

弓网离线对高速列车牵引电机输出转矩的影响研究

王赛 杨中平 林飞

(北京交通大学 电气工程学院 北京 100044)

摘要:随着现代高速列车运行速度的不断提高,弓网离线对列车牵引传动系统性能的影响日益严重,受流质量成为影响高速列车运行的重要因素,因此研究弓网离线对牵引传动系统的影响尤其是对牵引电机输出转矩的影响显得越来越重要。本文在对弓网离线和牵引传动系统进行简化的基础上,建立了分析离线过程中逆变器直流侧电压和电机转矩变化的数学模型,初步分析了不同车速下发生离线后的转矩变化规律,并通过仿真模型进行了验证,为进一步研究弓网离线对列车牵引性能的影响奠定了基础。

关键词:弓网离线 牵引变流器 瞬态电流控制 矢量控制 CRH2 动车组

1 引言

高速铁路是当今世界铁路发展的主题,高性能的牵引传动系统不仅是高速铁路的核心技术之一,更是衡量一个国家铁路发展水平的重要标志。近年来我国高速铁路技术取得了一系列突飞猛进的发展,最高运行时速从 250km/h 提高到了 350km/h,但与此同时也因车速提高而遇到了一些问题,如弓网离线、气动激励、轮轨黏着等等^[1]。

高速列车通过受电弓和接触网接触获得电能,受电弓在接触线上的滑行运动过程中由于接触线的不平顺、接触网震动、受电弓弓头震动、轨道的不平顺等原因,会产生受电弓与接触网分离的现象(弓网离线)^[2]。弓网离线直接影响高速列车的受流质量,使变流器支撑电容电压下降,甚至导致电机电流不连续,严重影响牵引电机转矩的输出^[3]。而且随着车辆运行速度越来越高,这种现象也越来越明显。因此,研究弓网离线时高速列车牵引传动系统的特性具有重要的理论意义和应用价值。

本文以 CRH2 型动车组为研究对象,在介绍 CRH2 型动车组牵引传动系统组成及其控制策略的基础上,利用 matlab/simulink 搭建仿真模型,对高速列车在弓网离线条件下的响应特性进行了理论分析和仿真研究。

2 CRH2 型动车组牵引传动系统结构及控制策略

2.1 牵引传动系统主电路

CRH2 型动车组为 4 动 4 拖编组,包含两个牵引单元,分别由一套受电弓、一台变压器以及两台 AC-DC-AC 变流器组成,每台变流器同时驱动 4 台电机,全车共有 16 台牵引电机^[4]。其基本结构如图 1 所示:

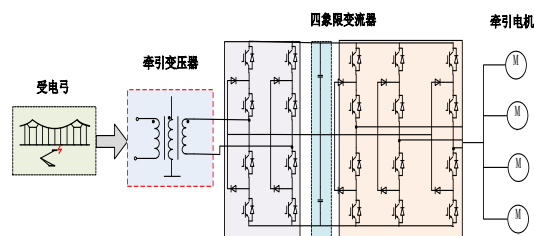


图 1 牵引传动系统结构图

2.2 牵引变流器控制策略

(1)CRH2 型动车组牵引用脉冲整流器采用瞬态电流控制策略,其控制框图如图 2 所示,控制系统主要包括瞬态电流控制算法、电压和电流采样、SPWM 控制算法^[5-7]。

其数学表达式为:

$$\begin{cases} I_{N1} = K_p(U_d^* - U_d) + 1/T_i \int (U_d^* - U_d) dt \\ I_{N2} = I_d U_d / U_N \\ I_N^* = I_{N1} + I_{N2} \\ u_{ab}(t) = u_N(t) - \omega L_N I_N^* \cos \omega t - G_2 [I_N^* \sin \omega t - i_N(t)] \end{cases} \quad (1)$$

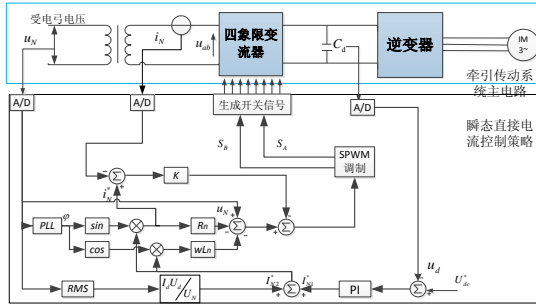


图2 瞬态电流控制原理图

(2)CRH2 型动车组牵引电机采用高性能的间接转子磁场定向矢量控制策略，PWM 调制策略为空间矢量 PWM(SVPWM)^[8-10]。其控制框图如图 3 所示。

