

高速行驶工况下纯电动汽车电力系统失稳边界预测*

张国宗¹ 陈星² 周军超¹

(1. 四川轻化工大学, 自贡 644002; 2. 重庆文理学院, 重庆 402160)

【摘要】针对纯电动汽车电力系统在高频变载荷条件下易发生母线电压振荡失稳的问题, 建立整车电力系统各部分的小信号模型, 获得了系统源-变换器的输出阻抗与电机负载的输入阻抗, 在传统阻抗比判据基础上, 结合系统的稳定裕度, 推导了整车电力系统稳定性判定规则, 并利用伯德图进行了系统失稳预测研究, 探究高速工况下纯电动汽车的电力系统失稳边界。仿真验证结果表明, 轮毂电机在额定转矩下工作时, 整车的最高车速不应超过 188 km/h, 且轮毂电机的转矩变化会影响车辆稳定性, 单个轮毂电机转矩突变不应超过 220 N·m, 与理论分析结果基本一致, 证明了该稳定性判定规则可在一定程度上预测整车电力系统失稳边界。

关键词: 整车电力系统 小信号模型 阻抗比 失稳预测 失稳边界

中图分类号: U461.6*1 文献标志码: A DOI: 10.20104/j.cnki.1674-6546.20240082

Electrical System Instability Boundary Prediction of A Pure Electric Vehicle under High-Speed Conditions

Zhang Guozong¹, Chen Xing², Zhou Junchao¹

(1. Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 644002; 2. Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160)

【Abstract】Under high-frequency variable loads, EV electrical system is prone to causing bus voltage oscillations and instability. A small-signal model of the vehicle's electrical system has been established, obtaining the output impedance of the system source-transformer and the input impedance of the motor load. Based on the traditional impedance ratio criterion and combined with the system's stability margin, the stability determination principle of the vehicle's electrical system has been derived. By using a Bode diagram for predicting system instability, research is conducted to explore the instability boundary of pure electric vehicle under high-speed conditions. The simulation verification results show that the vehicle's maximum speed shall not exceed 188 km/h, and torque variation of hub motor will affect vehicle stability, the torque mutation of single hub motor shall not exceed 220 N·m, which is basically consistent with theoretical analysis results. The results prove that this stability determination principle can predict instability boundary of vehicle electrical system to some extent.

Key words: Vehicle electrical system, Small signal model, Impedance ratio, Instability prediction, Instability boundary

【引用格式】张国宗, 陈星, 周军超. 高速行驶工况下纯电动汽车电力系统失稳边界预测[J]. 汽车工程师, 2024(10): 23-30.

ZHANG G Z, CHEN X, ZHOU J C. Electrical System Instability Boundary Prediction of A Pure Electric Vehicle under High-Speed Conditions[J]. Automotive Engineer, 2024(10): 23-30.

1 前言

新能源汽车的整车电力系统正不断向高度电气化

的方向发展^[1-3], 其具有以下特点: 变流器绝缘栅双极型晶体管(Insulate-Gate Bipolar Transistor, IGBT)高频通断使得系统呈现强非线性, 容易出现发散、震颤、混沌

*基金项目: 重庆市教委科学研究重点项目(R2021SZ01); 四川轻化工大学研究生创新基金项目(Y2023028)。

和分岔等不稳定现象,影响母线电流的质量^[4-7];由于车载电力系统只能工作在“离网”模式,负荷容量与电源容量具有可比性,其启动和卸载均会对系统的动态特性产生显著影响,使系统呈现出“弱惯性”^[3,8-9];系统在启动、变速、负载扰动状态下,能量的瞬变使得母线电压极易发生高频振荡,对电子元件造成冲击,使系统瞬态性能下降、转换效率降低,严重时会引起车载电力系统失稳,进而引发灾难性后果^[10-13]。

因此,电力系统稳定性研究不可忽视。文献[14]基于系统的大信号模型,采用混合势函数法,分析了部分控制参数对系统稳定性的影响。文献[15]使用数据采样法,通过判断线性矩阵特征根是否在复平面的单位圆内来判断系统的稳定性。文献[16]基于系统的一般表达式,提出了一种电力系统大扰动下暂态电压的时变特征分析方法,利用雅可比(Jacobian)矩阵评价系统的稳定性特征。这些方法均在一定程度上保证了系统的稳定性,但计算较为复杂,缺乏直观性。对于整车电力系统,要提升复杂工况下的稳定性,必须开展系统的稳定性研究,确定其失稳边界。

本文以某纯电动汽车为研究对象,建立系统的线性化模型,求得动力电池-变流器、超级电容的输出阻抗,以及整流器-轮毂电机的输入阻抗,基于扇形禁区^[17],结合系统的稳定裕度,推导车载电力系统的稳定性判断规则,并利用伯德图分析车速、驱动电机转矩对系统稳定性的影响,获得系统的理论失稳边界。最后,通过仿真验证理论分析的合理性。

2 整车电力系统小信号模型的建立

本文所研究的纯电动汽车动力系统拓扑结构如图1所示,主要由动力电池、双向DC/DC变换器、超级电容、直流电网、电机驱动器、4套轮毂电机构成。在进行稳定性分析时,可以将整车视为分布式电源系统,其拓扑结构可等效为“源+变换器+负载”。研究整车电力系统的小信号稳定性,必须建立准确的模型。

