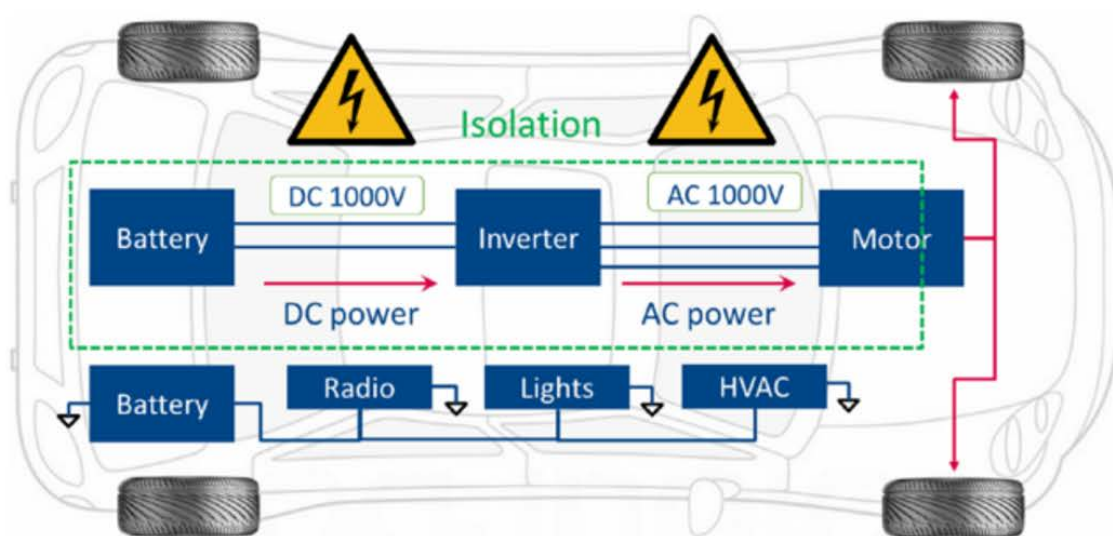


电动汽车功率测量

白皮书

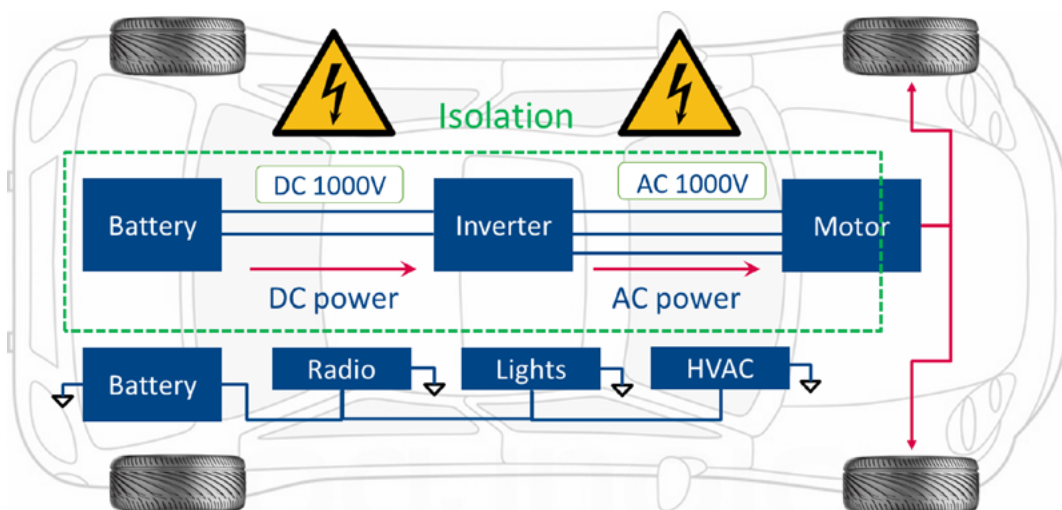


电动汽车功率测量

在持续优化、进一步开发和设计电驱动及汽车零部件时, 关键点在于功率及提高能源效率。另外, 温度管理也发挥了重要作用, 最终与安全相关。为实现高功率密度, 电机必须具有高转矩密度, 必须采用冷却系统和适当材料使其始终保持在安全限制范围内的温度。优化驱动机器的效率也涉及与转换器技术的相互作用。对于电动汽车内空调、加热等辅助单元的运行而言, 独立于驱动电机的这些单元自有执行器的功率也具有相关性。

