

电动汽车用电驱重构型充电系统及其关键技术综述

於 锋¹, 张 蔚¹, 刘春华², 朱志豪¹

(1. 南通大学 电气工程学院, 江苏 南通 226019; 2. 香港城市大学 能源与环境学院, 香港 999077)

摘要:电动汽车用电驱重构型充电(EDRC)系统是一类将电机绕组重构成滤波电感或储能电感,电驱逆变器重构成整流或直流变换装置并共用电驱控制器及传感器单元的新型充电系统拓扑结构。电动汽车用EDRC系统具有模块集成度和能源存储空间高、充电模式和控制方式多样、控制灵活、冗余性和可靠性高等优异特性,在大功率、快速充电场合具有广阔的应用前景。对电动汽车用三相交流接口结构型式EDRC系统在国内外的研究和发展现状进行了分析和总结,介绍了EDRC系统的多种拓扑结构及其特点,对系统的控制技术进行了全面综述,并分析了EDRC系统绕组通电对电机电磁性能的影响,最后对EDRC系统的未来研究与发展进行了展望。

关键词:电动汽车;电驱重构型充电系统;电机绕组;三相交流接口;拓扑;电磁性能

中图分类号:U 469.72

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.12.003

0 引言

近年来,汽车保有量一直处于不断增长的趋势,不可再生能源的消耗也随之加剧,而且传统汽车排放的尾气造成了大气污染,其引发的雾霾问题也对人类健康构成了直接威胁。相比传统的内燃机汽车,电动汽车具有节能、环保、高效等优势。纯电动汽车是“零污染”的车辆,不消耗石油,不排放废气,电动机驱动噪声小,易于控制,可以获得良好的稳态特性和四象限(再生制动)运行的能力,代表了未来世界汽车发展的方向^[1]。作为电动汽车的关键技术,动力电池组的充电时间与续航里程是制约其推广的主要因素,而这些技术指标与动力电池组的充电技术息息相关。因此,电动汽车的充电技术受到了国内外学术界和工业界的重视。根据充电机所在位置的不同,电动汽车充电机可以分为非车载充电机和车载充电机^[2]。

经过多年发展,传统的车载充电技术已逐渐成熟,但其性能也愈加无法满足日益提高的大功率、快速充电等飞速发展的需求,新型充电机系统拓扑结构和控制策略相继出现。作为近年来开始广泛研究的新型充电系统,电驱重构型充电EDRC(Electric-Drive-Reconstructed Charger)系统通过共用、重构电驱系统的电力电子变换装置、电机绕组、控制及传感器单元,并通过优化拓扑及控制策略完成整流、逆变、功率因数校正,从而实现电机驱动、高功率因数充电、谐波治理等功能总集成,其结构示意图如附录

中图 A1 所示。

EDRC系统早期主要针对车载充电机电力电子器件存在功率定额的限制,通过共用电驱大定额逆变器及电机绕组获得更大的系统功率和更低成本的充电效果,以满足大功率快充应用场合的需求。根据电源输入相数,EDRC系统通常可以分为单相和三相充电模式,其控制方法也与传统单/三相车载充电机的控制方法类似。近年来由于EDRC系统在商业纯电动汽车车型Renault ZOE上的成功应用,研究热潮进一步兴起。除三相驱动电机场合之外,还可以利用多相电机实现交流充电接口控制的灵活性,开展其在车载三相快充等场合中的有效应用。随着研究的深入,EDRC系统结构中所呈现的变换器重构类型及驱动电机选取的多样性、多变换器可单相或三相充电的灵活性、可设计成多相运行的可靠性、拓扑结构的高冗余性和容错性等优势特征以及其潜力被不断挖掘,EDRC系统在车载充电的应用研究正受到国内外学术界和工业界越来越多的关注^[3-7]。但目前对EDRC系统拓扑的研究还处于起步阶段,在其拓扑优化、电磁分析、控制技术等方面还有许多基本问题和关键共性问题值得研究和探索,具体叙述如下。

首先,如何总结EDRC系统的设计规律和分析方法从而设计适用性强的拓扑是值得关注的问题之一。一方面,目前的EDRC系统拓扑大多是针对某一特定场合的需求进行设计的,而基于一种应用场合的设计思路很难应用于另一场合,设计的通用性不强;另一方面,由于没有统一理论做指导,要保证重构后的电路仍能实现所需性能,设计人员必须深入理解电力电子电路,且具备丰富的设计经验,加上重构后电路的工作机理较为复杂,这使得对变换器的分析变得困难。因此,对于EDRC系统拓扑的设计,需充分利用驱动系统中已有的硬件结构(如电机

收稿日期:2017-12-21;修回日期:2018-10-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807098,51507087);南通市科技应用研究计划项目(GY12016041)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51807098,51507087) and the Science and Technology Application Research Project of Nantong City(GY12016041)

绕组作为滤波电感或储能电感)重构为充电装置,保证在充电模式下电机的静止运行,避免电机磁化问题,实现定子和转子完全解耦,在完成基本充电功能的前提下,构建具有功率因数校正功能及谐波消除多目标优化的 EDRC 系统拓扑结构。

其次,电机绕组重构为 EDRC 系统时交流侧的滤波电感不仅起到滤除网侧谐波电流、实现网侧正弦电流的控制作用,还可以使变换器具有升压特性。但鲜有文献对充电过程中绕组通电对电机特别是永磁电机电磁特性的影响进行分析,包括损耗、电感和电磁转矩等。

综上所述,当进行 EDRC 系统的设计与分析时,在系统拓扑的通用性设计、绕组接入后电机电磁分析等方面不能照搬传统电力电子相关的技术,必须加以创新。本文介绍了 EDRC 系统的拓扑结构及其关键技术,包括辅助式 EDRC 技术、机械式 EDRC 技术、插入式 EDRC 技术及多相 EDRC 技术;对于 EDRC 系统接入三相电网后绕组通电对永磁电机损耗、电感、电磁转矩的影响这 3 个方面,归纳和总结了国内外 EDRC 的研究现状和关键技术;针对不同控制目标对 EDRC 的几种主要控制技术进行了相关阐述;对 EDRC 系统的未来研究与发展进行了展望。

1 EDRC 系统的典型拓扑结构

目前已有文献[3-7]对 EDRC 系统进行相关综述,但分类含糊,且均未对 EDRC 系统的三相大功率充电技术进行集中讨论,同时未能指出 EDRC 系统问题存在的本质。

EDRC 系统具有多种拓扑结构形式,主要源于所采用的电机、变换器及电源类型的多样性。EDRC 系统可采用感应、永磁及开关磁阻等不同电机类型,可选用三相或多相电机型式,可运行于单相或三相充电系统。而根据 EDRC 系统电机绕组重构后作用型式、所串接变换器的类型和控制方式的不同,也可以对其拓扑结构进行灵活的分类。本文主要综述三相交流接口结构型式的 EDRC 技术,包括辅助式 EDRC、机械式 EDRC、插入式 EDRC 以及多相 EDRC 系统。

1.1 辅助式 EDRC 拓扑结构

辅助式 EDRC 拓扑除共用电驱系统电机绕组、逆变器及控制单元等,还需额外增设整流、直流变换装置、开关器件、变压器等,称此方式为辅助式 EDRC 系统。文献[8]提出了一种基于 6 kW 轴向磁通永磁电机的辅助式 EDRC 拓扑结构如图 1 所示,该系统通过共用一套三相功率变换器及感应电机三相绕组实现驱动及充电功能总集成,完成了从大型模块堆叠转换为完全模块集成的创新技术,有效降低了系统成本。该辅助式 EDRC 系统在电机绕组中性点接有一个模式选择开关 K,通过切换模式后可使系统在驱动模式下电机按三相 Y 型绕组接线方式