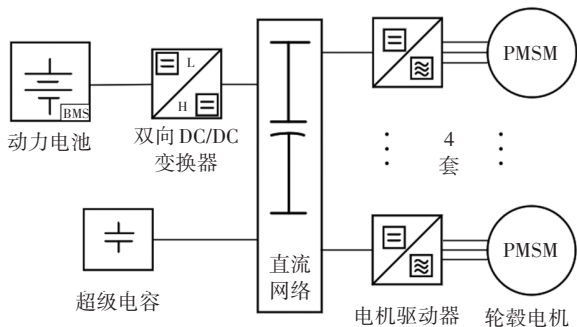


图1 某纯电动汽车动力系统拓扑结构

2.1 双向DC/DC变换器的小信号建模

在进行整车建模时,合适的变换器模型至关重要。纯电动汽车高速行驶时,双向DC/DC变换器工作在升压模式下。考虑变换器的二极管、电感、电容、开关管等寄生参数对系统的影响,变换器模型采用非理想开环模型,其拓扑结构如图2所示^[18]。其中, u_{bat} 为动力电池瞬态输出电压, u_{bus} 为母线瞬态电压, i_{bus} 为母线瞬态电流, G_1 、 G_2 为双向变换器的2个开关管, r_{ds1} 、 r_{ds2} 分别为开关管 G_1 、 G_2 的导通电阻, r_L 为电感 L 的寄生电阻, r_{cs} 为电容 C_s 的寄生电阻, V_{ref} 为母线参考电压。

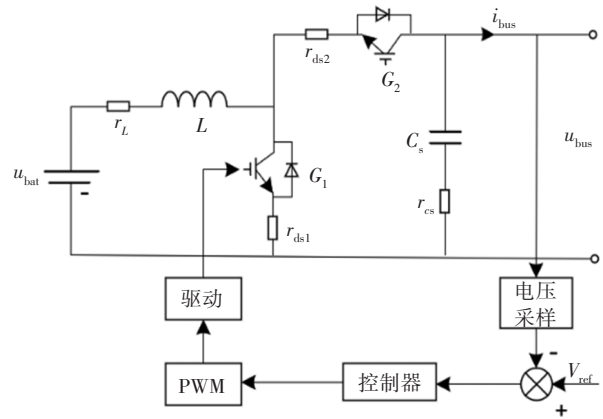


图2 双向DC/DC变换器拓扑结构

在阻抗分析法中,常使用二端口网络中的 G 参数(逆混合参数)表示DC/DC变换器的小信号模型^[19]。双向DC/DC变换器可等效为如图3所示的 G 参数模型,其中, \hat{i}_{in} 为输入电流扰动、 \hat{u}_{in} 为输入电压扰动、 \hat{i}_o 为输出电流扰动、 \hat{u}_o 为输出电压扰动。由此,变换器的闭环 G 参数小信号模型可表示为:

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_{in} \\ \hat{u}_o \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} \hat{u}_{in} \\ \hat{i}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{in} & T_{in} \\ G_{io} & -Z_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}_{in} \\ \hat{i}_o \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $Y_{in} = \left. \frac{\hat{i}_{in}}{\hat{u}_{in}} \right|_{\hat{i}_o=0}$ 为闭环输入导纳,即闭环输入阻抗

的倒数; $T_{in} = \left. \frac{\hat{i}_{in}}{\hat{i}_o} \right|_{\hat{u}_{in}=0}$ 为闭环电流反向传递函数,表示

输出电流扰动到输入电流扰动的传递函数; $G_{io} = \left. \frac{\hat{u}_o}{\hat{u}_{in}} \right|_{\hat{i}_o=0}$ 为闭环输入到输出的传递函数,表示输入电

压扰动到输出电压扰动的传递函数; $Z_o = \left. \frac{\hat{u}_o}{\hat{i}_o} \right|_{\hat{u}_{in}=0}$ 为

闭环输出阻抗。

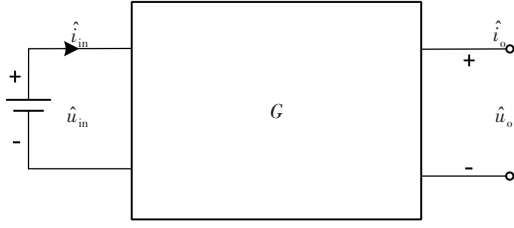


图3 G参数模型

变流器输入扰动到输出扰动的闭环传递函数如图4所示,其中, $G_{(v)}$ 为电压采样传递函数, $G_{(c)}$ 为控制器的传递函数, $G_{(a)}$ 为脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)模块的传递函数, $G_{(co)}$ 为占空比扰动到输出电压扰动的传递函数, $G_{(ci)}$ 为占空比扰动到输入电流扰动的传递函数,设母线参考电压 V_{ref} 的扰动量 $\hat{V}_{ref}=0$ 。