功率测量的其他方面涉及电池寿命、高效充电和能量回收可能性之间的相互作用。后者提供了额外的能源、提高了效率并影响制动系统的设计。因此, 与传统内燃机相比, 电动汽车采用完全不同的制动系统设计, 需对其进行系统地分析和测试。最后, 除了分析电驱动外, 另一项任务是测量各零部件的机械功率, 从而可通过有效方式评估并提高效率。

对于系统开发和测试, 重要的是模拟不同场景, 以确定汽车电池和零部件的最佳功率和寿命。



电驱动及车辆电气系统

效率和功率测量

在评估技术系统时, 任何时刻的能量分布都至关重要。如果将能量和时间单位联系在一起, 根据定义, 就可以得到功率, 作为系统状态的特征量。在以下章节, 我们将基于物理原理解释电气系统功率的测量方法。例如, 为确定电机的效率, 还必须记录机械功率。

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{el}}$$

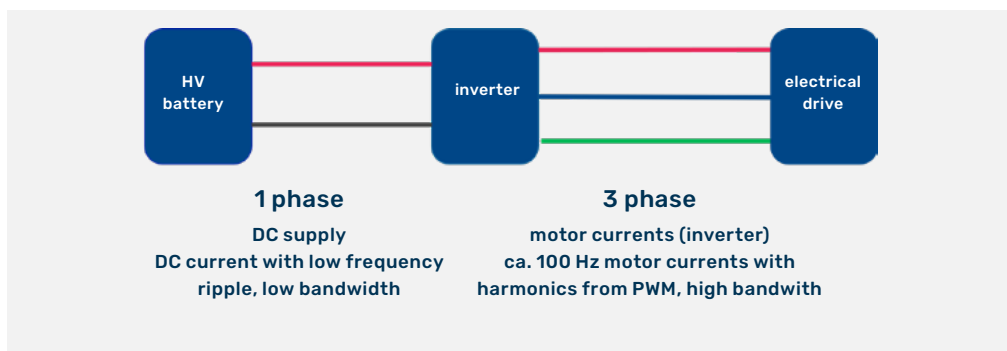
Efficiency factor: mechanical output power delivered P_{mech} and effective electrical power consumed P_{el}

在优化给定电池系统容量下达到的电动汽车续航里程时, 电机效率是决定性要素之一。效率因数等于机械输出功率与有效电输入功率之比。

在研发电动汽车时, 其中一项典型测量任务是确定电驱动系统 (例如: 电池、转换器和电机) 的功率。此外, 还有如何测量转换器和电机之间三相系统的有效功率, 使用哪种测量硬件,

以及在测量设置、采样率和数据评估方面需要注意哪些问题。

图中一方面显示了电池系统的直流电源, 叠加了纹波电压, 为单相直流链路; 另一方面显示了转换器和电机之间的三相系统, 电机电流根据转速确定, 谐波根据脉冲宽度调制 (简称PWM) 确定。



电驱动上的功率测量点

电功率的计算

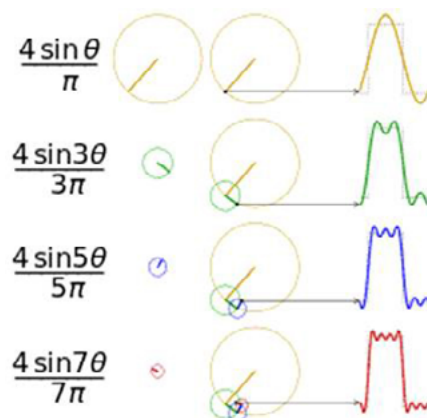
瞬时功率 注: 如果电压和电流都包含一个共同频率的固定周期量, 那么功率也是周期性的。因此, 该瞬时功率在一段时间内的平均值表示一段时间平均从一个电源获得的功率。	$p(t) = u(t) i(t)$
有效功率 frequency $f = \frac{1}{T}$ period $T = \frac{1}{f}$ Phase shift between current and voltage φ	$\overline{P(t)} = \frac{1}{T} \int_{(N-1)T}^{NT} u(t) i(t) dt$ $\overline{P(t)} = \frac{1}{T} \int_{(N-1)T}^{NT} \hat{u} \sin(\omega t) \hat{i} \sin(\omega t + \varphi) dt$ $= \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}} \cos \varphi = U_{RMS} \cdot I_{RMS} \cos \varphi$
视在功率	$S = U_{RMS} \cdot I_{RMS}$
无功功率	$Q = \sqrt{(S)^2 - (P)^2}$