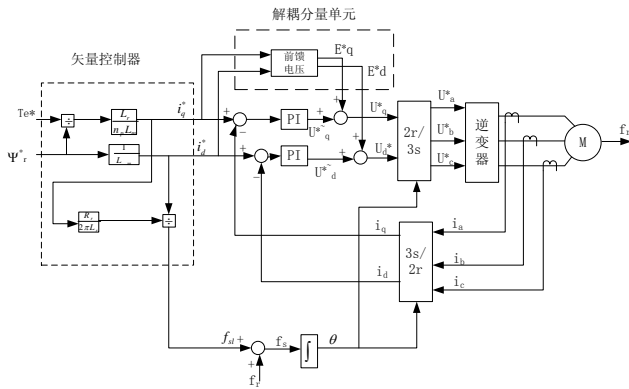


图3 间接矢量控制原理图

其中 dq 轴给定电流、转差频率以及前馈电压的计算表达式如下：

$$\begin{cases} i_{qs}^* = \frac{T_e^* L_r}{n_p L_m \Psi_r^*} \\ i_{ds}^* = \frac{\Psi_r^*}{L_m} \\ f_{sl} = \frac{T_e^* R_r}{2\pi n_p \Psi_r^{*2}} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} E_{ds}^* = R_s i_{ds}^* - \omega_s \delta L_s i_{qs}^* \\ E_{qs}^* = R_s i_{qs}^* + \omega_s L_s i_{ds}^* \end{cases} \quad (3)$$

3 弓网离线的理论分析

本研究将单次弓网离线的过程简化为完全离线和恢复阶段两个过程，即忽略弓网分离和结合瞬间可能出现的电弧现象，不考虑电弧燃烧过程中的能量传递，认为受电弓处的电压在弓网分离后瞬间变为开路状态，在弓网恢复接触后电压马上加到受电弓上。下面首先研究牵引工况时完全离线后牵引传动系统的响应特性。

3.1 完全离线后的响应特性分析

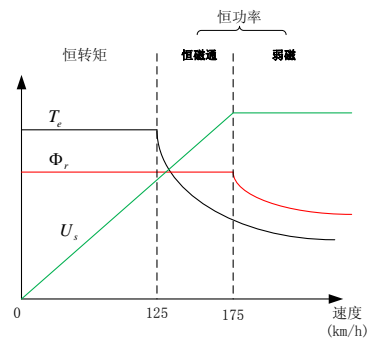


图4 转矩、磁通、定子电压与车速的关系曲线

CRH2 型动车组的给定牵引转矩、给定磁通与车速的关系如图 4 所示。125km/h 以下为恒转矩区，125km/h~175km/h 为恒功率恒磁通区，175km/h 以下逆变器输出采用 PWM 调制方式，电机电压和频率成正比，175km/h 以上为恒功率弱磁区，给定电压矢量达到直流母线电压最大值，需要降低电机励磁水平，此时调制模式转为单脉波方式^[11-12]。下面分析在这三个区间内完全离线对直流母线电压和电机输出转矩的影响。

在计算完全离线后的支撑电容电压和牵引力的变化时，主要基于以下两个公式和两个假设条件：

假设条件：

a 方波工况时忽略定子漏磁阻抗压降，认为 $U_s \approx E_s$ ；

b 电容电压下降过程中，由于列车等效的转动惯量非常大，牵引转矩的下降对电机转速的影响可以忽略，故认为电机转速几乎不变，并且由车速决定的负载转矩也几乎不变；

基本公式：

a 方波工况时的转矩表达式：

$$T_e = \frac{mn_p}{2\pi R_r} \left(\frac{U_s}{f_s} \right)^2 f_{sl} = \frac{mn_p}{\pi^3 R_r} \left(\frac{U_d}{f_s} \right)^2 f_{sl} \quad (4)$$