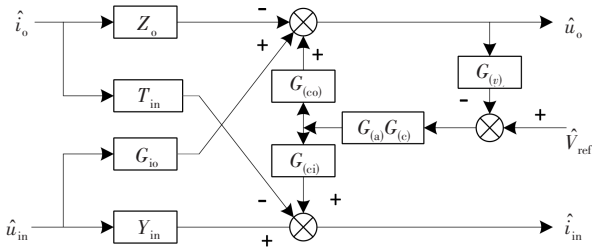


图4 扰动输入到输出的传递函数

则其闭环输出阻抗为:

$$Z_{o-o} = \frac{Z_{o-o}}{1 + G_{(v)}G_{(c)}G_{(a)}G_{(co)}} \quad (2)$$

其中:

$$Z_{o-o} = \frac{\hat{u}_o}{\hat{i}_o} = \frac{[r_L + Dr_{ds1} + (1-D)r_{ds2} + D(1-D)r_{cs} + sL](1 + sr_{cs}C_s)}{LC_s s^2 + C[r_L + Dr_{ds1} + (1-D)(r_{ds2} + r_{cs})]s + (1-D)^2} \quad (3)$$

$$G_{(co)} = \frac{\hat{u}_o}{\hat{d}} = \frac{[(1-D)(U_{bus} + u_{bat} + u_D) - (r_L + r_{ds1} + (1-D)^2 r_{cs})I_L - LI_L s(1 + r_{cs}Cs)]}{LC_s^2 + C(r_L + Dr_{ds1} + (1-D)(r_{ds2} + r_{cs}))s + (1-D)^2} \quad (4)$$

式中: Z_{o-o} 为开环输出阻抗, D 为稳态时开关管的占空比, s 为频域, $I_L = I_{bus}/(1-D)$ 为稳态电感电流, U_{bus} 为稳态母线电压, I_{bus} 为稳态母线电流, \hat{d} 为占空比扰动, u_D 为开关管导通电压。

2.2 超级电容小信号模型

超级电容在新能源汽车的动力系统中发挥着能量回收、平滑电力的重要作用,其拓扑结构如图5所示^[21]。其中, R_a 、 R_b 、 u_c 、 u_o 、 i_c 分别为超级电容的串联电阻、并联电阻、电容电压、输出电压、输出电流。

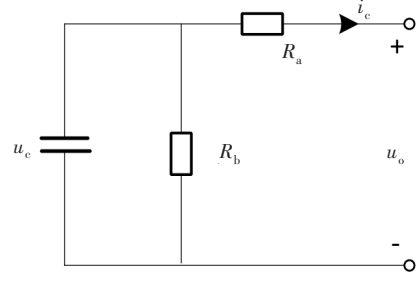


图5 超级电容电路拓扑结构

由图5可得到超级电容的状态方程为:

$$\begin{cases} u_c = u_o + i_c R_a \\ -\frac{Cdu_c}{dt} = \frac{u_c}{R_b} + i_c \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)进行拉普拉斯变换,可得到其线性化小信号模型,从而求得超级电容输出阻抗的表达式为:

$$Z_{oc} = \frac{\hat{u}_o}{\hat{i}_c} = -\left(\frac{R_b}{R_b Cs + 1} + R_a\right) \quad (6)$$

式中: C 为超级电容的电容值, \hat{u}_o 为超级电容输出电压扰动, \hat{i}_c 为超级电容输出电流扰动。

2.3 驱动器-驱动电机系统小信号模型

在电动汽车中,驱动电机普遍采用永磁同步电机。相较于传统感应电机,永磁同步电机不仅具有高功率、高效率的优点,还能起到能量回收的作用。其控制方式采用矢量控制,控制框图如图6所示^[21],其中 i_a 、 i_b 、 i_c 为三相电流, L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感, i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流, Ψ_f 为电机磁链, w_c 为电角度, n 为电机转速, n_{ref} 为参考转速, P_n 为电机极对数。

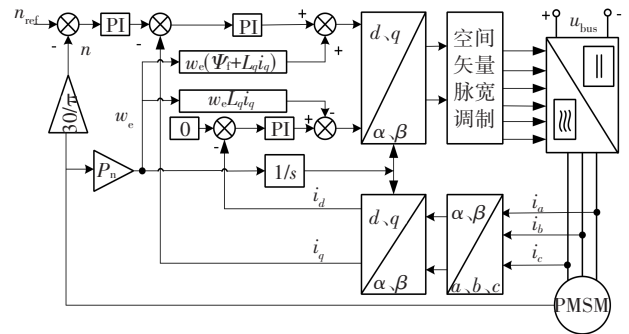


图6 永磁同步电机矢量控制系统框图

假设系统能量守恒,忽略驱动器功率损耗和电机热损耗,有:

$$u_{bus}(t)i_{bus}(t) = T(t)w(t) \quad (7)$$

式中: $u_{bus}(t)$ 为 t 时刻瞬态母线电压, $i_{bus}(t)$ 为 t 时刻瞬态母线电流, $T(t)$ 、 $w(t)$ 分别为 t 时刻电机的瞬态转矩和转速。

在稳态工作点($I_{bus}, U_{bus}, T_m, w_m$)附近加入扰动(T_m, w_m 分别为电机的稳态转矩与转速),去掉高阶项可得驱动器-驱动电机的线性化模型^[22]:

$$\frac{\hat{i}_{bus}}{\hat{u}_{bus}} = \frac{w_m}{U_{bus}} \cdot \frac{\hat{T}}{\hat{u}_{bus}} - \frac{T_m w_m}{U_{bus}^2} + \frac{T_m}{U_{bus}} \cdot \frac{\hat{w}}{\hat{u}_{bus}} \quad (8)$$