有效功率可转换成其他形式的功率 (机械、热等)。无功功率向电路施加额外的应力, 视在功率是两者的几何/矢量和。

通常来说, 电流和电压包含更高频率谐波: 若电流和电压为非正弦周期量, 这有利于根据傅里叶表示周期信号。这可用于显示电流和电压中的哪些频率对有效功率有贡献, 并因此确定测量系统所需的带宽或采样率。

傅里叶级数

根据傅里叶变换, 任何周期信号都可以由正弦信号和余弦信号之和组成。对于图中所示的方波信号, 可以清楚地看到, 随着谐波数量的增加 (基波的奇数倍), 信号越来越呈现出矩形形状。



傅里叶级数

电网中最常出现的非正弦量可表示为正弦信号 (基波和谐波) 的无穷和。

$$u = \sum_{k=1}^{\infty} U_k \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(k\omega t + \phi_{uk}) \quad i = \sum_{l=1}^{\infty} I_l \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(l\omega t + \phi_{il})$$

作为傅里叶级数的电流和电压非正弦量

$$\int_{-\pi}^{\pi} \cos(nx) \cdot \cos(kx) dx = 0 \text{ für } n \neq k \text{ und } \pi \text{ für } n = k$$

正交定理

正交定理表明, 当不同频率的正弦谐波分量相乘时, 一个周期内的积分等于零。只有电流和电压中都出现的频率才对有效功率有贡献。当在一个周期内相乘时, 这些值不为零。

对于瞬时功率, 这会产生三个和, 其中只有第一个和在一段时间内不等于零, 只有这个和才是有效功率。

$$p(t) = \sum_{l=k=1}^{\infty} U_k I_l \cdot \cos(\phi_{uk} - \phi_{il}) + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} U_k I_l \cdot \cos[(k+l)\omega t + \phi_{uk} + \phi_{il}] \\ + \underbrace{\sum_{k=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} U_k I_l \cdot \cos[(k-l)\omega t + \phi_{uk} - \phi_{il}]}_{k \neq l}$$

瞬时功率

$$\overline{P(t)} = \frac{1}{T} \int_{(N-1)T}^{NT} p(t) dt = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cdot \cos(\phi_{uk} - \phi_{ik})$$

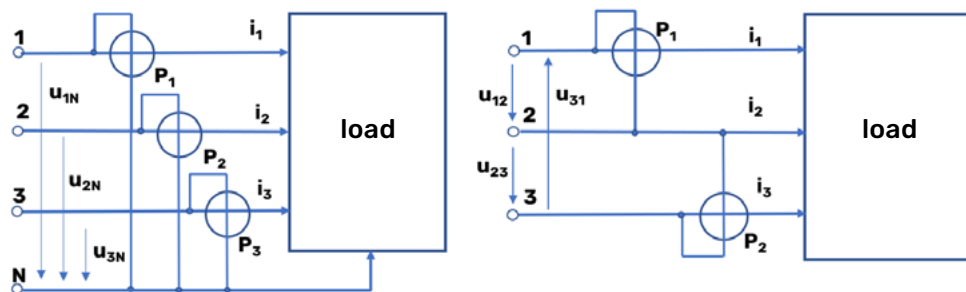
有效功率

计算三相系统的有效功率

在转换至三相系统时, 得到以下计算结果。可采用两种方法计算或测量有效功率。

多相系统的功率计算

在三相系统中, 根据中性导体是否携带电流, 采用三瓦计法或二瓦计法 (ARON 电路)。



三相系统中的三瓦计法或二瓦计法 (ARON 电路)。

首先, 三瓦计法:

$$P_{\Sigma}(t) = u_{1N}i_1 + u_{2N}i_2 + u_{3N}i_3$$

在这里, 三个星形连接线电压分别乘以它们的电流。

u_{1N} ; u_{2N} ; u_{3N} 相导体和星形点 (中性点) 之间的电压

其次, 二瓦计法 (ARON) :