运行,在充电模式下电机绕组的自感作为充电时三相交错 DC/DC 变流器的储能电感。上述方法虽然实现了电动汽车充电机的集成,但仍需配置一套额外的 AC/DC 整流器+LC 滤波器。文献[9]在上述具有功率因数校正的辅助式 EDRC 拓扑的基础上进行改进,提出了电动机用基于内置式永磁电机的辅助式 EDRC 系统结构,并通过交错脉宽调制(PWM)方案有效省去了网侧 LC 滤波装置,同时该系统从电机磁链模型本质出发准确建立了电感数学模型,分别由漏感 L_l 、磁化电感 $L_m(\theta)$ 及零序电感 L_0 三部分组成,得到的等效电路如附录中图 A2 所示,并通过共模与差模方案验证了电机各向异性并不影响重构型直流变换器的动态性能。为解决因电机绕组共模电压过小引起的电流断续问题,文献[10]在附录中图 A2 的基础上通过在三相绕组中性点处增设一个串联附加电感 L_{add} ,以实现直流斩波器工作在连续电流模式(CCM),并通过交错 PWM 和同步 PWM 2 种方案的理论分析与实验研究,验证了同步 PWM 方案在功率因数调整、相电流纹波方面具有更佳的充电特性。

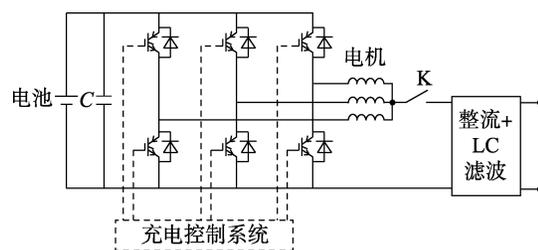


图 1 基于 6 kW 轴向磁通永磁电机的 EDRC 系统拓扑结构

Fig.1 Topological structure of EDRC system based on 6 kW axial flux permanent magnet motor

1.2 机械式 EDRC 拓扑结构

机械式 EDRC 拓扑需置离合器于分离状态或利用机械装置强行固定住转子,使其在充电时保持静止,称此方式为机械式 EDRC 系统。文献[11]提出了一种基于 6 kW 感应电机的工业卡车用机械式 EDRC 系统,其拓扑结构如附录中图 A3 所示。该系统将绕线式感应电机重构为工频变压器,并利用机械方法将转子锁住。充电时,电网三相电流流入被锁住的转子上的三相绕组,气隙内产生旋转磁场,进而会在定子三相绕组上感生出三相电动势,再经过整流桥变换为直流电为蓄电池充电,可实现单位功率因数运行、能量双向流动,其显著优点是通过感应电机的气隙形成网侧与整流桥侧的隔离,充电安全性更好。但该 EDRC 系统也存在明显的不足,由于气隙的存在,需要较大的励磁电流,这会降低充电效率,此外充电时还需要额外的机械装置锁住转子。文献[12]分析了机械式 EDRC 系统充电过程中电磁转矩的构成机理,其大小主要取决于充电功率、电网电压幅值、永磁磁链、极对数及永磁同步电机 2 次

谐波电感,然后建立了充电电磁转矩数学模型,并通过 Maxwell & Simplorer 联合仿真验证,通过合理设计极对数,2 次谐波电感和永磁磁链可有效降低充电电磁转矩。为解决内嵌式永磁同步电机因凸极效应引起绕组等效阻抗激励不平衡的问题,文献[13]提出了一种基于带阻尼条转子结构内嵌式永磁同步电机 IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) 的机械式 EDRC 系统,其结构如附录中图 A4 所示,定子绕组作为 AC/DC 网侧滤波电感,转子通过机械装置固定,并根据电机磁路本征特性提出了一种新型参数辨识方案用于建立 dq 坐标系下的等效电路。

为进一步提高充电可靠性,瑞典学者 S. Haghbin 等设计了一种新型双绕组机械式 EDRC 系统^[14-16],该系统完全共用电动汽车原有电驱用电动机绕组、逆变器及控制单元等,其结构如附录中图 A5 所示。充电时通过接触器将电机定子绕组转变为 2 个采用 Y 型接法的绕组,整个充电过程分为 3 步:预驱动,即蓄电池给电机供电,使逆变器侧绕组等效成一台隔离型永磁交流发电机;电网频率跟踪,即网侧绕组感生出的电压频率与电网频率一致;充电,即闭合接触器,此时电网电压作用于网侧绕组,逆变器侧绕组感生电压经逆变器控制后为蓄电池充电。为防止电机转动引起电动汽车移动,整个充电过程中离合器处于分离状态。该机械式 EDRC 系统通过完全共用电驱系统,有效提高了能源存储空间。缺点是:充电运行时,永磁电机一直处于旋转工况,存在机械磨损,影响电机寿命,同时电机损耗相对较大。

1.3 插入式 EDRC 拓扑结构

插入式 EDRC 拓扑结构型式完全复用电动汽车原有的电驱逆变器、电机绕组以及控制单元等,无需增设额外开关、电力电子器件等,称此类方式为插入式 EDRC 系统。法国学者 A. Bruyere 等在文献[17]中提出了一种基于 4 极/64 槽永磁同步电机的重构化方案,将三相电机绕组设计成开绕组状态,且每个绕组都引出了中间抽头,其结构如附录中图 A6 所示。充电运行时,三相电网连接在中间抽头上,2 个并联的半绕组连接在一个 H 桥变换器上。通过一定的控制策略,电网可以运行在单位功率因数模式下。同时,只要每个半绕组流过平衡电流,电机定子就不会产生旋转的磁场,转子上没有电磁转矩输出。充电过程中,即使不加入人为抱闸,电动汽车也不会移动。本文以 8 极/48 槽表贴式永磁电机为例,定子绕组接线如附录中图 A7 所示,充电模式下电机磁通密度分布及输出转矩的有限元仿真结果如附录中图 A8 所示,可以看出电机磁力线沿气隙圆呈对称分布,虽然分裂相之间产生的磁动势相互抵消,实现了电磁转矩输出平均值为 0,但存在一定量的铁耗^[18]。文献[19]采用有限元模拟法,推导了转子位置与电

感值、互感值之间的数学关系表达式,并进行了仿真验证。文献[20]进一步引入了零序分量作为控制自由度,通过改进型弱磁调速方案扩大了插入式 EDRC 电驱运行时的调速范围。

研究学者们认为^[4-5],这种插入式 EDRC 系统存在 3 个问题:电机的 6 个绕组之间存在耦合,要想保持绕组中电流的平衡,控制策略比较复杂;在电机本体设计上,各相绕组的中点处需要安装抽头,并且充电模式下需要断开三相绕组的中性点,使各相绕组独立;实际应用中如何精确确定转子位置。

文献[21]提出了一种适用于四轮驱动电动汽车插入式 EDRC 拓扑结构。该系统如附录中图 A9 所示,包括 4 个感应或永磁电机、4 个三相电压型逆变器、1 个直流侧蓄电池以及 1 个用于控制该电路在电驱模式和充电模式之间转换的转换开关。当电路工作在充电模式,即转换开关位置时,三相交流电源连接到 3 个电机的中性点,令同一套三相电压逆变器的上/下桥臂开关信号同步,便可使电路重构成一套三相可控整流变换器且具备功率因数调节功能,如附录中图 A10 所示。该结构下每套三相绕组所流过的相电流相等,故不存在电磁转矩。通过控制 PWM 整流器,可控制零序电流分量实现蓄电池充电或车-网互联(V2G)模式。但是这种结构成本较高,并且只适用于四轮驱动的电动汽车,有很大的局限性。