式中: \hat{T} 为电机转矩扰动, \hat{w} 为电机转速扰动, \hat{u}_{bus} 为母线电压扰动, \hat{i}_{bus} 为母线电流扰动。

设转矩扰动 $\hat{T} = 0$,可得电机的输入导纳为:

$$Y = \frac{\hat{i}_{bus}}{\hat{u}_{bus}} \approx \frac{T_m}{U_{bus}} \cdot \frac{\hat{w}}{\hat{u}_{bus}} - \frac{T_m w_m}{U_{bus}^2} \quad (9)$$

驱动系统小信号框图如图7所示,其中, K 为比例系数, V_f 为载波幅值, P_n, R, φ_f, J, L 分别为电机的极对数、内阻、反电势、转动惯量、电感, f_i, f_v 分别为控制器电流环和电压环的传递函数。

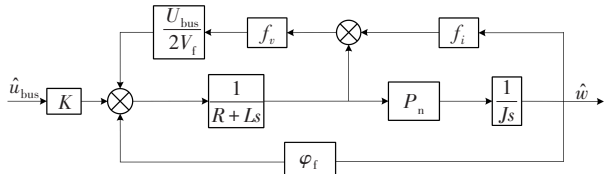


图7 驱动系统小信号框图

根据图7可以求得母线电压与电机转速的传递函数 h 为:

$$h = \frac{\hat{w}}{\hat{u}_{bus}} = \frac{P_1}{1 - L_1 - L_2 - L_3} \quad (10)$$

式中: $P_1 = \frac{KP_n}{(R+Ls)}$, $L_1 = -\frac{U_{bus} f_v}{2V_f (R+Ls)}$, $L_2 = -\frac{P_n U_{bus} f_v f_i}{2\varphi_f (R+Ls)Js}$, $L_3 = \frac{P_n \varphi_f}{(R+Ls)Js}$ 。

结合式(9)、式(10),驱动系统的输入导纳为:

$$Y = \frac{T_m}{U_{bus}} h - \frac{T_m w_m}{U_{bus}^2} \quad (11)$$

3 稳定性判定规则的推导

系统小信号稳定性分析中常采用阻抗法和李雅普诺夫(Lyapunov)间接法。工程上,对于车载电力系统这种变流器较多的系统,常采用阻抗分析法。根据不同的应用场合,研究人员提出了多种阻抗比判据,传统的阻抗比判据,如米氏(Middlebrook)判据、增益裕量和相位裕量(Gain Margin and Phase Margin, GMPM)判据、Opposing Argument判据、最大峰值标准(Maximum Peak Criteria, MPC)判据等,均存在各种局限性。针对负载阻抗设计时圆禁区在伯德图上难以计算的问题,李安寿提出了扇形禁区^[17],该判据无保守性,可从任

意端口判定系统的稳定性。

在此基础上,结合系统6 dB的幅值裕度需求和30°的相位裕度需求,本文设计的禁区范围在极坐标上的表示如图8所示。图中存在实轴禁区和扇形禁区,扇形禁区包含圆形禁区,由两段圆弧和两条线段组成。圆弧的圆心为原点,半径分别为 $(1-r)$ 和 $(1+r)$ 。线段与实轴的夹角分别为 $(180^\circ - \gamma)$ 和 $(180^\circ + \gamma)$ 。其中,幅值裕度 $r=0.5$,相位裕度 $\gamma=30^\circ$ 。

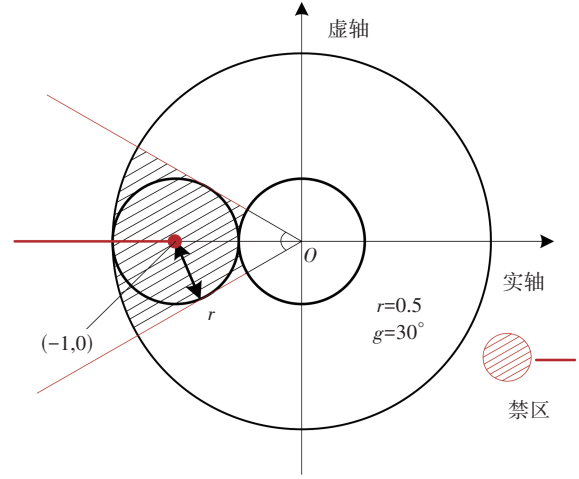


图8 实轴禁区与扇形禁区

在极坐标上,扇形禁区可描述为:

$$\begin{cases} 1-r \leq |Z_o/Z_{in}| \leq 1+r \\ (2k+1) \times 180^\circ - \gamma \leq \angle Z_o - \angle Z_{in} \leq (2k+1) \times 180^\circ + \gamma \end{cases} \quad (12)$$

在伯德图上,扇形禁区、实轴禁区可分别描述为:

$$\begin{cases} 20 \lg(1-r) \leq |Z_o| - |Z_{in}| \leq 20 \lg(1+r) \\ (2k+1) \times 180^\circ - \gamma \leq \angle Z_o - \angle Z_{in} \leq (2k+1) \times 180^\circ + \gamma \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} |Z_o| \geq |Z_{in}| \\ \angle Z_o - \angle Z_{in} = (2k+1) \times 180^\circ, k=0, \pm 1, \dots \end{cases} \quad (14)$$