$$P_{\Sigma}(t) = -u_{31}i_1 + u_{23}i_2$$

此时, 两相导体电压乘以两个电流。

u_{23} ; $-u_{31}$ 两相导体之间的电压

或一般

有效功率: $P_{\Sigma}(t) = \sum_{\mu=1}^{n-1} u_{\mu n} i_{\mu}$

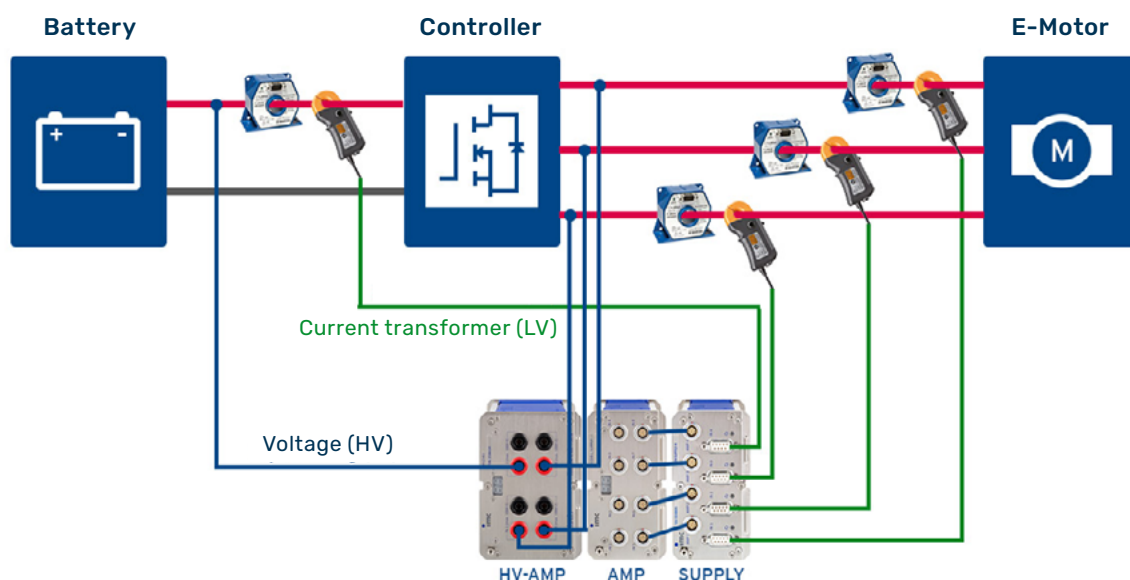
根据速度和极对数确定电机电压信号的基波, 牵引电机的基波约为 ≤ 2 kHz。

有效正弦波实际上通过开关脉冲形成, 由于该脉冲宽度调制的高频谐波, 电压带宽明显更高。脉冲宽度调制 (PWM) 脉冲基波通常高于 10 kHz, 并且由于方波斜度较大, 谐波含量可扩展到非常高的频率范围。另一方面, 由于电机电感对电流进行平滑化处理, 电流带宽明显更小。较低带宽的电流或电压对得到瞬时功率起到决定性作用。电流的动态与此相关, 因此, 可确定功率测量所需的带宽和采样率。

对于电池和转换器之间中间电路上的单相功率测量,情况则恰好相反。此时,电池如同一个大型电容器一样。这里电压的谐波含量较低,而电流的谐波含量较高。各辅助单元的回收、DC-DC转换器和功率转换器通常形成电流谐波含量。对于计算电功率所需的电压和电流,采样率或带宽如何正确选择,不能一概而论,但这通常取决于具体情况。然而,应当始终注意,在所涉及的电流和电压的测量量之间,具有较低带宽的测量量决定了有效功率的必要带宽。

确定电驱动系统性能所需的测量硬件

在我们的模型结构中, 采用以下测量组件来进行之前所述的测量任务: 可以看到用于电流测量的磁通门环形转换器和多通道测量系统, 例如: 带有HV2-2U2I测量模块的imc CRONOSflex, 可直接采集不超过1000Vrms的交流电压, 以及电流传感器信号的测量。各模块有两个高压输入和两个低压输入。磁通门传感器也需要电源, 在此通过imc CRONOSflex SEN-SUPPLY-4提供。



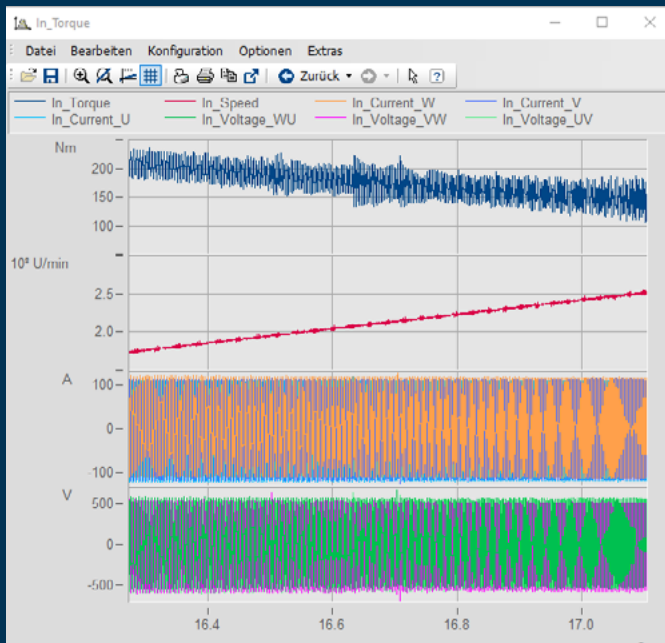
电驱动功率测量用硬件

测量数据评估:

