2022年招生计划

六、预计招收博士生的课题研究方向和研究工作简介

1.博士论文研究方向： 电动汽车驱动电机模拟器并联多电平逆变器输出谐波抑制研究

选题类别：☐基础性研究 ■应用性研究 ☐工程技术攻关研究

☐新开辟的研究方向 ■已有研究方向的继续 ☐其他

2.博士论文的选题背景及意义和主要研究内容简介

中国汽车产业正处于由大到强转变的关键时期，先进、完备的正向研发能力是汽车强国的重要标志，仿真测试是汽车正向研发的重要手段。发展新能源汽车是国家的重大战略需求，根据2019年10月工信部下发的《新能源汽车产业发展规划（2021-2035）》，到2030年，新能源汽车销量将占当年汽车总销量的40%。仿真测试在中国汽车产业向新能源汽车转型升级过程中愈加重要。本选题的研究对象是面向电动汽车驱动系统电功率级仿真测试使用的电机模拟器。电机模拟器通过对功率逆变模块的高频开关控制，实现对电机电磁特性的模拟，进而实现对真实大功率旋转机械电机的代替。部分极限工况实验，比如抛负载、缺相短路、旋变断线和加速寿命测试等，如果采用机械负载台架完成将有极大风险，极易造成台架损坏，采用电机模拟器可以代替机械负载台架完成上述实验，是电机控制器研发和测试的重要环节。电动汽车驱动系统转速范围较宽、转矩变化速度快、大功率器件开关频率高、系统电磁兼容受谐波影响较为严重，这就要求与之对拖的电机模拟器功率逆变系统具备高开关频率、高额定电压和电流、低谐波输出、低电磁干扰等特点，同时还需保证高效率，低发热，减少降额运行。多电平逆变器是一种理想的面向电动汽车驱动系统开发和测试使用的电机模拟器功率逆变系统。电机模拟器组成主要包括功率放大单元、电机模型和负载模型、电流闭环算法以及滤波单元等。电机模拟器系统的稳态精度、动态特性及输出谐波脉动是衡量电机模拟器模拟精度的重要指标，输出谐波脉动主要影响因素为功率拓扑。功率拓扑的作用是模拟实际电机台架中电机控制器端口应该出现的电压或电流，也就是真实电机的反电势和电流，并联多电平功率拓扑结构中功率器件的非理想特性，如死区时间、开关时间、开关管以及反并联二极管的导通压降和寄生电容会导致输出电压误差、输出电流畸变，进而导致输出谐波的增大，从而影响电机模拟器的模拟精度，这些影响对比于真实电机的工作状态显然是不存在的，因此如何降低逆变器的输出谐波是影响模拟精度的关键问题。

综上，博士选题将针对电动汽车驱动电机模拟器并联多电平逆变器输出谐波抑制问题，分如下四个方面开展：

(1)研究逆变器的非理想特性，如嵌入的死区时间、开关时间、开关管以及二极管的导通压降和寄生电容对输出电压谐波的影响，进而分析对EME模拟精度的影响。研究EME并联多电平拓扑结构输出电压误差、输出电流畸变的产生机理，推导在并联多电平拓扑结构下误差电压公式。

(2)研究SiC MOSFET的结构组成及其动态特性，进一步对SiC MOSFET的开关过程进行分析，并重点讨论寄生电容对开关过程的影响，推导SiC MOSFET开关过程的数学公式。通过搭建实验平台来获取SiC MOSFET非理想特性的参数。

(3)分析不同的电压补偿策略的优缺点，基于已经确定的并联多电平拓扑结构和载波相移的控制策略提出一种精确的电压补偿方案，并且通过仿真验证所采用的电压补偿方案的有效性。

(4)设计搭建基于FPGA的大功率电机模拟器系统实验平台，然后在FPGA上位机中完成对EME实验平台的控制算法的编程并设计软件程序流程。通过实验证明本文采用的电压补偿方案对谐波抑制有效性。