式中: Z_o 为微源子系统的输出阻抗, Z_{in} 为负载子系统的输入阻抗。

由此可得禁区范围在伯德图上如图9所示。由图9可得,若已知微源子系统的输出阻抗,系统稳定性判定规则可以描述为:

a. 在 $|Z_{in}| > |Z_o| + 20 \lg(1+r)$ 的频率段,对 $\angle Z_{in}$ 无要求;

b. 在 $|Z_{in}| < |Z_o| + 20 \lg(1-r)$ 的频率段, $\angle Z_{in}$ 不能穿过线 $\angle Z_o + (2k+1) \times 180^\circ (k=0, \pm 1, \dots)$;

c. 在 $|Z_o| + 20 \lg(1-r) < |Z_{in}| < |Z_o| + 20 \lg(1+r)$ 的频率段, $\angle Z_{in}$ 不能穿过由 $\angle Z_o + (2k+1) \times 180^\circ \pm \gamma$ 围成的禁区。

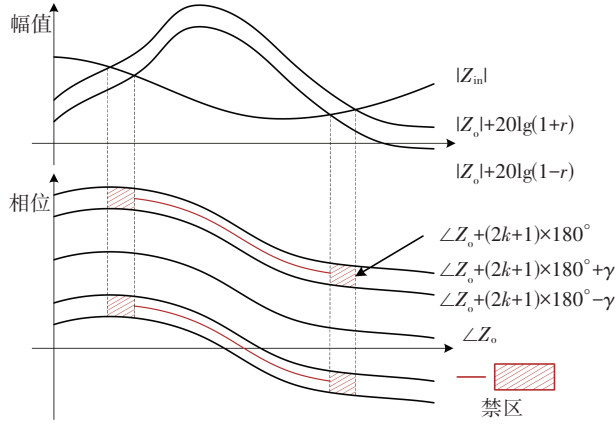


图9 系统稳定性判定规则

针对整车电力系统这类“多源多负载”模型,文献[23]给出的阻抗比判据如下:

若阻抗比

$$T_{m,1} = \frac{Z_{o,1}}{Z'_{in,1}} \quad (15)$$

$$T_{m,2} = \frac{Z_{o,2}}{Z'_{in,2}} \quad (16)$$

均满足稳定判定规则,整个系统稳定。

式中: $Z_{o,1}$ 、 $Z_{o,2}$ 分别为动力电池-双向DC/DC变换器和超级电容的输出阻抗, $Z'_{in,1} = 1/\left(\frac{1}{Z_{o,2}} + \sum_{i=1}^4 \frac{1}{Z_{in,i}}\right)$, $Z'_{in,2} = 1/\left(\frac{1}{Z_{o,1}} + \sum_{i=1}^4 \frac{1}{Z_{in,i}}\right)$, $Z_{in,i}$ 为第*i*组驱动器-轮毂电机的输入阻抗。

4 失稳预测分析

纯电动汽车的负载具有非线性,其电气特性随着工况的变化而变化,对整车电网产生多方面影响。车速和载荷的变化会引起电网瞬时波动,一旦变化过大,可能导致供电电压的波动超出正常范围,引起电网失稳。根据整车电力系统的特点,本文从车速和电机转矩两个方面进行系统失稳预测分析。本文所研究车辆电力系统的部分参数如表1所示。

表1 某纯电动汽车电力系统部分参数

参数	数值
稳态母线电压 U_{bus}/V	600
DC/DC变换器滤波电感 L/H	0.006
DC/DC变换器支撑电容 C_s/F	0.005
驱动电机磁链 Ψ_f/Wb	0.1
驱动电机极对数 P_n	4
驱动电机转动惯量 J	0.003
驱动电机额定转速 $r \cdot \min^{-1}$	1 000
驱动电机额定扭矩 $N \cdot m$	100

为分析单个轮毂电机的输出转矩对系统稳定性的影响规律,保持车速不变,以电机转矩作为唯一变量,将电机转矩由 $80 N \cdot m$ 逐渐增大到 $220 N \cdot m$,增长幅度为 $20 N \cdot m$,结果如图10所示。

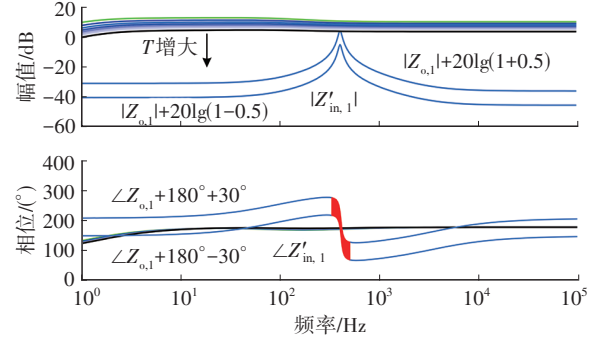
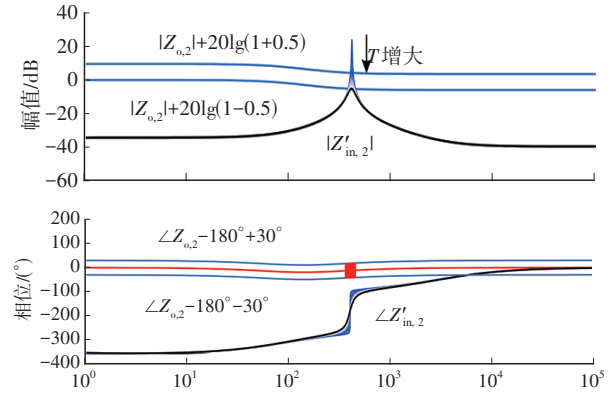
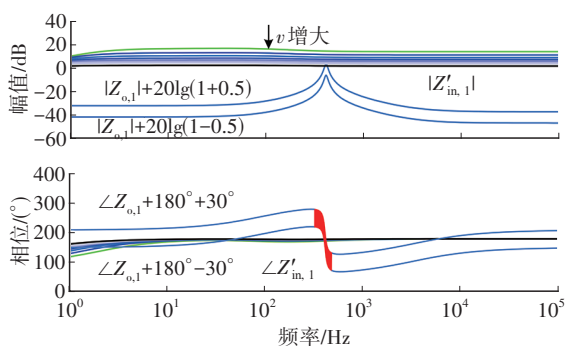