1.4 多相 EDRC 拓扑结构

电动汽车因其特殊的性能要求与恶劣的运行环境,对电驱系统提出了苛刻的要求。与三相电机驱动相比,多相电机驱动系统具有许多突出的优点,如高效、低转矩脉动、容错能力强等,为电动汽车的动力执行机构提供了一种新的解决方案^[22-24]。为寻求多相电机驱动电动汽车的车载充电系统方案,一系列多相 EDRC 系统拓扑结构相继被提出。文献[25-26]提出了基于六相对称/不对称感应电机的 EDRC 系统,在六相不对称绕组 EDRC 系统中需配置 1 个 Y/Y- Δ 型双二次绕组变压器,其结构如附录中图 A11(a)所示;在六相对称绕组 EDRC 系统中需增设 1 个 Y/Y-Y 型双二次绕组变压器,其结构如附录中图 A11(b)所示,并通过相电流变换矩阵对六相绕组电流进行合理分配,以控制基波转矩电流分量为 0,进而实现零平均转矩输出,防止电机转子转动。在此基础上,文献[27]提出了一种基于双三相移 180° 表贴式永磁同步电机的多相 EDRC 系统,通过增设一套额外接触器完成了三相电网电流的分配,其结构如附录中图 A12 所示,并通过有效调节两并联变换器交错角度实现了不连续 PWM 控制方式下的环流抑制。

近年来,随着研究的深入,国外研究人员已提出

不同类型的多相电驱拓扑结构用于实现 EDRC 系统的功能,并对 EDRC 拓扑结构进行了探索性的研究。如英国利物浦大学的 Ivan Subotic 和 Emil Levi 等学者在英国工程和自然科学研究委员会的资助下相继研制了基于五相、六相对称/不对称、九相不对称感应电机的多相 EDRC 系统^[28-30],并采用谐振式矢量比例控制器对充电谐波电流进行有效控制,实现了良好的控制效果,其中五相 EDRC 系统结构如图 2 所示。该 EDRC 系统均采用电机绕组作为滤波电感,充电时输入的三相交流电从两相组绕组(六相系统)或三相组绕组(九相系统)的中性点流入,此时各相绕组相当于 2 个或 3 个并联的滤波电感,各相绕组内流过的是大小、方向相同的零序电流,故电机内部无任何旋转磁场,充电时转子可保持静止,该特性非常适合应用于 EDRC 系统。需要注意的是,在五相 EDRC 系统的充电过程中,三相交流电会在多相电机基波子空间 α 轴上激励转矩分量(而 β 轴分量恒为 0),因此会引起脉动转矩,但并不会产生旋转的磁场,转子上不会输出电磁转矩。

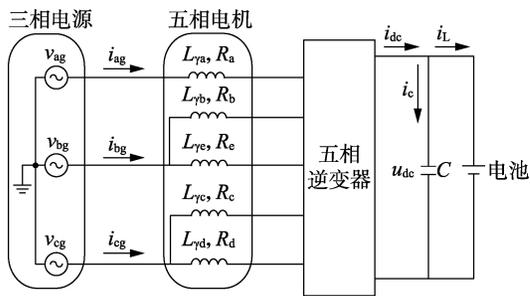


图 2 五相 EDRC 系统结构

Fig.2 Structure of five-phase EDRC system

为进一步减小系统成本,文献[31]提出了一种采用九开关变流器供电的六相 EDRC 系统,其结构如图 3 所示,充电时同样具有无旋转磁场特性。文献[6]从转矩电流分量及控制自由度角度透析了正弦波多相电机用于多相 EDRC 系统的本质,将潜在转矩产生问题简化为激励源从基波子空间转移到谐波子空间的映射过程。为了便于工程实现,文献

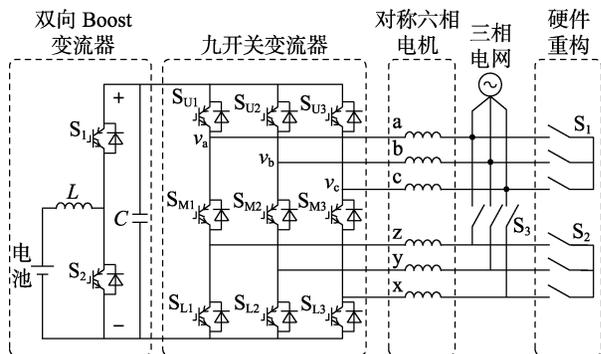


图 3 基于九开关变流器的六相 EDRC 系统结构

Fig.3 Structure of six-phase EDRC system based on nine-switch converter

[32]对九相永磁/感应电机的 EDRC 系统整机效率和损耗进行了测定,得到永磁和感应电机的 EDRC 系统整机效率最高时可分别达 92%和 92.5%。

1.5 拓扑比较

由于上述的 EDRC 三相大功率充电系统有着不同的硬件拓扑,导致其具有不同的性能和特点。比如,辅助式 EDRC 系统一般工作于直流变换模式,有着较高的直流调节能力,但需额外配置整流装置,其功率等级也相对较低;多相 EDRC 解决了传统机械式 EDRC 充电转矩及插入式 EDRC 绕组均流等带来的问题,并且其功率等级较高。此外,它们的工作模式也不同,辅助式 EDRC 的电机绕组作用于直流侧,更适合采用 DC/DC 运行模式,而机械式 EDRC、插入式 EDRC 及多相 EDRC 的电机绕组大多重构为交流电感,更适合采用 AC/DC 运行模式。为了便于深入理解,针对上述 EDRC 系统,从有无转矩充电运行、硬件重构复杂度、电机绕组及逆变器作用方面进行综合比较,见表 1。

表 1 技术性能比较

Table 1 Comparison of technical characteristics

拓扑结构	有无转矩充电运行	硬件重构复杂度	电机绕组作用	逆变器作用
辅助式 EDRC	无	较容易	作为 DC/DC 储能电感	重构成三相 DC/DC 变流器
机械式 EDRC	有	较容易	作为工频变压器电感或 AC/DC 滤波电感	重构成三相 AC/DC 整流器或保持逆变器作用
插入式 EDRC	无	困难	AC/DC 网侧滤波电感	重构成多相 AC/DC 整流器
多相 EDRC	无	容易	AC/DC 网侧滤波电感	重构成多相 AC/DC 整流器

目前市场上,辅助式 EDRC 系统已成功应用于雷诺公司推出的商业纯电动车型 Renault ZOE,该车配置的 43 kW Chameleon 充电机采用如图 1 所示的拓扑结构,具备 30 min 充电 80%的优越性能。由于 EDRC 系统具有较高的能源存储空间和更低的成本,相信在未来电动汽车车载充电市场中必定占据一定份额。

2 永磁 EDRC 系统电磁分析

通过系统地文献及产品调研,总结发现目前 EDRC 技术主要掌握在美国、法国、瑞典、英国等欧美汽车强国手里,且研究成果大多集中在感应电机系统,而对于永磁 EDRC 系统特别是在 EDRC 系统接入三相电网后电机绕组通电对永磁电机电磁性能的影响方面研究较少,且存在如下问题:未考虑停止转动的永磁电机由于永磁磁场撤不掉,存在磁场回路,会造成一定的电机铁耗;不同永磁电机存在不同电感值,且绕组重构对 EDRC 系统的稳定性有影响;凸极性永磁电机转子位置会对绕组等效电感有影