在 175km/h 以下发生离线后(PWM 调制阶段), 支撑电容电压开始下降, 但是仍可以维持当前转矩一段时间, 本文将从离线开始到转矩开始下降这段时间定义为转矩维持时间; 当支撑电容电压继续下降, 逆变器调制度为 1, 此时进入方波工况, 结合假设条件 1 转矩可以由上式表达, 此时若仍处于离线状态, 则直流电压的下降会导致转矩下降, 从转矩开始下降到最终为零的时间定义为转矩下降时间。

b 离线后的功率平衡关系

$$-CU_d \frac{dU_d}{dt} = T_e(2\pi f_s) \quad (5)$$

上式表示离线后, 电机的输出功率由支撑电容提供, 可以反应电容电压和转矩之间的关系。下面分别讨论在三个不同速度区间发生离线后牵引传动系统的响应特性。

3.1.1 恒转矩区

(1) 维持时间

由功率平衡关系和机械运动方程:

$$\begin{cases} -CU_d \frac{dU_d}{dt} = T_e(2\pi f_s) / n_p \\ T_e - T_l = \frac{2\pi J}{n_p} \frac{df_r}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

考虑到 $U_d \frac{dU_d}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dU_d^2}{dt}$ 并利用假设 b 认为负载转矩不变, 解得:

$$U_d^2 = \frac{1}{2} A t^2 + C_0 t + C_1 \quad (8)$$

其中 $A = \frac{2T_e}{CJ}(T_l - T_e)$, $C_0 = U_d^2|_{t=0}$, $C_1 = -\frac{4\pi T_l f_s}{n_p C} \Big|_{t=0}$ 。

在此阶段虽然支撑电压由于离线而下降, 但是电机转矩仍维持恒转矩。下面计算维持恒转矩状态的时间 t 。

考虑到前馈电压是稳态时维持电机当前运行状态时需要的电压, 而逆变器能提供的最大基波电压是方波时的电压 ($2/\pi U_d$), 所以可以认为若此电压大于前馈电压, 逆变器调制系数小于 1, 可以维持恒转矩。于是通过求解下式可以得到维持恒转矩状态的时间:

$$\begin{cases} E_{ds} = R_s i_{ds}^* - \omega_s \delta L_s i_{qs}^* \\ E_{qs} = R_s i_{qs}^* + \omega_s L_s i_{ds}^* \\ \sqrt{\frac{2}{3}(E_{ds}^2 + E_{qs}^2)} = \frac{2}{\pi} U_d \end{cases} \quad (8)$$

(2) 下降时间

当直流电压进一步下降, 进入方波工况, 由基本公式得:

$$\begin{cases} T_e = \frac{mn_p}{2\pi R_r} \left(\frac{U_s}{f_s} \right)^2 f_{sl} \stackrel{U_s = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_d}{=} \frac{mn_p f_{sl}}{\pi^3 R_r} \frac{U_d^2}{f_s^2} = A \frac{U_d^2}{(f_r + f_{sl})^2} \\ T_e - T_l = \frac{2\pi J}{n_p} \frac{df_r}{dt} \\ -CU_d \frac{dU_d}{dt} = 2\pi T_e (f_r + f_{sl}) / n_p \end{cases} \quad (9)$$

再利用假设条件, 化简得到:

$$\begin{cases} T_e = A U_d^2 \\ -CU_d \frac{dU_d}{dt} = 2\pi T_e f_s / n_p \end{cases} \quad (10)$$

解得:

$$U_d = C_2 e^{\frac{-2\pi f_s A t}{n_p C}} \quad (11)$$

$$T_e = A C_2^2 e^{\frac{-2\pi f_s A t}{n_p C}} \quad (12)$$

其中, $A_1 = \frac{mn_p f_{sl}}{\pi^3 R_r f_s^2}$, $C_2 = U_d|_{t=0}$

3.1.2 恒功率恒磁通区

(1) 维持时间

在这一区间, 转矩指令和转差频率均与转速成反比, 磁通指令不变, 即

由基本公式可得:

$$\begin{cases} -CU_d \frac{dU_d}{dt} = 2\pi \frac{T_{em}}{f_r} (f_r + \frac{f_{slm}}{f_r}) / n_p \\ \frac{T_{em}}{f_r} - T_l = \frac{2\pi J}{n_p} \frac{df_r}{dt} \end{cases} \quad (13)$$