 (a) $Z_{o,1}$ 与 $Z'_{in,1}$ 伯德图

 (b) $Z_{o,2}$ 与 $Z'_{in,2}$ 伯德图

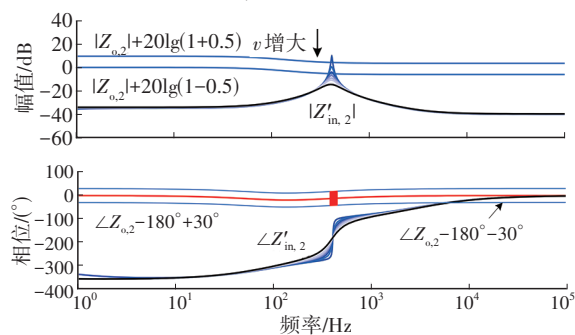
图10 驱动电机转矩T对系统稳定性的影响

从图10a中可以看出:动力电池-双向DC/DC变换器输出阻抗的幅值在700 Hz处存在峰值;伴随着 T 增大, $|Z'_{in,1}|$ 在相同频率下的幅值逐渐减小,在 $220 N \cdot m$ 时穿过峰值进入 $(|Z_{o,1}|+20\lg(1+0.5), |Z_{o,1}|+20\lg(1-0.5))$ 的区域;由于 $\angle Z'_{in,1}$ 始终穿过 $\angle Z_{o,1}+180^\circ \pm 30^\circ$ 的区域,所以在单个电机的转矩达到 $220 N \cdot m$ 时, $T_{m,1}$ 失稳。图10b中,随着转矩的逐渐增大,在相同频率下, $|Z'_{in,2}|$ 的幅值逐渐减小,但变化不明显,相应的相位变化也不显著, $\angle Z'_{in,2}$ 一直未穿过禁区,表明 $T_{m,2}$ 保持稳定。根据前文推导的稳定性判断规则, $T_{m,1}$ 与 $T_{m,2}$ 同时稳定时系统才稳定,由此可得随着负载转矩的增大,系统稳定性变差。为了保证足够的稳定裕度,单个驱动电机的理论最大允许转矩为 $220 N \cdot m$ 。

为分析车速 v 对系统稳定性的影响,保持整车载荷不变,以车速 v 为唯一变量,由 50 km/h 逐渐提高到 188 km/h ,结果如图11所示。



(a) $Z_{o,1}$ 与 $Z'_{in,1}$ 伯德图



(b) $Z_{o,2}$ 与 $Z'_{in,2}$ 伯德图

图 11 车速 v 对系统稳定性的影响

对比图 11 和图 10 可知,电机转矩和车速对系统稳定性的影响在伯德图上的变化规律大致相同。图 11a 中,随着车速 v 的提高,在相同频率下, $|Z'_{in,1}|$ 的幅值逐渐减小,当车速提高到 188 km/h 时, $|Z'_{in,1}|$ 进入 $(|Z_{o,1}|+20lg(1+0.5), |Z_{o,1}|+20lg(1-0.5))$ 的幅值区域, $\angle Z'_{in,1}$ 穿过 $\angle Z_{o,1}+180^\circ \pm 30^\circ$ 相位禁区, $T_{m,1}$ 失稳。图 11b 中,随着车速 v 的提高,在相同频率下, $|Z'_{in,2}|$ 的幅值减小,除 700 Hz 处峰值变化较为明显,其他频率段变化不突出,相应的相位禁区变化也不大, $\angle Z'_{in,2}$ 一直未穿过相位禁区,表明 $T_{m,2}$ 稳定。综上可得:随着车速的提高,系统稳定性变差,为了保证足够的稳定裕度,车速不能超过 188 km/h。

5 仿真验证

为验证预测分析结果的正确性,搭建整车动力学模型及其控制系统模型,模拟车辆在高速行驶工况以及不同载荷下的行驶状态。

图 12 所示为将驱动电机转矩 T 分别增大至 70 N·m、140 N·m、210 N·m、230 N·m 时母线电压的波形图。从图 12 中可以看出:随着电机转矩 T 的增大,母线电压的振荡幅度也增大;电机转矩小于 210 N·m 时,母线电压均能稳定维持在 600 V;扭矩 T 增大到 230 N·m 时,母线电压急剧增大,系统失稳。仿真结果与前文理论分析结果基本相同。