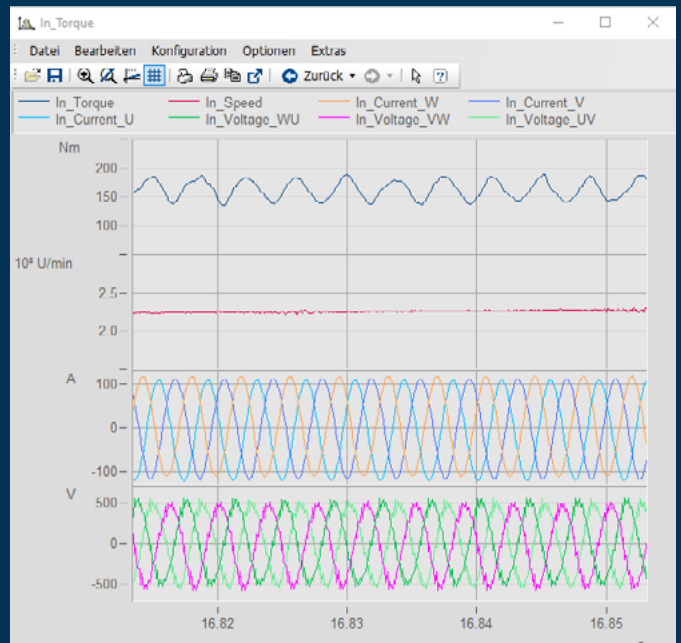
从原始数据至电机效率因数

利用强大数据分析软件 (例如: imc FAMOS) 的综合功能, 可以进一步处理采集到的测量数据并计算效率。

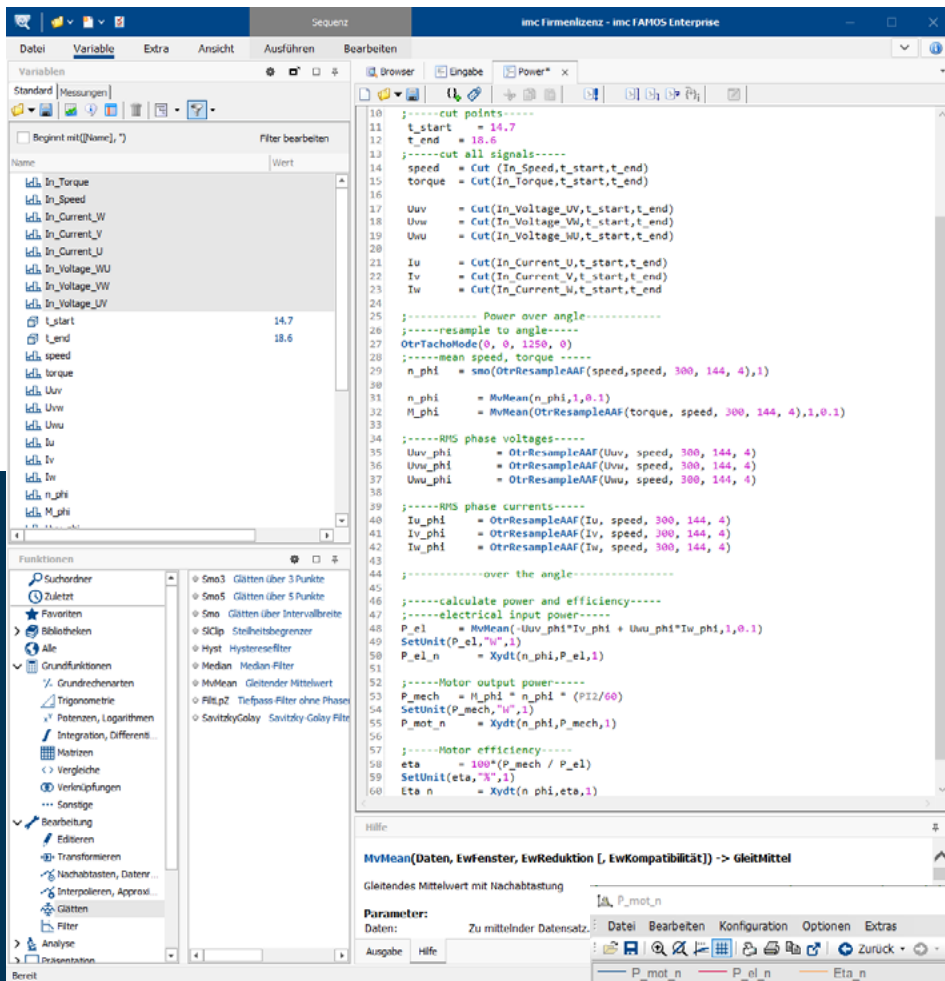
在计算效率时, 在将所有数据集从时域转换成角域之后, 将速度信号转换成旋转角度。利用机械旋转一周的一个窗宽来计算电功率的平均值。这与单极对电机一个周期的积分相对应, 即: 电气和机械旋转相同。