响,不同转子位置对应不同等效电感,导致流过的正弦电流大小和相位不一致,转子上会有转矩产生;对于诸如六相 EDRC 系统转矩电流有 2 个方向激励,会影响电机中的振荡转矩,且转矩值大小是随着时间和转子位置变化而变化的,如何准确建立该脉动转矩的数学模型需展开进一步的研究。

2.1 对电机损耗的影响

由于永磁电机的功率密度大、定子散热面积小、损耗密度高,在利用永磁电机绕组做 EDRC 滤波电感或储能电感时,不能忽略绕组通电所产生的损耗。实质上,EDRC 模式下永磁电机是停止转动的,电机内的交变磁场只由电枢电流产生;当永磁电机做电动机运行时,电机内的交变磁场由永磁体和电枢电流共同产生,因此可以推测永磁电机做 EDRC 系统使用时的铁耗是低于电机做电动机时的情况。具体的情况有待结合真实的工况进行详细计算,即使是普通充电机,在电感的铁芯中同样会存在铁耗,但是只要电机铁耗不超过一定的范围,所产生的温升在可以接受的范围之内,就能保证电机运行的安全性。图 4 为电驱及充电工况下三相永磁电机的铁耗有限元分析,可以看出,永磁电机在充电时的铁耗与电驱工况相当。

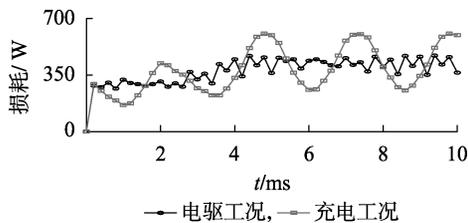


图 4 铁耗有限元分析

Fig.4 Finite element analysis of core loss

2.2 对电机电感的影响

不同电动汽车的电机功率不同,绕组的电感值也不同,在利用电机绕组做 AC/DC 滤波电感时,会影响充电机的输入电流动态调节能力,这就要求 AC/DC 环节有较高的动态电流调节能力且具备优良的滤波效果;在利用电机绕组做 DC/DC 变换储能电感时,会影响充电器的输出电压范围,这就要求 DC/DC 环节有较高的输出电压范围且能工作在 CCM。然而不同电动汽车所用永磁电机绕组电感并不相同,一般在 1~200 mH 范围内^[33]。为验证不同电感对系统性能的影响,本文以永磁电驱重构为三相交错 Buck 电路为例^[34],特别地,若因电机绕组电感量过小引起电流断续问题,可在三相绕组中性点处增设一个串联附加电感 L_{add} 。其等效电压外环小信号模型传递函数可表示为:

$$G(s) = \frac{U_i(R_{esr}Cs+1)}{\frac{R+R_{esr}}{3R}LCs^2 + \left(\frac{L}{3R} + R_{esr}C\right)s + 1} \quad (1)$$

其中, R_{esr} 为输出电容 C 的等效串联电阻; R 为负载电阻; L 为电机绕组电感; U_i 为输入电压。绘出其 Bode 图如图 5 所示。

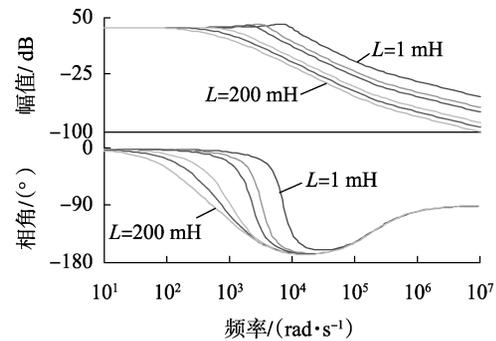


图 5 不同 L 值下电压外环传递函数 Bode 图

Fig.5 Bode diagram of voltage outer-loop transfer function under different values of L

从图 5 中可看出,随着电机绕组电感 L 的增大,电压环的带宽会有所减小。图 6 为不同电感情况下的主导极点分布图。可以看出,极点关于实轴对称分布在左半平面,随着 L 的增大,极点向原点趋近,系统衰减振荡后趋于稳定,这与 Bode 图分析结果一致。由以上分析可知,电机电感并不会影响 EDRC 的稳定性,且对控制环的带宽影响甚微,因此,EDRC 系统思想可应用于不同电动汽车电驱方案。

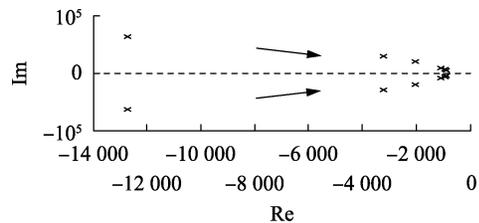


图 6 不同 L 值下电压外环传递函数极点分布

Fig.6 Root locus distribution of voltage outer-loop transfer function with different values of L

2.3 对电机输出转矩的影响

由第 1 节的 EDRC 拓扑结构讨论可知,在三相充电系统中利用电机绕组作为滤波电感主要应用于多电机或多相 EDRC 系统,会存在电机旋转的问题,这在充电过程中是绝对不允许发生的。学者们从电机本体考虑,外加一定的电流控制策略,在理论上可以实现电机静止,但并没有研发出实际工程样机。且未集中考虑永磁电机转子位置对电磁转矩输出的影响,主要体现在每相绕组的等效电感与转子位置有关,并联的绕组等效电感不同,导致流过的正弦电流大小和相位不一致。在开始充电时,电机转子是缓慢转动的,就会在绕组中产生激励电动势,引起支路电流的不均流,进而产生旋转的气隙磁场。本文从合成气隙磁动势角度综合研究转子位置对平均转矩输出的影响,同时结合多相 EDRC 多控制自由度,最终将电磁转矩产生机理问题简化为激励源从基波

子空间转移到谐波子空间的映射过程。

以基于绕组对称分布的六相永磁电机 EDRC 系统为例,按照空间矢量解耦及幅值不变原则,可得六相对称系统自然坐标系到静止坐标系的扩展派克变换形式如下:

$$C_1 = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & \cos \gamma & \cos 2\gamma & \cos 3\gamma & \cos 4\gamma & \cos 5\gamma \\ 0 & \sin \gamma & \sin 2\gamma & \sin 3\gamma & \sin 4\gamma & \sin 5\gamma \\ 1 & \cos 5\gamma & \cos 4\gamma & \cos 3\gamma & \cos 2\gamma & \cos \gamma \\ 0 & \sin 5\gamma & \sin 4\gamma & \sin 3\gamma & \sin 2\gamma & \sin \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_x \\ i_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $\gamma = 60^\circ$; i_α 和 i_β 为转矩平面电流分量; i_x 和 i_y 为谐波平面电流分量。实际上,它们反映了各平面磁势的大小和相位,例如,转矩平面磁势的幅值正比于 $\sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2}$, 相位取决于 i_β / i_α 。

假定电网三相平衡,则输出电流为:

$$\begin{cases} i_a = \sqrt{2} I_m \cos(\omega t) \\ i_b = \sqrt{2} I_m \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ i_c = \sqrt{2} I_m \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (3)$$

其中, I_m 为电流有效值。

结合相绕组电流分配原则,即:

$$i_{A1} = i_{A2} = \frac{i_a}{2}, \quad i_{B1} = i_{B2} = \frac{i_b}{2}, \quad i_{C1} = i_{C2} = \frac{i_c}{2} \quad (4)$$