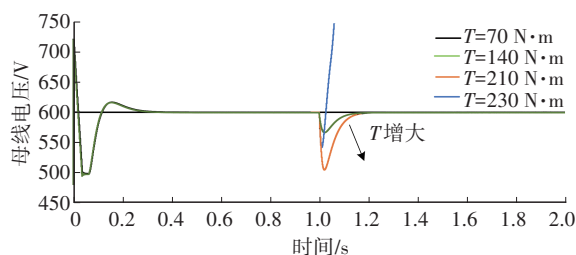


图 12 驱动电机转矩 T 对系统稳定性的影响仿真结果

图 13 所示为系统稳定时,将车速 v 分别提升至 50 km/h、100 km/h、188 km/h、200 km/h 时母线电压仿真波形图。从图 13 中可知:当车速由 50 km/h 逐渐提高到 188 km/h 时,母线电压在跌落后均能迅速回升稳定;当车速提高到 200 km/h 时,母线电压跌落至 500 V,虽然能够回升至 600 V 稳态母线电压,但系统稳定性变差。仿真结果与理论分析结果基本一致。

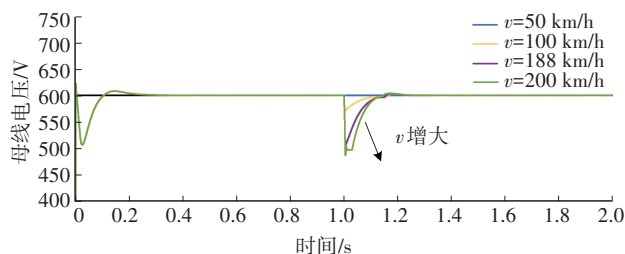


图 13 车速 v 对系统稳定性的影响仿真结果

6 结束语

本文以某纯电动汽车为例,基于阻抗分析法,建立了整车电力系统各部分的小信号模型,通过伯德图直观分析了驱动电机转矩、车速对系统稳定性的影响,确定了理论失稳边界,并通过仿真验证了理论分析的合理性,研究结果表明:

- 车辆行驶时,驱动电机转矩的变化会影响整车电力系统的稳定性,导致母线电压出现波动,一旦超过系统的限度,将会导致系统失稳。针对本文研究的驱动电机,转矩突变不能超过 220 N·m。
- 车速的变化会影响整车电力系统的稳定性,车速提高会导致母线电压波动,速度变化幅度过大会引起母线电压跌落,难以维持稳定。针对在本文研究的驱动电机,车辆的最高速度不应超过 188 km/h。
- 提出的整车电力系统稳定性判定规则合理,能够有效确定系统的失稳边界。

参考文献

[1] ZHANG J, QIN Y P, DUO H Q. The Development Trend of China's Natural Gas Consumption: A Forecasting Viewpoint Based on Grey Forecasting Model[J]. Energy Reports, 2021,

- 7: 4308-4324.
- [2] 马晓军, 袁东, 项宇, 等. 陆战平台综合电力系统及其关键技术研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(2): 396-406.
MA X J, YUAN D, XIANG Y, et al. Research on Integrated Power System and Its Key Technologies for Land War Platform[J]. Acta Oramentologica Sinica, 2017, 38(2): 396-406.
- [3] ANSELMA P G, HUO Y, ROELEVELD J, et al. Rapid Optimal Design of a Multimode Power Split Hybrid Electric Vehicle Transmission[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2019, 233(3): 740-762.
- [4] 翟丽, 杨霜洁, 胡桂兴, 等. 电动汽车电机驱动系统传导电磁干扰建模[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(8): 824-833.
ZHAI L, YANG S J, HU G X, et al. Modeling of Conducted Electromagnetic Interference in Electric Vehicle Motor Drive System[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(8): 824-833.
- [5] KREIN P T, BASS R M. Types of Instability Encountered in Simple Power Electronic Circuits: Unboundedness, Chattering, and Chaos[C]// Fifth Annual Proceedings on Applied Power Electronics Conference & Exposition. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 1990.
- [6] TSE C, BERNARDO M D. Complex Behaviour in Switching Power Converters[J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(5): 768-781.
- [7] DEANE J, HAMILL D C. Instability, Subharmonics, and Chaos in Power Electronic Systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1990, 5(3): 260-268.
- [8] 丁先威, 赵建华, 计晨, 等. 船舶综合电力系统抗冲击性能研究现状[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(1): 37-40.
DING X W, ZHAO J H, JI C, et al. Research Status of Shock Resistance of Ship Integrated Power System[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(1): 37-40.
- [9] KARIMPOUR D, SALMASI F R. Stability Analysis of AC Microgrids with Constant Power Loads Based on Popov's Absolute Stability Criterion[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems II: Express Briefs, 2015, 62(7): 696-700.
- [10] 孟志远, 徐海亮, 刘春震. 脉冲功率负荷接入下电网的稳定性研究现状与展望[J]. 电气工程学报, 2022, 17(1): 2-14.
MENG Z Y, XU H L, LIU C Z. Research Status and Prospect of Microgrid Stability under Pulse Power Load Access[J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(1): 2-14.
- [11] 马添翼, 金新民, 黄杏. 含多变流器的微电网建模与稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 12-17.
MA T Y, JIN X M, HUANG X. Containing More Than the Micro Grid Modeling and Analyzing the Stability of the Converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 12-17.
- [12] FU J T, SONG S Z, FU Z M, et al. Design of Coordinated Control Strategy During Driving Mode Switching for Parallel Hybrid Electric Vehicles[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2019, 41(9): 2507-2520.
- [13] YU X R, LIN Z, KE G, et al. A Survey on Low Frequency Oscillation Damping Control in Power System Integrated with New Energy Power Generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6278-6290.
- [14] 高强, 袁东, 刘春光, 等. 车载综合电力系统大信号失稳预测[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 143-148.
GAO Q, YUAN D, LIU C G, et al. Large Signal Instability Prediction for Vehicle-Mounted Integrated Power System [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(12): 143-148.
- [15] 钱超. 电动汽车驱动系统干扰抑制策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
QIAN C. Research on Interference Suppression Strategy of Electric Vehicle Drive System[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [16] 王川. 负荷冲击型大扰动下船舶综合电网暂态电压稳定性研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
WANG C. Study on Transient Voltage Stability of Ship Integrated Power Network under Large Disturbance of Load Impact[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012.
- [17] 李安寿. 分布式电源系统稳定性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
LI A S. Research on Stability of Distributed Power Supply System[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [18] 刘芳, 李研, 朱永平, 等. DC-DC变换器拓扑族归一化分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 9362-9374.
LIU F, LI Y, ZHU Y P. et al. Topological Family Normalization Analysis Method for DC-DC Converters[J]. Transactions of the CSEE, 2023, 43(23): 9362-9374.
- [19] SUNTIO T. Dynamic Profile of Switched-Mode Converter: Modeling, Analysis and Control[M]. Berlin, Germany: Wiley-VCH, 2009.
- [20] 张希, 米春亭. 车辆能量管理: 建模、控制与优化[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
ZHANG X, MI C T. Vehicle Energy Management:

- Modeling, Control and Optimization[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [21] 袁雷. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
- YUAN L. Modern Permanent Magnet Synchronous Motor Control Principles and MATLAB Simulation[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2016.
- [22] 高强, 廖自力, 袁东, 等. 车载综合电力系统关键参数对系统稳定性的影响[J]. 兵工学报, 2020, 41(9): 1727-1735.
- GAO Q, LIAO Z L, YUAN D, et al. The Influence of Key Parameters of Vehicle Integrated Power System on System Stability[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(9): 1727-1735.
- [23] TRAN D, ZHOU H H, KHAMBADKONE A M. A Simple Design of DC Power System with Multiple Source-Side Converters to Operate Stably Underconstant Power Load [C]// The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Hefei, China: IEEE, 2010.
- (责任编辑 斛 畔)
- 修改稿收到日期为2024年4月23日。

《汽车工程师》自动驾驶汽车测试技术专刊征稿通知

随着人工智能、无线通信、高性能计算等新一代信息技术的不断发展与加速应用,自动驾驶汽车已成为当前全球汽车与交通领域深度融合发展的重要载体,当前全球范围内均在加速推进自动驾驶关键技术研究及产业化工作。科学、完善的测试评价是保证自动驾驶汽车整车与零部件的安全性、可靠性、稳定性的关键环节,是自动驾驶技术规模化落地应用的必要前提。然而,由于自动驾驶已成为“人-车-环境-任务”强耦合的复杂系统,其测试评价的难度与复杂度显著增加,测试成本高、周期长、覆盖度低、可信性不足、缺乏完善工具链等已成为自动驾驶汽车测试领域面临的关键难题。

为此,《汽车工程师》特推出“自动驾驶汽车测试技术”专刊,并邀请长安大学王润民老师担任客座主编,欢迎全国高校、科研院所和企事业单位研究团队踊跃投稿。

一、征稿主题(包括但不限于以下主题)

1. 自动驾驶测试评价理论与方法
2. 自动驾驶虚拟仿真测试技术
3. 自动驾驶 HiL/ViL 测试技术
4. 自动驾驶场地及道路测试技术
5. 基于数字孪生的自动驾驶测试技术
6. 车联网与车路协同测评技术
7. 自动驾驶功能安全与预期功能安全
8. 自动驾驶测试装备

二、投稿须知

1. 请登录 www.tjgc.cbpt.cnki.net 在线投稿。
2. 论文具体要求见本刊主页“下载中心”栏目《作者指南》,投稿时请在系统内稿件基本信息的中文标题前增加“【自动驾驶汽车测试技术专刊】”字样。
3. 投稿截止日期为2024年12月15日。
4. 论文录用并完成编辑加工后即在中国知网进行网络首发,纸质期刊预计出版时间为2025年5月15日。

三、特邀客座主编



王润民 高级工程师

工学博士,硕士研究生导师,长安大学智能网联汽车测试实验室主任,《汽车工程师》青年编委会委员。

长期从事智能车路协同关键技术及应用、智能网联汽车测试评价技术等领域的研究工作。先后主持国家自然科学基金重点项目课题、陕西省“两链”融合新能源与智能汽车重点专项、浙江省重点研发计划项目等各类纵向、横向科研课题10项,参与国家重点研发计划项目、国家自然科学基金项目等各类国家级、省部级项目20余项。曾获得国家教学成果奖一等奖1项,省部级科技奖励二等奖1项。

《汽车工程师》编辑部