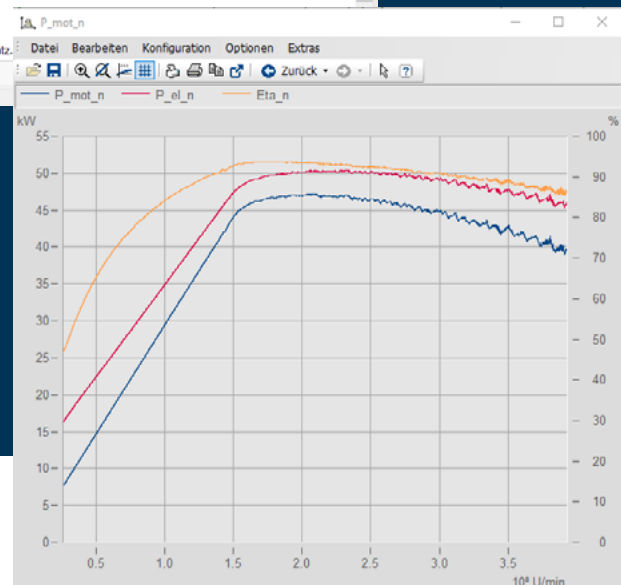
曲线窗口, 包含获取的扭矩、速度、电流和电压的原始数据。在我们的模型测试中, 三相永磁同步电机加载了一个从 0 加速到 4000 RPM 的负载机器。



曲线窗口, 涵盖40毫秒周期的详细信息。可清楚看到三相电流和电压及其纹波。由于PWM (采用脉冲宽度调制) 方案, 电压的谐波含量明显高于电流。此处可以看到, 通过模拟滤波, 实际由 PWM 脉冲波形 (方波幅度一致) 组成的电压曲线为正弦曲线。另一方面, 由于电机具有平滑的磁特性, 电流实际以低失真正弦波曲线存在。其频率基本通过转速确定。



数据分析软件imc FAMOS的功率数据评估



可计算出电功率和机械功率以及效率与速度的关系。

电机测试计量要求

在电动汽车、混合动力汽车和轻型混合动力汽车的驱动设计以及安全系统和车辆舒适部件方面,电机发挥了重要作用。在此对电子整流电机 (EC)、永磁电机或他励电机 (PSM或FSM)、异步电机 (ASM) 进行了区分。应优化使用所选电机,特别是在所需扭矩曲线下实现最高效率方面。在研发和生产期间,需应对各种各样的计量问题。另外,通过精准确定磁通量和电流之间的关系,可以优化电控单元 (ECU)。