将式(3)代入式(4),结合式(2)可得电机六相绕组系统转矩平面(α - β)及谐波平面(x - y)电流分量为:

$$\begin{cases} i_\alpha = 0.612 I_m \cos(\omega t + \pi/6) \\ i_\beta = 0.354 I_m \cos(\omega t + \pi/6) \\ i_x = 0.612 I_m \cos(\omega t + \pi/6) \\ i_y = -0.354 I_m \cos(\omega t + \pi/6) \end{cases} \quad (5)$$

可以看出,充电时三相交流电会在永磁电机转矩平面的 α 和 β 轴上均激励转矩分量,如图 7 所示,因此会在绕组中产生激励电动势,在开始充电时,转子上会产生电磁转矩,就有可能导致电机旋转,这与文献[35]的分析不一致。

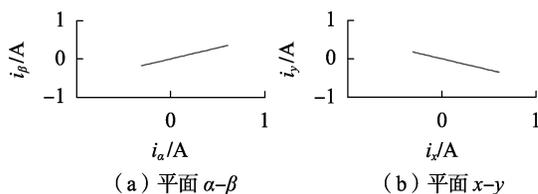


图 7 平面 α - β 及 x - y 电流轨迹

Fig.7 Current locus on plane α - β and x - y

由电机学原理知,电磁转矩等于电流不变时磁共能 W_{co} 对机械角位移的偏导数,则电磁转矩推导为:

$$T_e = n_p \left(i_s \psi_{fd} \frac{\partial \xi}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_s \frac{\partial L_{ss}}{\partial \theta} i_s^T \right) \quad (6)$$

其中, $i_s = [i_a \ i_b \ i_c]$; L_{ss} 为电感矩阵; θ 为转子电角度; n_p 为极对数; ψ_{fd} 为永磁磁链的幅值; $\xi = [\cos \theta \ \cos(\theta - 2\pi/n) \ \cdots \ \cos[\theta - 2(n-1)\pi/n]]^T$ 。可以看出,永磁电机的电磁转矩是关于转子电角度 θ 的函数,且主要包括以下 2 个部分:永磁磁链与电枢电流作用产生的永磁转矩,由电感变化引起的磁阻转矩。因此,求得平均转矩为 0 时转子位置解为:

$$\theta = 30^\circ \text{ 或 } \theta = 210^\circ \quad (7)$$

为避免开始充电时绕组中产生的激励电动势,必须对转子位置进行重新定义和限制,本文将 2 套三相绕组的第 1 相绕组中心轴的转子位置定义为转子初始位置角度,即 $\theta = 30^\circ$ 。参照矢量空间解耦方法中坐标变换的选取,将变换矩阵式(2)改写为:

$$C_2 = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} \cos \delta & \cos \delta & \cos 3\delta & \cos 5\delta & \cos 7\delta & \cos 9\delta \\ -\sin \delta & \sin \delta & \sin 3\delta & \sin 5\delta & \sin 7\delta & \sin 9\delta \\ \cos 5\delta & \cos 5\delta & \cos 3\delta & \cos \delta & \cos 11\delta & \cos 9\delta \\ -\sin 5\delta & \sin 5\delta & \sin 3\delta & \sin \delta & \sin 11\delta & \sin 9\delta \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $\delta = 60^\circ$ 。

同理推得转矩平面和谐波平面的电流分量为:

$$\begin{cases} i_\alpha = 0.707 I_m \cos(\omega t + \pi/6) \\ i_x = -0.707 I_m \cos(\omega t + \pi/6) \\ i_\beta = i_y = 0 \end{cases} \quad (9)$$

由转矩平面的电流表达式可知,转矩平面 α 轴上会激励转矩分量,但 β 轴分量恒为 0,这会引引起脉动转矩,但并不会产生旋转的磁场。图 8 为充电过程中九相永磁电机的电磁转矩分析结果,可见电机输出平均转矩为 0,并且幅值很低(电机的额定转矩为 $110 \text{ N}\cdot\text{m}$),不足以产生电机旋转的启动转矩。

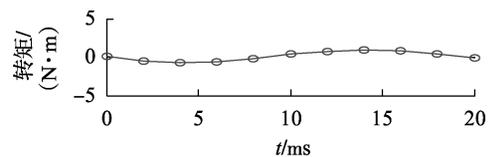


图 8 电磁转矩分析结果

Fig.8 Results of electromagnetic torque analysis

因此,可以考虑电机设计方面,只要充电电流均衡,并控制转子初始位置于定子极对称位置时,就不会产生启动转矩。

3 EDRC 系统控制方法

针对不同拓扑在充电模式下的结构,学者们研究和应用了不同的方法实现蓄电池充电控制,其中

最常用的是比例-积分-微分 (PID) 控制。文献[32, 36]将 EDRC 系统的充电过程分为恒压、恒流、恒功率 3 种充电模式,并揭示了不同充电模式下均可采用基于 3 个 PI 调节器的双闭环控制,以实现被控对象跟踪及单位功率运行的功能。同时,为消除绕组电感耦合的影响,可在电流内环加入耦合分量的前馈解耦控制,以实现 dq 轴电流的全解耦,采用前馈解耦的双闭环控制框图如图 9 所示。

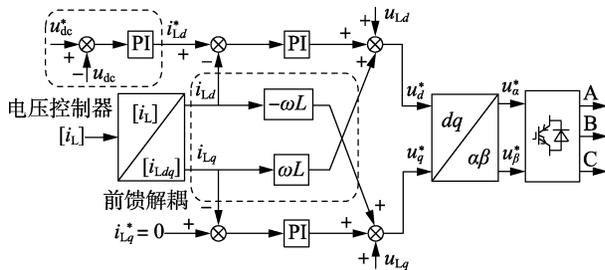


图 9 采用前馈解耦的双闭环控制框图

Fig.9 Control block diagram of double closed-loop with decoupled feedforward

但是,电动汽车 EDRC 拓扑是典型的非线性系统,因此 PID 控制器无法满足其多目标非线性的控制要求,下面总结了在此基础上应运而生的一些控制方法。

3.1 基于功率因数校正的交错 PWM 控制

功率因数校正功能是现代电动汽车充电技术的标配,易实现小电流及低损耗充电功能。文献[9]提出一种辅助式 EDRC 系统用功率因数校正和相电流均衡控制的方案,如附录中图 A13 所示。该方案通过电池管理系统得到充电电流参考值,并与实际电流比较后经 PI 调节器得到占空比。在固定转子角位置的基础上,通过闭环控制得到交直流轴电流分量的占空比补偿项,以保证各相电流均衡。同时,将充电模式下升压转换器中的 IPMSM 绕组等效成四线共模模型与三线差模模型,并对这 2 种模型下的电流控制结果进行对比分析,研究发现共模模型下由于转子各向异性对交错控制下的充电电流没有影响,控制效果较佳。采用交错 PWM 控制算法后,输入/输出电流的调制频率为开关频率的 3 倍,电流波动明显减少,并有效提高了转换效率和动态性能。

