

车网耦合下地铁轴承电压建模与影响因素分析

刘波

中铁武汉电气化局集团有限公司, 武汉 430061

摘要: 轴承电蚀已成为影响地铁安全运行的关键问题, 而轴承电压的准确计算与建模是研究电蚀机理的基础。本文针对地铁电机轴承和轴箱轴承电蚀问题, 建立了考虑牵引供电系统、牵引传动系统和接地系统的车网耦合轴承电压仿真模型。首先通过等效电路推导了轴承电压计算公式, 分析了各参数间的耦合关系; 其次在 Matlab/Simulink 平台搭建了包含外部电源、接触网、钢轨回流系统、牵引逆变器、电机内部耦合电容以及列车接地系统的综合仿真模型; 最后基于现场实测数据验证了模型的准确性。研究表明: 轴箱轴承电压主要受牵引电流、轴端接触电阻和接地方式影响, 电机轴承电压则与共模电压、齿轮润滑状态密切相关; 电机轴承电压对轴箱轴承电压影响微弱, 但对齿轮间电压影响显著。本文建立的模型可为轴承电蚀机理研究和抑制措施设计提供有效的仿真平台。

关键词: 轴承电压; 车网耦合; 牵引回流; 仿真建模

0 引言

轴承作为地铁的关键部件, 其服役状态直接影响列车运行的平稳性与安全性。近年来, 因轴承电蚀损伤导致列车故障的案例日益增多, 据统计电蚀故障占轴承故障的比例达 30% 以上。轴承电蚀不仅威胁行车安全, 频繁更换轴承也造成运营成本显著增加。轴承电蚀发生的必要条件是轴承内外圈存在电压差且有电流流过轴承, 因此研究轴承电压的分布规律及影响因素具有重要意义。

在地铁列车中, 轴承电蚀可分为电机轴承电蚀和轴箱轴承电蚀两类。电机轴承电压主要源于牵引逆变器产生的共模电压, 通过电机内部寄生电容耦合至转轴; 轴箱轴承电压则与牵引回流在接地系统中的分布密切相关。现有研究多将二者独立分析, 缺乏对车网耦合环境下两类轴承电压相互关系的系统研究。

本文基于列车实际结构, 推导了轴承电压的计算公式, 建立了涵盖牵引供电系统、牵引传动系统和接地系统的综合仿真模型。通过模型研究了不同参数对轴承电压的影响规律, 并利用现场实测数据验证了模型的准确性, 为后续轴承电蚀机理分析和抑制技术研究奠定基础。

1 轴承电压计算方法与耦合关系

1.1 轴承电压等效电路

根据地铁列车牵引传动系统和接地系统的结构, 建立轴承电压等效电路如图 1 所示。电路中包含两个主要激励源: 逆变器共模电压 V_{com} 和牵引电流 I_q 。

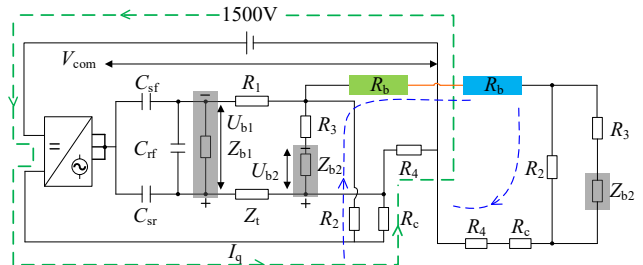


图1 轴承电压等效电路图

图中, C_{sf} 为电机定子绕组与机壳之间的耦合电容, C_{sr} 为定子绕组与转子之间的耦合电容, C_{rf} 为电机转子与机壳之间的耦合电容, Z_{b1} 电机轴承等效阻抗, R_1 为电机外壳与转向架之间的软连线电阻, Z_t 为大小齿轮之间的等效阻抗, R_b 为车体电阻, R_3 为转向架与轴箱体之间的电阻, R_2 为转向架到轴端接地装置间的电阻, R_c 为轴端接触电阻, R_4 为轴端对钢轨电阻。 V_{com} 为逆变器输出共模电压, U_{b1} 为电机轴承电压、 U_{b2} 为轴箱轴承电压。绿色虚线为牵引电流 I_q 主要路径, 蓝色虚线为经由动车保护接地线流入车