电机绕组

应用实例：整个电驱动系统试验台

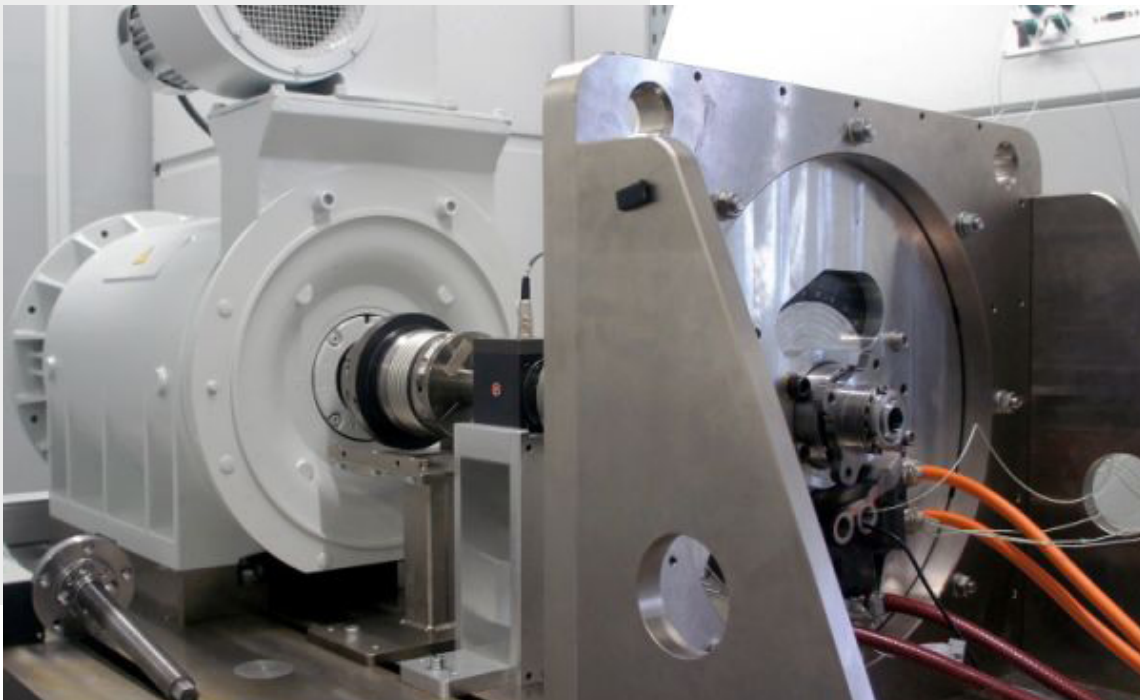
此款泛用型牵引电机试验台专为某研究所研制。该试验台由两台负载机组成，最大电机转矩为500 Nm (连续转矩) 和600 Nm (间歇转矩)，用于测试包括锂离子电池在内的整个电驱动系统。最大驱动速度为8000 rpm (无齿轮)。试验中，为电源转换器供电的电池模拟器具有120 kW的输出功率、 ± 600 A DC最大电流及高达1,000 V DC的电压。此外，试验台还包括CAN、CANopen和FLEXRay等车辆总线接口，用于HiL(硬件在环)控制仿真的实时数据采集，驱动器和能量供应的控制。电池测试在单独的防火试验箱中开展。该试验箱可根据危险等级(EUCAR Hazard Level 7)要求，测试高压电池组。温度调节范围为-40°C至+140°C，以便模拟定义的负载和老化条件。



imc Test & Measurement, 柏林

imc Test & Measurement——将基于模型的测试方法作为创始理念

1988年，imc Test & Measurement GmbH (简称“imc”) 在柏林工业大学成立，致力于基于模型的测试方法的相关研究。作为高效性测量和测试系统制造商和解决方案提供商，imc自那时以来一直为车辆技术、机械工程、铁路、航空和能源等领域用户提供测量技术解决方案。



用于电动机和电池的IFAM试验台

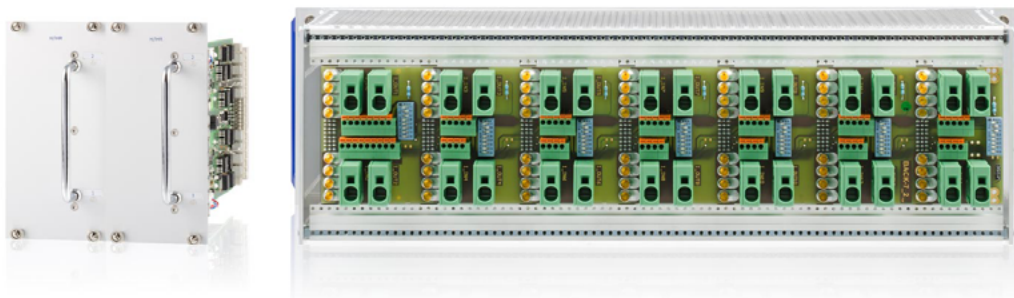
适用于能量流管理的宽量程电流测量

为提升电动汽车行驶里程, 关键因素不仅包括主牵引动力总成和高压电路单元。如今, 12 V或48 V汽车动力系统 (与传统内燃机系统一样) 中的“次级”部件和控制单元数量剧增, 使其能耗也显著增加。

因此, 这些系统的交互也很重要, 特别是对节能和休眠模式的实施、测试和优化而言。这需要准确了解所涉及设备的能耗情况, 尤其是ECU (简称电控单元)。现代汽车 (特别是电动汽车) 涉及复杂的相互作用和待机策略, 以便最大限度地减少静态电流, 进而降低整体能耗。