结合假设条件可得:

$$U_d = \sqrt{A_2 t + C_0} \quad (14)$$

其中, $A_2 = -\frac{4\pi T_{em}}{C} \frac{f_r + \frac{f_{slm}}{f_r}}{f_r} / n_p$ 。

维持时间的计算方法与 3.1.1 中的方法相同。

(2) 下降时间

由基本公式得:

$$\begin{cases} T_e = \frac{mn_p f_{slm}}{\pi^3 R_r f_r} \frac{U_d^2}{(f_r + \frac{f_{slm}}{f_r})^2} \\ T_e - T_l = \frac{2\pi J}{n_p} \frac{df_r}{dt} \\ -CU_d \frac{dU_d}{dt} = 2\pi T_e (f_r + \frac{f_{slm}}{f_r}) / n_p \end{cases} \quad (15)$$

解得:

$$U_d = C_2 e^{-\frac{C_3}{C} \int \frac{1}{f_r^2(t)/f_{slm} + 1} dt} \quad (16)$$

其中, $C_3 = \frac{2m}{\pi^2 R_r}$ 。

将电压表达式代入(15)得转矩表达式。

3.1.3 恒功率弱磁区

此区间内转矩和磁通指令均与转速成反比, 转差频率与转速成正比, 因为这一区间逆变器调制系数已经为 1, 也就是方波工况, 所以若在这一区间发生弓网离线电机转矩不存在维持时间。

由基本公式得:

$$\begin{cases} T_e = \frac{mn_p}{2\pi R_r} \left(\frac{U_s}{f_s}\right)^2 f_{sl} = \frac{mn_p}{\pi^3 R_r} \frac{K_1}{(1+K_1)^2} \frac{U_d^2}{f_r} \\ -CU_d \frac{dU_d}{dt} = 2\pi T_e (f_r + K_1 f_r) / n_p = KU_d^2 \end{cases} \quad (17)$$

其中, $K_1 = \frac{R_r}{2\pi n_p} \frac{T_{em}}{\Psi_m^2}$, $K = \frac{2m}{\pi^3 R_r} \frac{K_1}{K_1 + 1}$ 。

解得:

$$U_d = C_0 e^{-\frac{K}{C} t} \quad (18)$$

将电压表达式代入(17)得转矩表达式。

3.2 恢复供电后的响应特性分析

由于恢复供电时四象限整流器的工作特性比较复杂, 本文参考仿真结果将四象限整流器等效为一个直流电压源和一个一阶 RC 电路, 如图 5 所示, 而恢复供电的过程可以等效为一阶 RC 电路的全响应问题。

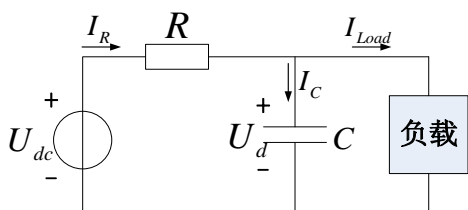


图 5 正常受流时四象限整流器等效电路

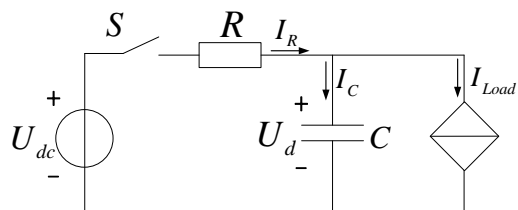


图 6 弓网恢复接触时四象限整流器等效电路

将受电弓和接触网的恢复接触过程等效为图 6 中的开关 S 的闭合, 将电机等效为受控电流源, 受控源的控制量随完全离线过程中转矩下降的程度而有所不同。求解上述电路的全响应即可得到恢复供电后牵引传动系统的响应特性。下面分两种情况给出具体分析。

3.2.1 在离线过程中转矩保持不变

若完全离线时间小于维持时间, 即离线过程中转矩保持不变, 则负载功率可以表达为:

$$P_{Load} = T_e \omega_s / n_p = const \quad (19)$$

参照图 3-3 中所示电路, 负载侧可等效为一个压控电流源:

$$I_L = P_{Load} / U_d \quad (20)$$

由电路理论, 按照三要素公式可解得:

$$U_d(t) = U_{dc} + (U_{d0} - U_{dc}) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (21)$$

其中, U_{d0} 为恢复时刻电容的初始电压, 时间常数 $\tau = RC$, U_{dc} 为直流电压源的大小 ($f(\infty) \approx U_{dc}$, 当 $U_{dc}^2 \gg 4RP_{Load}$ 时)。