3.2 基于宏观能量表示法的控制

针对如附录中图 A6 所示的插入式 EDRC 系统拓扑结构,文献[17]采用多机理论和宏观能量表示 EMR (Energetic Macroscopic Representation) 法对系统进行建模,如附录中图 A14 所示。该方案定义了 2 个虚拟电机 M_0 和 M_1 , M_1 为基本虚拟电机, M_0 为零序虚拟电机。用作电驱时,可另设一个 M_0 控制分支,抑制由 3 次谐波分量所激励的零序分量绕组,以获得较好的电流及转矩输出性能;用作充电时,利用电压外环、电流内环的双闭环控制技术对网侧电流

dq 轴分量进行独立控制,进而实现有功及无功功率的有效调节。

3.3 基于谐振式矢量比例控制器的双闭环控制

针对多相 EDRC 系统,文献[28-30]提出了基于谐振式矢量比例 VPI (Vector Proportional-Integral) 控制器的双闭环控制策略,利用 2 个 PI 调节器并结合前馈解耦补偿设计,通过独立调节直、交轴电流分量实现单位功率因数充电运行,即控制电流分量 $i_{qg} = 0$,仅调节电流分量 i_{dq} 完成恒流及恒压充电模式。同时,为抑制由逆变器死区效应和电网畸变引起的网侧低次谐波电流,设计了 6 次和 12 次谐波的 VPI 谐振控制器,以消除 5、7、11、13 次谐波电流的影响。在此基础上,文献[30]通过增设 2 次谐波电流的 VPI 谐振控制器,有效抑制了由电机参数不对称引起的网侧 2 次谐波电流,并获得了良好的实验效果,其控制框图如附录中图 A15 所示。

3.4 环流抑制及谐波治理

EDRC 系统大多采用模块并联技术,如附录中图 A6、A9 及 A11 等所示的结构,通过功率器件并联,可以大幅提高系统的功率等级、可靠性及效率。同时模块并联也给变换器系统设计、容量扩展、系统经济性等方面带来了便利,但是模块并联同样也带来了环流的问题。共直流母线交流侧直接并联的三相 PWM 变换器或共直流母线直流侧直接并联的 DC/DC 变换器中会产生零序电流的环流通道。由于并联模块间的硬件参数不匹配及控制效果(如零序占空比)的不同,在并联模块间将会产生零序的环流。环流会使网侧电流发生畸变,增加损耗,降低系统功率;同时会使电机绕组磁路饱和,产生电感损耗,并使电感发热。电力电子变换器拓扑结构产生的谐波污染和低功率因数会对电网产生严重的影响。另外,EDRC 系统拓扑中对蓄电池充电时若采用 PWM 整流方式,则整流电路不可避免地输出固有的 2 次谐波,这会严重影响蓄电池充电质量并缩短蓄电池使用寿命,而要消除低频谐波,一般在直流侧接上大电容或者 LC 滤波电路消除低频纹波电压。如何在兼顾体积、重量的基础上消除 2 次谐波污染或者合理利用此部分能量,亦是需研究的主要问题。

4 结论

本文介绍了电动汽车用 EDRC 系统拓扑的国内外研究现状,并举例分析了几种新型拓扑方案,指出了各自的优缺点,同时分析了充电过程中绕组通电对电机特别是永磁电机电磁特性的影响,阐述了相关控制方法,展望了该领域未来的发展方向。目前对 EDRC 系统拓扑的研究大多还停留在理论分析、仿真验证的阶段,在分析仿真的基础上进行硬件实验研究是未来研究的重中之重。作为一种新兴的电

电动汽车充电技术,电动汽车用 EDRC 系统最大限度地优化了车载充电机的充电质量、体积、重量和成本,具有非常光明的发展和前景,必将对电动汽车的发展做出重要贡献。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 杨月新,车延博,杨立勋. 电动汽车充电机运行状态多指标综合评估[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):72-79.
YANG Yuexin,CHE Yanbo,YANG Lixun. Multi-index comprehensive evaluation of running state for electric vehicle charger [J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(3):72-79.
- [2] 魏大钧,孙波,张承慧. 电动汽车车载充电机接入住宅区配电网谐波研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):13-18.
WEI Dajun,SUN Bo,ZHANG Chenghui. Harmonics caused by connecting EV on-board chargers to residential distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):13-18.
- [3] KHALIGH A,DUSMEZ S. Comprehensive topological analysis of conductive and inductive charging solutions for plug-in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2012,61(8):3475-3489.
- [4] MURAT Y,PHILIP T K. 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):2151-2168.
- [5] 刘莹,王辉,漆文龙. 电动汽车驱动系统与蓄电池充电一体化混合拓扑研究综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):143-149.
LIU Ying,WANG Hui,QI Wenlong. Summary of integrated topology of EV traction system and battery charging system [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(10):143-149.
- [6] SUBOTIC I,BODO N,LEVI E, et al. Overview of fast onboard integrated battery chargers for electric vehicles based on multiphase machines and power electronics[J]. IET Electric Power Applications,2016,10(3):217-229.
- [7] LEVI E. Advances in converter control and innovative exploitation of additional degrees of freedom for multiphase machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2016,63(1):433-448.
- [8] LUCA S. Nonconventional onboard charger for electric vehicle propulsion batteries[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2001,50(1):144-149.
- [9] PELLEGRINO G,ARMANDO E,GUGLIELMI P. An integral battery charger with power factor correction for electric scooter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2010,25(3):751-759.
- [10] WOO D G,JOO D M,LEE B K. On the feasibility of integrated battery charger utilizing traction motor and inverter in plug-in hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2015,30(12):7270-7281.
- [11] LACRESSONNIERE F,CASSORET B. Converter used as a battery charger and a motor speed controller in an industrial truck [C] // European Conference on Power Electronics and Applications. Dresden,Germany:IEEE,2005:11-14.
- [12] DUAN Z,ZHAO F,CONG W, et al. Analysis of charging torque in a three-phase integrated charger of electrical vehicle [C] // Conference and Expo on Transportation Electrification Asia-Pacific. Beijing,China:IEEE,2014:1-5.
- [13] LU X,IYER K,MUKHERJEE K, et al. Investigation of integrated charging and discharging incorporating interior permanent magnet machine with damper bars for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2016,31(1):260-269.
- [14] HAGHBIN S,LUNDMARK S,ALAKULA M, et al. An isolated high-power integrated charger in electrified-vehicle applications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2011,60(9):4115-4126.
- [15] HAGHBIN S,KHAN K,ZHAO S, et al. An integrated 20 kW motor drive and isolated battery charger for plug-in vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(8):4013-4029.
- [16] HAGHBIN S,LUNDMARK S,ALAKULA M, et al. Grid-connected integrated battery chargers in vehicle applications; review and new solution [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2013,60(2):459-473.
- [17] BRUYERE A,SOUSA L,SANDULESCU P, et al. A multiphase traction/fast-battery-charger drive for electric or plug-in hybrid vehicles [C] // IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion. Lille,France:IEEE,2010:1-7.
- [18] HAGHBIN S,GUILLEN I. Integrated motor drive and non-isolated battery charger based on the torque cancelation in the motor [C] // IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Kitakyushu,Japan:IEEE,2013:824-829.
- [19] LACROIX S,LABOURE E,HILAIRET M. An integrated fast battery charger for electric vehicle [C] // IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion. Lille,France:IEEE,2010:1-6.
- [20] SANDULESCU P,MEINGUET F,KESTELYN X, et al. Flux-weakening operation of open-end winding drive integrating a cost-effective high-power charger [J]. IET Electrical Systems in Transportation,2013,3(1):10-21.
- [21] SUBOTIC I,JONES M,LEVI E. A fast onboard integrated battery charger for four-motor EVs [C] // International Conference on Electrical Machine. Berlin,Germany:IEEE,2014:2066-2072.
- [22] YU F,CHENG M,CHAU K T. Controllability and performance of nine-phase FSPM motor under severe five open-phase fault condition [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2016,31(1):323-332.
- [23] CHENG M,YU F,CHAU K T. Dynamic performance evaluation of a nine-phase flux-switching permanent magnet motor drive with model predictive control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2016,63(7):4539-4549.
- [24] 於锋,程明,夏子朋,等. 三种谐波电流注入模式下的磁通切换永磁电机缺相容错控制 [J]. 中国电机工程学报,2016,36(3):836-844.
YU Feng,CHENG Ming,XIA Zipeng, et al. Fault tolerant control of flux-switching permanent magnet motors with three kinds of harmonic current injections [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(3):836-844.
- [25] SUBOTIC I,LEVI E,JONES M, et al. An integrated battery charger for EVs based on an asymmetrical six-phase machine [C] // The 39th Annual Conference on the IEEE Industrial Electronics Society. Vienna,Austria:IEEE,2013:7244-7249.
- [26] SOBOTIC I,LEVI E. An integrated battery charger for EVs based on an symmetrical six-phase machine [C] // The 23rd International Symposium on Industrial Electronics. Istanbul,Turkey:IEEE,2014:2074-2079.
- [27] ALI S Q,MASCARELLA D,JOOS G, et al. Circulating current minimization for dual three-phase motor integrated battery charger [C] // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Montreal, QC, Canada:IEEE,2015:3651-3658.