在实际测量中, 除了几nA范围内的静态电流外, 还必须测量通电启动时的浪涌和电流上升至50 A的满载阶段, 这些瞬态变化需在几毫秒内追踪、捕捉, 从而使得这些测量任务变得极具挑战性。

这正是为什么必须在完整、不间断的测量中记录复杂相互作用和先后顺序的原因。为此, 在电动车辆研发过程中对车辆电气系统开展全面的能量流评估, 对优化其续航里程至关重要。必须在极宽测量范围内测量和分析静态电流和工作电流, 并获取停机过程中的能量分布情况。如果要在不间断的持续测量期间通过自动范围调整 (“自动切换量程”) 来完成, 那么这种极端的高动态范围是一项重大的技术挑战, 尤其是在电流测量中。



imc CANSAS IHR 模块

imc基于CAN总线的宽范围电流测量模块

例如, 通过对50 nA至50 A范围内的电流分布开展高精度、不间断测量, 能够在一次连续测量中无缝记录和分析汽车部件、控制单元和次级系统如何在空闲状态 (“休眠模式”) 和工作状态间进行转换。

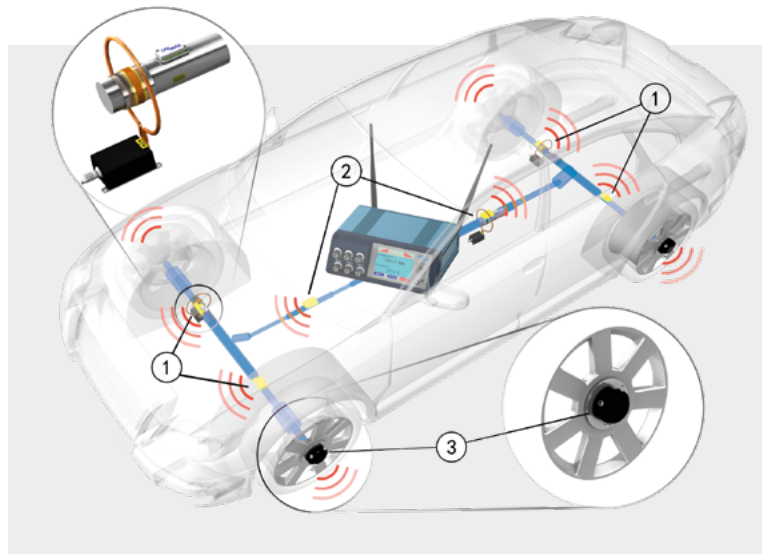
机械功率无线测量

电机效率由所提供的电功率和机械功率输出计算得出, 其决定了电动汽车的行使里程。

为记录试验台或道路测试中的机械功率, 有必要测量速度和相应施加与作用在车轴上的扭矩。然而, 受限于狭小空间或旋转轴, 往往无法使用传统固定式扭矩测量轴或相应的速度传感器, 特别是在车辆行驶中测量或实车测试情况下。这主要是因为无法将此类基于定子的传感器系统法兰或“集流环”接入传动系统中。

通过这套车用非接触式功率测量的创新系统, 无需额外的机械连接来检测旋转角度, 就能够非常精确地实时采集和处理此类参数, 而无需改变测试对象。

imc Dx遥测系统由传感器和发射器单元(Dx-SCT)组成, 通过两个半壳(特有外壳)直接安装在车轴上。它通过应变片获取扭矩, 并通过基于一体化的MEMS传感器采集速度信号。测量数据以遥测方式传输到车辆内的接收器单元(RCI)。



用于机械功率测量的测量点

这款通用型发射器模块可灵活应用, 在不同通道数量和传感器配置中实现无线测量。一台接收器可同时操作多达四台发射器, 因此能够同时记录车辆上所有四个输出轴的情况, 而无需额外的定子或参考点。

$$\text{Power } P = 2\pi \cdot n \cdot M$$

with RPM n and torque M

imc测试测量 中国

北京 | 上海 | 重庆

报价、一般查询: cnsales@imc-tm.com

订单查询: cnorder@imc-tm.com

技术、维修查询: cnsupport@imc-tm.com

www.imc-tm.cn

北京 西城区裕民路18号北环中心1110室 100029
上海 长宁区新华路728号华联发展大厦M10室 200052
重庆 渝北区赛迪路2号金山商业中心A座6楼 401122

010-6552 8700
021-5230 1156
023-8131 6242