3.2.2 在离线过程中转矩下降

若离线时间大于维持时间, 则转矩在离线期间会下降, 本文设定当转矩值下降到零时, 恢复供电时转矩指令值从零按一定斜率上升, 且 PI 调节器置零, 这样电机功率从零开始上升, 不用考虑负载的影响; 当电机转矩未下降到零, 恢复时转矩指令值保持离线时刻的值不变, PI 调节器也没有复位, 则转矩和负载功率可以表示为:

$$T_e = K_2 U_d^2 \quad (22)$$

$$P_{Load} = T_e \omega_s / n_p = \frac{K_2 \omega_s}{n_p} U_d^2 \quad (23)$$

注意到负载功率的表达式与 3.2.1 中不同。这样负载仍可以表示为一个压控电流源:

$$I_L = P_{Load} / U_d = \frac{K_2 \omega_s}{n_p} U_d \quad (24)$$

按三要素公式解得的电容电压与 3.2.1 中的形式是一致的：

$$U_d(t) = U_{dc} + (U_{d0} - U_{dc})e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (25)$$

其中， $f(\infty) \approx U_{dc}$ 的近似条件是 $K_2 \omega_s R / n_p \ll 1$ 。

解出恢复供电的 U_d 后，带入(22)得恢复阶段电机转矩的表达式。

4 弓网离线的仿真和理论计算对比及分析

4.1 恢复供电后的响应特性分析

本文基于 Matlab/Simulink 软件搭建了高速列车牵引传动系统的仿真模型，如图 7 所示：

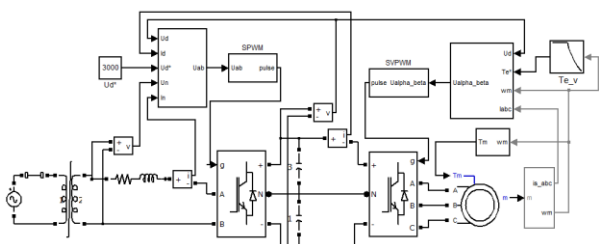


图 7 CRH2 牵引传动系统仿真模型

列车由静止开始启动，0.5s 前直流环节充电，转矩从 0.5s 后按一定斜率上升到指令值，仿真条件采用 CRH2 型车的实际牵引特性曲线(十级)和基本阻力曲线，为了缩小仿真时间，本文设置的电机转动惯量比实际值略小，仿真结果如下：

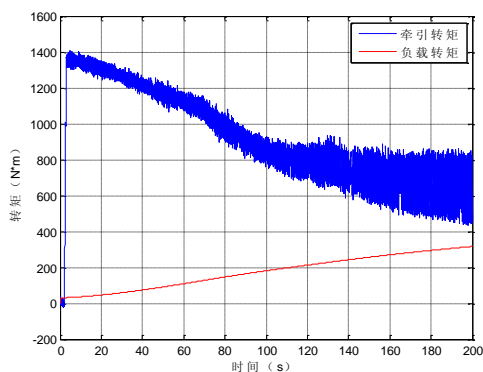


图 8 正常受流时的牵引转矩和负载转矩

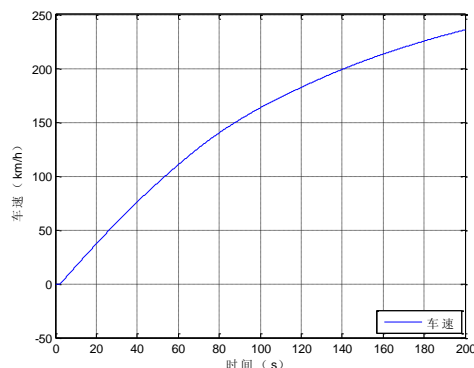


图 9 正常受流时的车速

可以看到，列车加速到 70s 时进入恒功区间 (125km/h)，低速区的转矩随着车速上升而下降，为近似恒转矩，200s 时列车加速到约 230km/h。高速弱磁区的转矩波动是由于方波控制时电压谐波含量较大导致的。

4.2 三个速度区间的离线仿真和理论计算

针对三个速度区间，选取了 50km/h、150km/h 和 225km/h 三个速度点分别进行了离线仿真和理论计算，其中在 50km/h 和 150km/h 分别做了两组离线仿真，目的是对比离线时间小于维持时间和大于维持时间两种不同情况的离线特性，离线时间如下表所示：

