple primary windings for dynamic power supply of electric vehicles [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4445-4453.
- [35] ICNIRP. Guidelines, for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz—100 kHz) [J]. Health Phys, 2010, 99(6): 818-836.
- [36] KIM J, KIM J, KONG S, et al. Coil design and shielding methods for a magnetic resonant wireless power transfer system [J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(6): 1332-1342.
- [37] MOON H, KIM S, PARK H H, et al. Design of a resonant reactive shield with double coils and a phase shifter for wireless charging of electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(3): 1-4.
- [38] AHN S, PAK J, SONG T, et al. Low frequency electromagnetic field reduction techniques for the on-line electric vehicle (OLEV) [C]//2010 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Fort Lauderdale, 2010.
- [39] 朱庆伟, 陈德清, 王丽芳, 等. 电动汽车无线充电系统磁场仿真与屏蔽技术研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(S1): 143-147.
ZHU Qingwei, CHEN Deqing, WANG Lifang, et al. Magnetic field simulation and shielding technology of wireless charging system for electric vehicles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 143-147.
- [40] DOLARA A, LEVA S, LONGO M, et al. Coil design and magnetic shielding of a resonant wireless power transfer system for electric vehicle battery charging [C]//2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, San Diego, 2017.
- [41] PARK H H, KWON J H, KWAK S I, et al. Magnetic shielding analysis of a ferrite plate with a periodic metal strip [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(8): 1-8.
- [42] Systems Control Technology Inc. Roadway powered electric vehicle project; track construction and testing program phase 3D: UCB-ITS-PRR-94-07 [R]. Berkeley: California PATH Program Inst. Transportation Studies Univ. California Berkeley, 1994.
- [43] RAABE S. Inductive power transfer pickups for high demand applications [D]. Auckland: Auckland University, 2011.
- [44] IPT technology gmbh-marketing communication. IPT technology a company which can draw upon vast experience [EB/OL]. (2015-10-08) [2019-09-15]. <http://www.ipt-technology.com/index.php.en.about-us>.
- [45] KIM J, LEE B S, LEE J H, et al. Development of 1 MW inductive power transfer system for a high speed train [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6242-6250.
- [46] AAAS. KAIST develops wireless power transfer technology for high capacity transit [EB/OL]. (2013-02-12) [2019-09-15]. http://www.eurekalert.org/pub_releases/2013-02/tkai-kdw021213.php.
- [47] BRECHER A, ARTHUR D. Review and evaluation of wireless power transfer (WPT) for electric transit applications [J]. Human Factors the Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 2014, 49(5): 832-841.
- [48] WINTER J, MAYER S, KAIMER S, et al. Inductive power sup-

- ply for heavy rail vehicles [C]//2013 3rd International Electric Drives Production Conference, 2013.
- [49] WU H H, GILCHRIST A, SEALY K D, et al. A high efficiency 5 kW inductive charger for EVs using dual side control [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8 (3): 585-595.
- [50] CHARLES M. Utah State University builds a dynamic wireless charging test track [EB/OL]. (2015-01-07) [2019-09-15]. <https://chargedevs.com/features/utah-state-university-builds-a-dynamic-wireless-charging-test-track/>.
- [51] ONAR C, MILLER J, CAMPBELL S L, et al. A novel wireless power transfer for in-motion EV/PHEV charging [C]//2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Long Beach, 2013.
- [52] MILLER J, ONAR C, CHINTHAVALI M. Primary-side power flow control of wireless power transfer for electric vehicle charging [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1): 147-162.
- [53] Qualcomm Halo. One powerful parking spot [EB/OL]. (2018-12-21) [2019-09-15]. <https://www.qualcomm.com/products/halo>.
- [54] 重庆大学无线供电研究所. 世界首条“三合一”电子公路现身同里无线输电 [EB/OL]. (2018-10-19) [2019-09-15]. <http://www.wptchina.com.cn/ReadNews.asp?rid=1796>.
Chongqing University Wireless Power Research Institute. The world's first "three-in-one" electronic highway appeared in Tongli wireless transmission [EB/OL]. (2018-10-19) [2019-09-15]. <http://www.wptchina.com.cn/ReadNews.asp?rid=1796>.
- [55] LI Y, MAI R K, LU L W, et al. Harmonic elimination and power regulation based five-level inverter for supplying IPT systems [C]//2015 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power, Daejeon, 2015.
- [56] CCTV《超级实验室》. 西南交大: 自主创新, 打造“中国速度” [EB/OL]. (2015-10-07) [2019-09-15]. http://www.360doc.com/content/15/1007/20/10941841_503890313.shtml.
CCTV Super Lab. Southwest Jiaotong University; independent innovation, creating "China speed" [EB/OL]. (2015-10-07) [2019-09-15]. http://www.360doc.com/content/15/1007/20/10941841_503890313.shtml.
- [57] 祝文姬, 孙跃, 高立克. 电动汽车多导轨无线供电方法 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 97-101.
ZHU Wenji, SUN Yue, GAO Like. Multi-rail wireless power supply method for electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 97-101.
- [58] ZHANG W, WONG S, TSE C K, et al. An optimized track length in roadway inductive power transfer systems [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(3): 598-608.
- [59] CHEN Z, JING W, HUANG X, et al. A promoted design for primary coil in roadway-powered system [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 1-4.
- [60] ZHAO J, CAI T, DUAN S, et al. A general design method of primary compensation network for dynamic WPT system maintaining stable transmission power [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(12): 8343-8358.

作者简介:



张政

张政(1995),男,硕士在读,研究方向为电力电子与电力传动(E-mail: epzhengzhang@mail.scut.edu.cn);

张波(1962),男,博士,教授,研究方向为电力电子与电力传动。

Development and key technologies of dynamic wireless power transfer system for mobile load

ZHANG Zheng, ZHANG Bo

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: With the urgent demand for dynamic wireless charging capabilities with mobile loads, dynamic wireless power transfer (DWPT) has gradually entered people's field of vision and become a new research hotspot. The article firstly compares the main structure of the existing dynamic wireless power transfer system and its advantages and disadvantages. Secondly, the key technologies of DWPT are discussed from the aspects of high frequency inverter circuit, compensation network, electromagnetic coupling mechanism, coil array switching method and electromagnetic compatibility. Finally, combining the research results of scholars at domestic and abroad in recent years, it summarizes the progress of the engineering application of dynamic wireless power transfer, and the future development trend of dynamic wireless power transfer is predicted, which shows that dynamic wireless power transfer has broad application prospects in the fields of AGV, substation intelligent inspection robot, mobile electromechanical equipment, rail transit and electric vehicle.

Keywords: mobile load; dynamic wireless power transfer; development status; key technology; application prospects

(编辑 陈静)