体的电流路径。

根据叠加定理,分别计算共模电压和牵引电流单独作用下的轴承电压。共模电压单独作用时,电机轴承电压可表示为:

$$U_{b1} = \left(\frac{Z_1 + Z_{eqa}}{Z_{sf} + Z_1 + Z_{eqa}} - \frac{Z_t}{Z_{sr} + Z_t} \right) U_c$$

式中, U_c 表示区域 c 两端电压, U_a 表示区域 a 两端电压, Z_{eqa} 表示区域 a 的等效阻抗。牵引电流单独作用时,轴箱轴承电压表达式为:

$$U_{b2} = \frac{I_q Z_4 Z_{b2}}{Z_3 + Z_{b2} + Z_2 + Z_4}$$

1.2 轴承电压耦合关系分析

由等效电路推导可知,电机轴承电压与轴箱轴承电压之间存在耦合关系,但耦合程度受多种因素影响。当齿轮润滑状态良好时,齿轮间阻抗 Z_t 呈容性,此时电机轴承电压较高,而与轴箱轴承电压的比例系数较小;当齿轮润滑不良时, Z_t 呈阻性,电机轴承电压显著降低。

轴箱轴承电压主要受牵引电流 I_q 、轴端接触电阻 R_c 和接地系统参数影响。对于拖车,轴箱轴承电压表达式为:

$$U_{b2} = \frac{U_a Z_{b2}}{Z_3 + Z_{b2}}$$

式中, I_c 流入拖车的电流。可见,除轴承自身阻抗外,拖车轴箱轴承电压与流入拖车的电流及接地系统阻抗密切相关。

2 车网耦合轴承电压仿真模型

2.1 牵引供电系统建模

牵引供电系统模型包括外部电源、牵引变电所和牵引网三部分。外部电源采用 110 kV 三相电源,经变压器降压后由整流机组输出 DC 1500 V 电压。为模拟地铁实际供电质量,采用等效 24 脉波整流电路,由两套 12 脉波整流机组构成。

接触网单位长度电阻取 0.1418 Ω /km,电感取 2.6526 mH/km。钢轨回流系统采用 π 型等效模型,

钢轨纵向电阻取 40 m Ω /km,等效电感 1.79 mH/km,钢轨对地过渡电阻 R_g 取 15 Ω /km。相邻牵引变电所站间距离设置为 4 km。

2.2 牵引传动系统建模

牵引传动系统采用直交传动方式,逆变器选用通用桥模型,开关频率设置为 450 Hz,输出频率 86 Hz。主电路参数为:滤波电感 5.2 mH,滤波电容 4.3 mF,制动电阻 3.2 Ω 。

牵引电机选用 YPQ-200 型三相异步电动机,额定电压 AC 1100 V,额定频率 86 Hz,定子绕组星形连接。为精确反映轴电压分布,采用分布参数模型模拟电机内部耦合电容网络。电机参数设置如下:定子绕组电感 46 μ H,电阻 0.15 Ω ;定子绕组对转子电容 68pF;定子绕组对机壳电容 9095pF;轴承电容 180 pF。

2.3 列车接地系统建模

列车模型以车体、转向架、轮对、钢轨为框架,包含牵引电机、电机轴承、齿轮传动装置、轴箱轴承及轴端接地装置等部件。模型将机械结构转化为等效电气网络:车体电阻 R_c 取 47m Ω ,软连线电阻 R_r 取 0.002 Ω ,车体到转向架电阻 R_{cz} 取 0.02 Ω ,轴端接触电阻 R_{jc} 取 0.01 Ω ,轴端对地电阻 R_{zd} 取 0.025 Ω ,油膜电阻 R_y 取 1.2 Ω 。