离线速度点	50km/h	150 km/h	225 km/h
维持	100ms	50ms	无
下降	300ms	224ms	200ms

(1)50km/h 和 150km/h 离线时间小于维持时间。

此时由于离线时间小于最大维持时间，直流环节支撑电容放电，转矩维持不变。

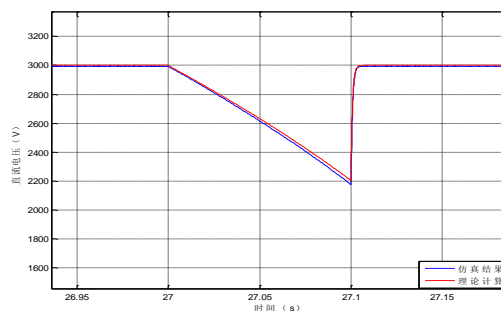


图 10 50km/h 离线 100ms 时的直流环节电压

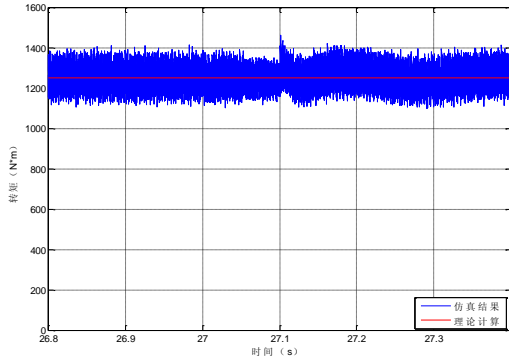


图 11 50km/h 离线 100ms 时的电机转矩

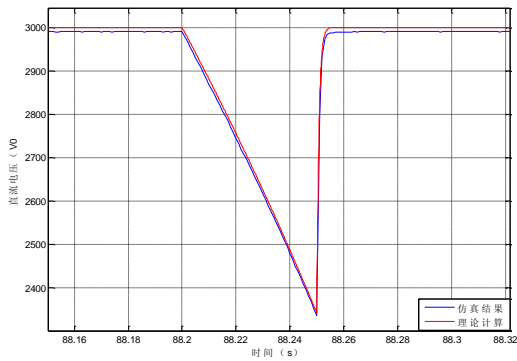


图 12 150km/h 离线 50ms 时的直流环节电压

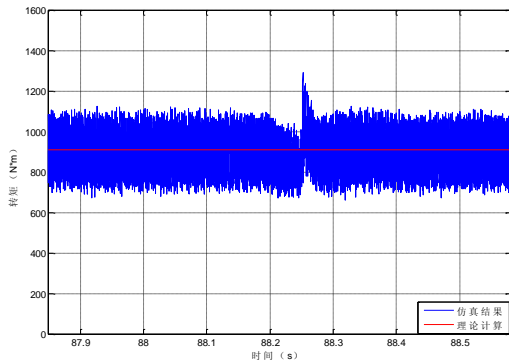


图 13 150km/h 离线 50ms 时的电机转矩

(2)50km/h 和 150km/h 离线时间大于维持时间

从(1)中看出在恢复时刻转矩略有波动,这是因为在恢复瞬间直流环节电压相当于阶跃信号,导致dq轴电流耦合加剧,出现波动。这种现象在离线时间大于维持时间导致转矩下降的情况中更加明显,所以当转矩下降到一定程度再恢复供电时,转矩指令要从零按一定斜率上升并复位PI调节器。