- [28] SUBOTIC I, LEVI E, BODO N. A fast onboard integrated battery charger for EVs using an asymmetrical six-phase machine [C] // IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion. Coimbra, Portugal: IEEE, 2014: 1-6.
- [29] SUBOTIC I, BODO N, LEVI E, et al. Onboard integrated battery charger for EVs using an asymmetrical nine-phase machine [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 3285-3295.
- [30] SUBOTIC I, BODO N, LEVI E. An EV drive-train with integrated fast charging capability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1461-1471.
- [31] DIAB M, ELSEROUGI A, AYMAN S, et al. A nine switch converter based integrated motor drive and battery charger system for EVs using symmetrical six-phase machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(9): 5326-5335.
- [32] BODO N, LEVI E, SUBOTIC I, et al. Efficiency evaluation of fully integrated onboard EV battery chargers with nine-phase machines [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1): 257-266.
- [33] CHAU K T, CHAN C C, LIU C. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(6): 2246-2257.
- [34] 袁晓强, 於锋, 吴晓. 永磁驱动重构型车载充电机三相 DC/DC 变换器的研究 [C] // 电力电子与变频电源新技术学术年会. 苏州, 中国: 出版者不详, 2017: 138-143.
- YUAN Xiaoqiang, YU Feng, WU Xiao. Research on three-phase DC/DC converter of the permanent-magnet-drive reconstructed on-board charger [C] // Annual Conference on Power Electronics and Frequency Conversion Technology. Suzhou, China: [s.n.], 2017: 138-143.
- [35] SUBOTIC I, BODO N, LEVI E. Integration of six-phase EV drive-trains into battery charging process with direct grid connection [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1012-1022.
- [36] LIU T H, CHEN Y, YI P, et al. Integrated battery charger with power factor correction for electric-propulsion systems [J]. IET Electric Power Applications, 2015, 9(3): 229-238.

作者简介:



於 锋

於 锋 (1985—), 男, 江苏苏州人, 讲师, 博士, 主要研究方向为永磁电机变频调速控制及电力电子技术在电动汽车中的应用等 (E-mail: yufeng628@ntu.edu.cn);

张 蔚 (1977—), 女, 江苏泰州人, 副教授, 博士, 主要研究方向为轴向磁通永磁电机设计和电动汽车驱动等;

刘春华 (1979—), 男, 广东河源人, 助理教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为特种电机设计和驱动、电力电子和电力传动、电动汽车驱动和船舶电驱动、新能源发电等。

Overview of electric-drive-reconstructed charger system for electric vehicle and its key technology

YU Feng¹, ZHANG Wei¹, LIU Chunhua², ZHU Zhihao¹

(1. School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China;

2. School of Energy and Environment, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: The EDRC (Electric-Drive-Reconstructed Charger) system for electric vehicles has a novel charger system topological structure, in which the motor winding is constructed as the filter inductance or energy storage inductance. At the same time, the electric-drive inverter is reconfigured as the AC/DC or DC/DC converter and they share the electric-drive controller and sensor unit. The EDRC system for electric vehicles provides a variety of advantages, such as high integration, large space for energy storage, selective charging modes, flexible control strategy, redundancy and high reliability, and hence is considered as a promising solution that satisfies the demands of high power and rapid charging applications. Firstly, current research and development conditions of EDRC system utilized in three-phase AC interface for electric vehicles are analyzed and summarized. Secondly, the various topologies and properties of EDRC system are reviewed. Thirdly, the control strategies of system are overviewed and the effects of windings in the charging condition on the motor electromagnetic characteristics are discussed. Finally, the future trends of EDRC system are prospected.

Key words: electric vehicles; electric-drive-reconstructed charger system; motor windings; three-phase AC interface; topology; electromagnetic characteristic

附录



图 A1 EDRC 系统结构示意图

Fig. A1 Structure of the EDRC system

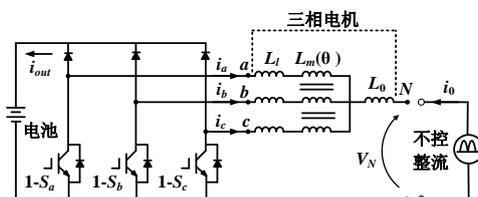


图 A2 永磁电驱重构型三相 DC/DC 升压变换器

Fig. A2 Three-phase boost converter obtained by the PM motor drive

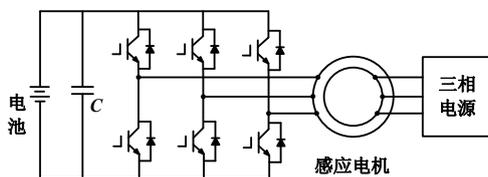


图 A3 基于 6kW 感应电机的机械式 EDRC 系统拓扑

Fig. A3 Simplified structure of the assisted EDRC system based on a 6kW induction motor

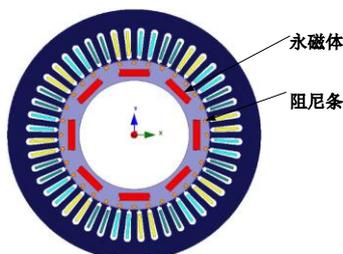
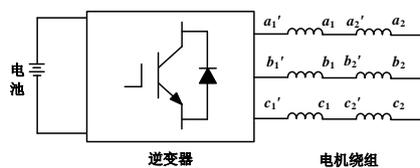


图 A4 基于带阻尼条转子结构的内嵌式永磁同步电机

Fig. A4 Structure of the interior permanent magnet synchronous motor with dampers



(a) 电驱模式

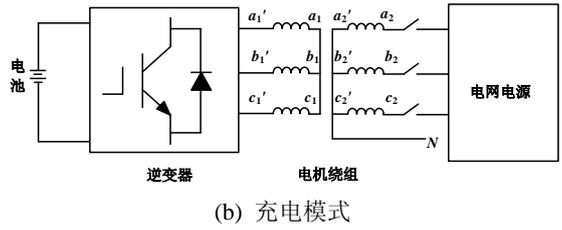


图 A5 双绕组机械式 EDRC 系统工作模式简化图

Fig. A5 Simplified structure of the assisted EDRC system based on a dual winding motor