通过改变模型中连接线位置和参数大小,可模拟不同保护接地方式、轴承润滑状态和钢轨回流系统工况。模型内置轴承电流测量模块,实现对各轴承电流的实时监测与汇总。

3 轴承电压影响因素分析

3.1 接地方式对轴承电压的影响

对比直接接地和串联电阻接地两种保护接地方式下的轴承电压分布。对于拖车,由于仅在轴端 1 设有接地装置,不同转向架上的轴承电压差异显著:转向架 1 因保护接地线连接,对地电压较高,轴承电压较大;转向架 2 无直接接地,轴承电压较小。串联电阻接地使拖车轴承电压升高,而动车轴承电压降低,这与保护接地线电流方向有关。

3.2 运行工况对轴承电压的影响

轴箱轴承电压与牵引电流呈正相关关系。牵引电流 2000 A 时轴承电压显著高于 1000 A 时；惰行工况（牵引电流 0 A）下轴承电压降至 0.5 V 左右。牵引工况下，轴箱轴承电压一般在 1~6 V 范围内变化。

电机轴承电压主要受共模电压影响，模型中 DC 1500 V 网压下，电机轴承电压幅值约 70 V，与青岛四方车辆厂实测的 80 V 左右数据接近。

3.3 轨道回流系统的影响

轨道回流不畅（钢轨纵向电阻增大）或区间多车运行时，钢轨电位升高，导致轴端电位升高，轴箱轴承电压减小。双边供电改为单边供电后，钢轨回流分布改变，轴承电压亦呈减小趋势。

3.4 轴端接地装置接触电阻的影响

轴端接地装置接触电阻对轴箱轴承电压影响显著。接触电阻从 0.3m Ω （轴向式）增大至 3.5m Ω （径向式）甚至 15~20m Ω （磨损严重）时，轴承电压相应增大。对于不设保护接地线的拖车转向架，接触电阻增大时轴承电压接近油膜最小击穿电压（约 6.5~10 V），电蚀风险显著增加。

3.5 齿轮润滑状态对电机轴承电压的影响

齿轮润滑状态对电机轴承电压影响显著。齿轮润滑良好时（阻抗呈容性），电机轴承电压幅值约 70V；齿轮润滑不良时（阻抗呈阻性），轴承电压降至 5V 左右。电机外壳接地状况仅在齿轮润滑不良时对轴承电压产生较大影响。

3.6 轴承电压间的相互影响

电机轴承电压对轴箱轴承电压影响微弱。改变接触网电压（同时调整电机阻抗保持牵引电流不变），电机轴承电压变化时轴箱轴承电压基本保持不变。但电机轴承电压对齿轮间电压影响显著：齿轮润滑良好时，齿轮间电压与电机轴承电压幅值相近，可能导致齿轮油膜击穿。

4 结语

本文围绕地铁列车轴承电压的计算与建模问题，

建立了车网耦合环境下的综合仿真模型，主要结论如下：轴箱轴承电压主要受牵引电流、接地方式和轴端接触电阻影响，正常工况下电压范围为 1~6V，极端工况下可达 10V 左右；电机轴承电压主要受共模电压和齿轮润滑状态影响，正常工况下约 70V，齿轮润滑不良时降至 5V 左右。

本文建立的仿真模型为轴承电蚀机理研究和抑制措施设计提供了有效平台。后续可基于该模型开展新型接地方式优化、接地环效果评估等研究，为地铁列车轴承电蚀问题提供系统的解决方案。

参考文献

- [1] Liu S, Lv J, Jiang S, et al. Correlation between shaft voltage characteristics, electrical discharge behavior and surface damage of motor bearing in EV bench tests[J]. *Wear*, 2025, 582: 206344.
- [2] Li Z, Liu R, Zhang L, et al. Modelling of high frequency bearing voltage for dual-winding permanent magnet synchronous generators[J]. *IET Electric Power Applications*, 2024, 18(4): 400-412.
- [3] Jia L, Liu R, Li Z, et al. Modelling and suppression of bearing voltage of wind turbine permanent magnet synchronous generators[J]. *IET Electric Power Applications*, 2024, 18(4): 436-445.
- [4] Liu R, Li J, Sang B, et al. 基于电磁场数值计算的变频供电感应电机耦合电容与轴电压的分析[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(14): 161-169.
- [5] Muetze A, Binder A. Calculation of motor capacitances for prediction of the voltage across the bearings in machines of inverter-based drive systems[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2007, 43(3): 665-672.