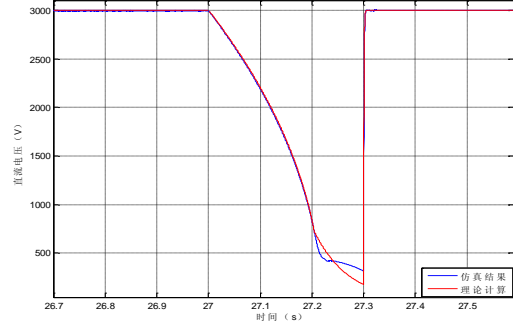


图 14 50km/h 离线 300ms 时的直流环节电压

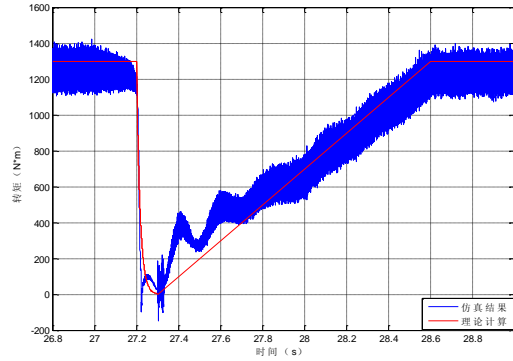


图 15 50km/h 离线 300ms 时的电机转矩

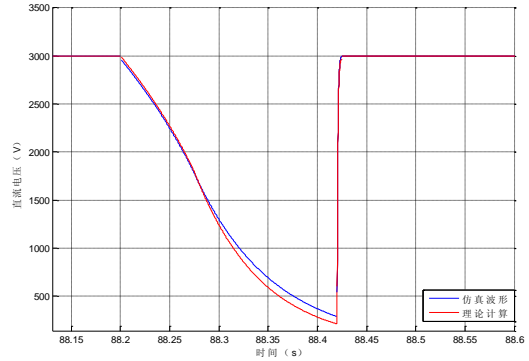


图 16 150km/h 离线 224ms 时的直流环节电压

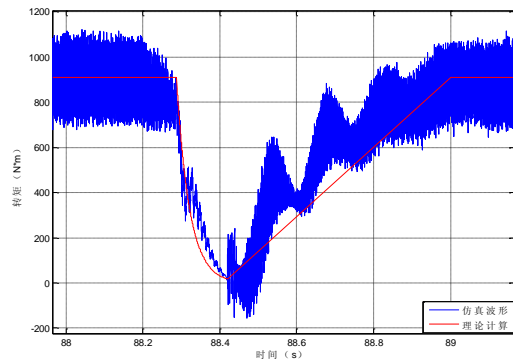


图 17 150km/h 离线 224ms 时的电机转矩

(3)225km/h 离线仿真

由于在这一速度区间已进入方波工况，所以一旦发生离线，转矩将不存在维持时间，以下是仿真结果和理论计算的对比图：

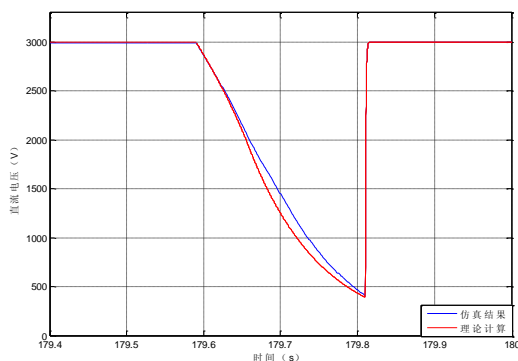


图 18 225km/h 离线 200ms 时的直流环节电压

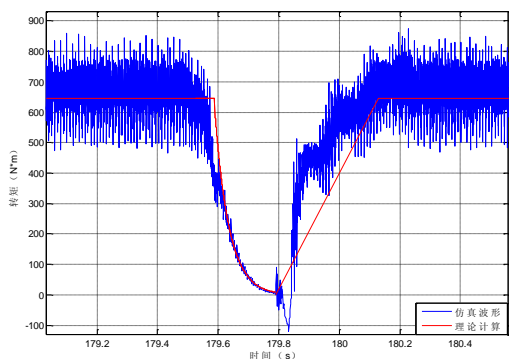


图 19 225km/h 离线 200ms 时的电机转矩

从以上结果可知，在三个速度区间的仿真和理论计算结果均比较吻合，从而验证了本文提出的分析方法的正确性。下面分析转矩维持时间和下降时间随车速的变化规律。

4.3 不同速度等级下的维持时间和下降时间

通过理论计算得到了不同速度发生离线的维持时间(恒转矩区和恒功率弱磁区)，并与仿真结果进行了对比，理论上只要离线时间小于维持时间，则在离线期间电机输出转矩不会下降，如图 20 所示。