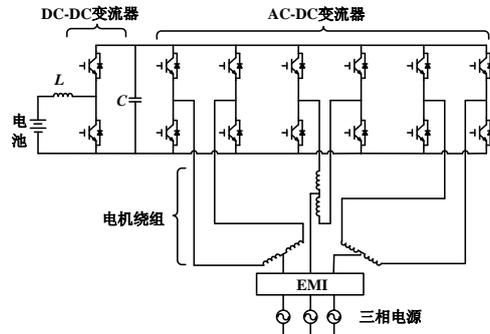


图 A6 基于永磁同步电机的插入式 EDRC 系统拓扑

Fig. A6 Structure of the plug-in EDRC system based on a PMSM motor

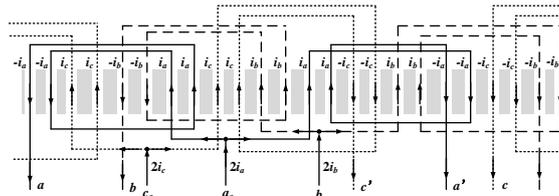
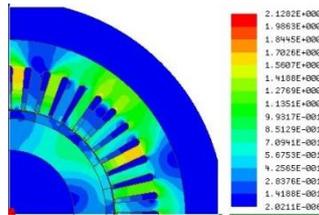
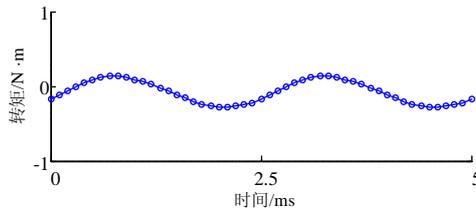


图 A7 定子绕组接线图

Fig. A7 Diagram of stator winding connection



(a) 磁密分析



(b) 转矩分析

图 A8 有限元仿真结果

Fig. A8 Simulation results based on finite element analysis

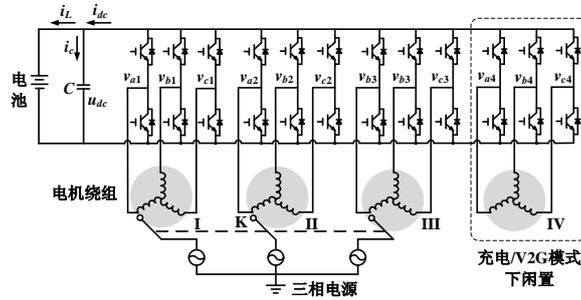


图 A9 四驱电动汽车插入式 EDRC 拓扑结构^[26]

Fig. A9 Topology of the plug-in EDRC system based on four-wheel drive^[26]

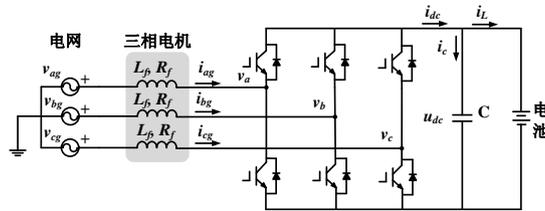


图 A10 充电时等效电路

Fig. A10 Equivalent circuit in charging mode

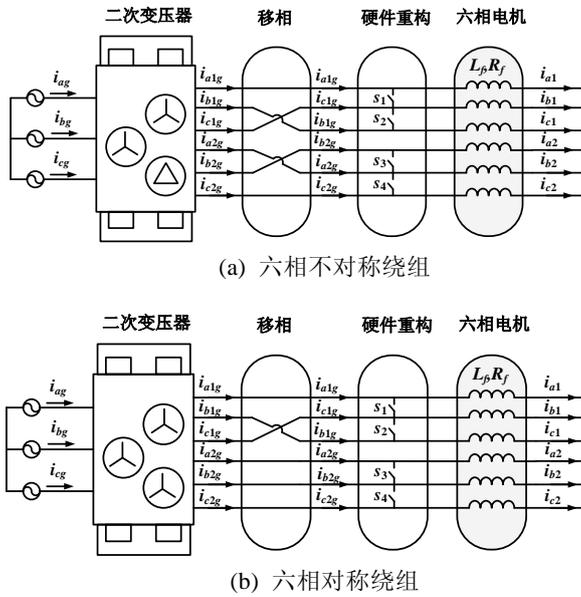


图 A11 带双二次绕组变压器的多相 EDRC 拓扑结构

Fig. A11 Structure of the multi-phase EDRC system with two secondary windings transformer

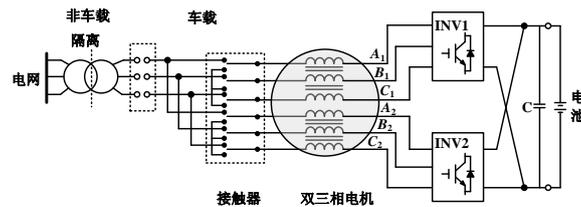


图 A12 基于双三相永磁同步电机的多相 EDRC 系统

Fig. A12 Structure of the multi-phase EDRC system based on a dual three-phase PMSM

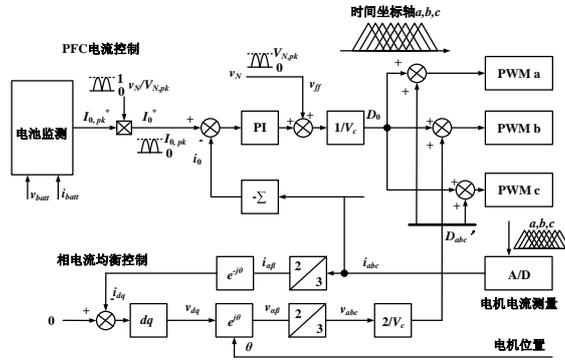


图 A13 基于功率因数校正的相电流均衡控制

Fig. A13 Phase currents balance current based on power factor correction

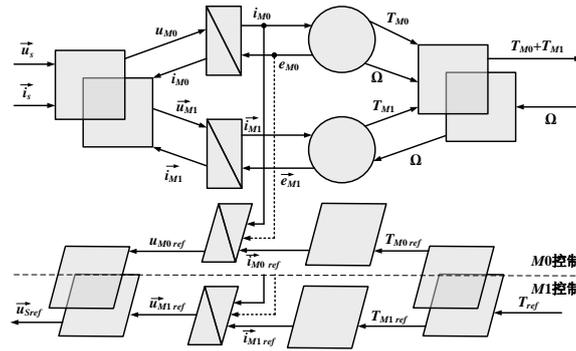


图 A14 基于虚拟电机的电机控制框图

Fig. A14 Motor control structure based on the two fictitious machines

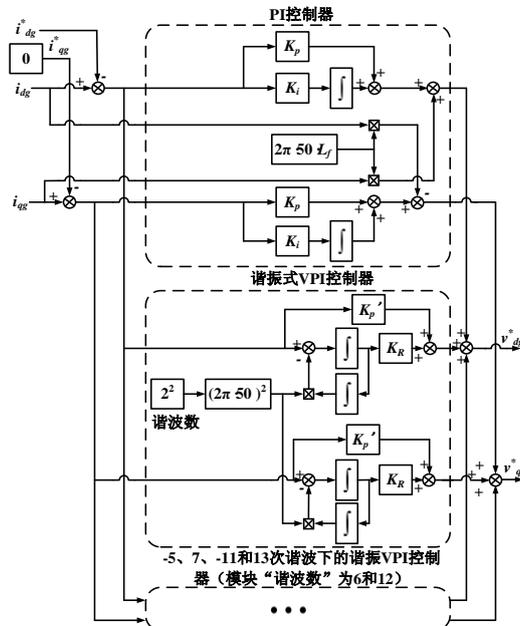


图 A15 基于谐波式矢量比例控制器的电流控制器

Fig. A15 Current controllers based on the resonant VPI controllers