3.该选题所依托的科研项目或研究经费来源情况

国家自然科学基金面上项目(52072098)和北京新能源汽车技术创新中心项目（HT-0502-202008070269）

2022年招生计划

六、预计招收博士生的课题研究方向和研究工作简介

1.博士论文研究方向： 电动汽车驱动电机模拟器并联多电平逆变器均流控制研究

选题类别：☐基础性研究 ■应用性研究 ☐工程技术攻关研究
☐新开辟的研究方向 ■已有研究方向的继续 ☐其他

2.博士论文的选题背景及意义和主要研究内容简介

随着技术的进步与电机控制模式日趋复杂，越来越多的学者使用更复杂的驱动器来满足电机在实际工况中的应用，对于电机控制器的功能、安全性以及可靠性等方面有着越来越高的要求。而传统机械电机测试台架可重复性差、极限工况难以达到以及一个台架难以同时满足多种不同类型电机测试，大大延长了研发周期与研发成本。功率级电机模拟器的开发有别于普通硬件在环只能用于信号级的测试。功率级硬件在环可以同时测试电机控制器的功率拓扑结构，通过模拟负载的端口特性以及电流跟踪算法可以使电机模拟器代替真实电机对整个电机控制器进行测试。相较于传统的测试台架，电机模拟器的电机本体、机械负载模均为数学模型，可以进行人为的设定与修改，以适应不同参数的电机和各种工况测试，具有测试方便、操作灵活等优点。电机模拟器端的功率拓扑结构为并联结构，输出电压为多电平。并联多电平具有输出谐波小、维护方便、高效率、高冗余度和高可靠性等优点。通过多相并联电压型逆变器可以大大提高电流容量获得更高的功率，但是代价就是可能会带来电流不平衡问题。当逆变器输出端并联，由于并联逆变器的硬件参数不一致，其开关动作不能完全同步，或输出电气参数不一致时就会产生循环电流。如果对循环电流处理不当，会导致三相电流的总谐波失真增大，开关器件的电流应力和导通损耗增大，系统效率降低，甚至会导致功率器件损坏。另外，多电平的产生是由于并联逆变器交错的开关时序产生的。在并联多电平中，交错开关时序方式产生了新的分量电流在逆变器之间流动，成为环流的主要因素，进一步增加了循环电流。电流的均衡问题成为并联多电平结构的关键性问题，所以研究并联多电平均流控制对电机模拟器功率拓扑结构的稳定性、可靠性与高效率有着十分显著的价值。

综上，博士选题将针对电动汽车驱动电机模拟器并联多电平逆变器均流控制问题，分如下四个方面开展：

（1）基于电路分析和环流定义，建立数学模型深入研究高频环流以及低频环流的产生原因和机理。分析并联多电平功率拓扑结构中影响环流的因素，根据基尔霍夫电压定律，结合电机模拟器实际使用工况，从理论和数学模型角度对环流产生机理进行推导，得到环流与电机模拟器母线电压、目标电流、控制周期以及电气时间常数之间的关系式。

（2）研究耦合网络结构以及参数对环流的影响，分析对比不同耦合网络的优缺点。基于等效电感数学模型，推导不同电感结构的共模电感以及差模电感，量化分析输出耦合网络结构的输出阻抗以及环流抑制效果。从环流抑制效果、多电平输出阻抗、功率损耗以及电机模拟器输出特性等方面进行考虑。考虑到工程实践等问题，对于并联多电平抑制环流、电机模拟器输出阻抗和模块化可扩展性的要求，初步确定输出耦合网络结构。根据电机模拟器基本结构，结合并联多电平输出耦合网络，搭建电机模拟器并联多电平仿真模型，对比分析不同耦合结构对高频环流的抑制效果。

（3）基于搭建的电机模拟器并联多电平功率拓扑结构，建立输出耦合网络的数学模型。分析输出耦合网络的状态空间表达式，基于模型逆运算求得各个支路的补偿电压，通过反馈补偿以达到均流控制效果。在仿真平台上对均流控制策略进行初步验证，对比分析均流控制策略开启前后环流幅值、支路电流以及相电流谐波动态特性。

（4）基于载波相移的调制策略，搭建并联多电平驱动程序，实现多电平相电压输出。同时，根据所提出均流控制算法基本思路，搭建并实现均流控制算法，验证利用并联支路环流幅值经过模型逆运算求得各个支路补偿电压反馈补偿以达到均流控制效果。分析均流控制算法对低频环流的抑制效果以及支路电流的谐波分析，实验验证均流控制策略的有效性。

3.该选题所依托的科研项目或研究经费来源情况

国家自然科学基金面上项目(52072098)和北京新能源汽车技术创新中心项目（HT-0502-202008070269）