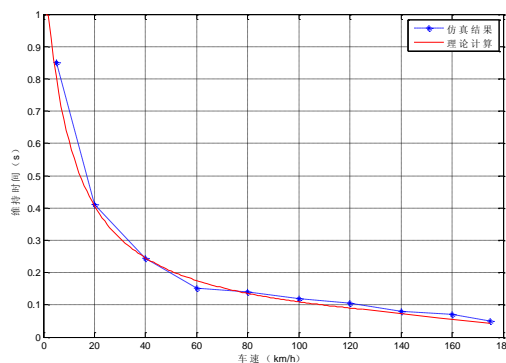


图 20 维持时间和车速的关系

不同速度等级下的下降时间(全速度范围内)如图 21 所示：

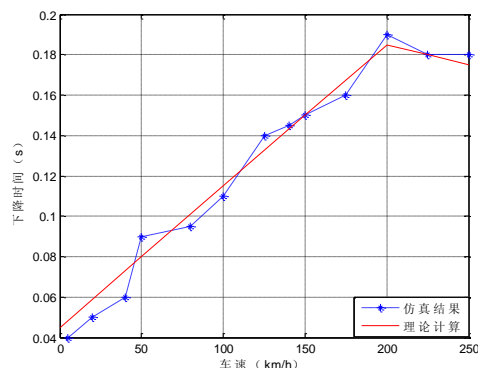


图 21 下降时间和车速的关系

从以上两图可以看出，随着车速的上升，转矩维持时间成下降趋势，到 175km/h 时几乎为零；而转矩下降时间在低速段随车速上升成线性上升趋势，在高速区因为功率恒定，所以离线后直流电压下降的时间常数是一样的，而转矩随车速上升而下降，所以高速区的下降时间随车速上升而略有下降。

5 结论

本文分析了高速列车弓网离线现象对牵引传动系统的影响，对离线现象进行近似处理，并基于两个基本假设和基本公式建立了分析离线对高速列车牵引传动性能影响的数学模型，通过与仿真结果进行对比，验证了所提出的理论的正确性，并得到了转矩维持时间和下降时间随车速变化的规律。但是恢复供电时的计算模型较为简化，没有考虑到变压器和四象限的工作特性，并且没有考虑弓网电弧的影响，认为离线时属于完全离线，与实际情况有一定偏差。今后的研究应将电弧特性考虑进来，完

善分析模型, 进而从宏观角度分析弓网离线对高速列车整体加减速性能的影响。

参考文献

- [1] 丁荣军. 现代轨道牵引传动及控制技术研究与发展[J]. 机车电传动, 2010, (5):1-8.
- [2] 王万岗, 吴广宁, 高国强, 王波. 高速铁路弓网电弧试验系统[J]. 铁道学报, 2012, 34(4):22-27.
- [3] Kevin Lee, Thomas M Jahns, William E. Berkopec and Thomas A.Lipo. Closed-Form Analysis of Adjustable-Speed Drive Performance under Input-Voltage Unbalance and Sag Conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications. VOL 42, NO.3, MAY/JUNE 2006, pp.733-741.
- [4] 邓学寿. CRH2型200km/h动车组牵引传动系统[J]. 机车电传动, 2008, (4):1-38.
- [5] 王莹. 三电平四象限整流器的控制仿真研究[J]. 机车电传动, 2007, (3):24-45.
- [6] 叶宗彬, 谭国俊, 景巍, 吴轩钦. 三电平整流器中性点平衡控制策略的研究[J], 电力电子技术, 2010, 44(9):18-20.
- [7] 赵莉, 柳毅. 三电平电压型 PWM 整流器[J]. 电力电子技术, 2010, 44(2):86-88.
- [8] 王峰, 王斌, 张杰, 何广明. 三电平异步电机的无速度传感器矢量控制系统研究[J]. 电机与控制应用, 2011,38(11):16-29.
- [9] 王明渝, 李玉军, 刘述喜, 向涛峰. 零序分量注入型三电平感应电机矢量控制系统[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(10):34-36.
- [10] 丁丽娜, 高艳萍, 谷军. 基于 Matlab/Simulink 的异步电动机间接矢量控制系统仿真[J]. 重庆工学院学报(自然科学), 2008, 22(11):146-149.
- [11] 程迪, 程海涛. CRH2 动车组动力学性能分析[J]. 机车电传动, 2010, (3):13-16.
- [12] 邓小军. 国产化 CRH2 型 200km/h 动车组及技术创新[J]. 机车电传动, 2008, (1):1-6.

作者简介

作者姓名 王赛 男, 1987 年生, 在读硕士研究生, 主要从事高速列车牵引传动系统的研究。