

引用格式:姜晓锋,韩晓言,潘鹏宇,等.考虑铁路牵引负荷接入的电力系统小干扰稳定性分析[J].电力科学与技术学报,2024,39(4):61-69.

Citation:JIANG Xiaofeng,HAN Xiaoyan,PAN Pengyu,et al.Small signal stability analysis of power system considering railway traction load access [J].Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(4):61-69.

# 考虑铁路牵引负荷接入的电力系统 小干扰稳定性分析

姜晓锋<sup>1</sup>,韩晓言<sup>2</sup>,潘鹏宇<sup>1</sup>,陈刚<sup>1</sup>

(1.国网四川省电力公司电力科学研究院,四川成都 610041;2.国网四川省电力公司,四川成都 610041)

**摘要:**随着电气化铁路的飞速发展,电气化铁路牵引负荷已成为中国电力系统中最大的单体负荷,但其负荷特性对电力系统小干扰稳定性的影响尚不明晰。为此,首先建立电气化铁路牵引负荷等效数学模型,并基于此构建考虑牵引负荷接入的电力系统小干扰模型;其次利用特征值分析方法,分析牵引负荷机车速度、机车数量以及牵引负荷接入位置和占比对电力系统小干扰稳定性的影响;最后通过特征值根轨迹寻找同步发电机励磁参数的调节范围,并分析牵引负荷接入前、后和不同牵引负荷参数对电力系统励磁参数调节范围的影响。研究结果表明:牵引负荷接入后电力系统小干扰稳定性降低,系统励磁参数调节范围收缩,系统稳定裕度降低。

**关键词:**电力系统;小干扰稳定性;特征值分析法;牵引负荷;特征值根轨迹

**DOI:**10.19781/j.issn.1673-9140.2024.04.007 **中图分类号:**TM712 **文章编号:**1673-9140(2024)04-0061-09

## Small signal stability analysis of power system considering railway traction load access

JIANG Xiaofeng<sup>1</sup>, HAN Xiaoyan<sup>2</sup>, PAN Pengyu<sup>1</sup>, CHEN Gang<sup>1</sup>

(1.Electric Power Research Institute, State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China;

2.State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** With the rapid development of electrified railways, the traction load of electrified railways has become the largest single load in China's power system, but the impact of its load characteristics on the small-signal stability of the power system is still unclear. Therefore, an equivalent mathematical model of the traction load of electrified railways is established, and based on this, a small-signal model of the power system considering the access of traction loads is constructed. Secondly, using eigenvalue analysis methods, the impacts of locomotive speed, locomotive quantity, and the access location and proportion of traction loads on the small-signal stability of the power system are analyzed. Finally, the adjustment range of excitation parameters of synchronous generators is determined through eigenvalue root locus, and the impacts of traction loads before and after access and different traction load parameters on the adjustment range of excitation parameters of the power system are analyzed. The research results indicate that after the access of traction loads, the small-signal stability of the power system decreases, the adjustment range of system excitation parameters shrinks, and the system stability margin reduces.

**Key words:** power system; small signal stability; eigenvalue analysis method; traction load; root locus of eigenvalue

随着中国电气化铁路的飞速发展,其用电量也在稳步增加,目前,中国电气化铁路用电量已占全国总用电量的 1.0%~1.5%,且是电力系统中最大

的单体负荷<sup>[1]</sup>。电气化铁路牵引负荷具有典型的波动、冲击和不平衡等动态特性,而负荷特性是影响电力系统小干扰电压稳定的关键因素之一<sup>[2]</sup>,因而

收稿日期:2023-07-31;修回日期:2024-03-19

基金项目:国网四川省电力公司科技项目(52199722000Z)

通信作者:姜晓锋(1989—),男,博士,工程师,主要从事新型电力系统安全稳定运行分析等研究;E-mail:jiangxf2020@163.com

随着电气化铁路牵引负荷的高比例接入,特别是接入山区薄弱电网,其动态特性是否会引起电力系统的电压失稳、系统稳定边界及稳定裕度的变化,目前尚不明晰。因此,有必要深入研究考虑电气化铁路牵引负荷接入的电力系统小干扰稳定性。

据统计,电力系统的负荷主要是感应电动机,其在电力系统负荷占比超60%<sup>[3-4]</sup>,目前,关于负荷特性对系统小干扰稳定性影响的研究主要集中于感应电动机的特性分析<sup>[5-8]</sup>。文献[5]基于特征值分析法,分析了不同感应电动机负荷参数在2种不同潮流运行方式下对系统小干扰稳定性的影响;文献[6]则进一步分析了感应电动机处于不同运行方式下,系统小干扰稳定性的变化特征;文献[7]考虑了感应电动机的机电暂态过程,通过对不同感应电动机负荷参数的小干扰稳定分析,研究了基于潮流模型的电压稳定指标的准确性;进一步地,文献[8]在考虑负荷动态特性对电力系统小干扰稳定影响的基础上,提出了可用于系统小干扰电压稳定在线评估的状态指标。可见,针对感应电动机对电力系统小干扰稳定性影响的研究已较为充分。

对于特殊的用电负荷,如铁路牵引负荷等,采用单一的负荷模型模拟,其精度不高,因此需要进行负荷的等效建模,且其对系统小干扰稳定性影响的研究也相对较少。为了描述电气化铁路牵引负荷的综合特性,文献[9]提出感应电动机并联牵引电机和恒阻抗的等效负荷模型,该负荷模型能较准确地反映铁路牵引负荷的运行特性,但负荷模型参数的辨识与确定条件较苛刻,难以直接用于对电力系统小干扰稳定影响的分析;文献[10]利用感应电动机描述牵引电机,提出了感应电动机并联恒阻抗的等效模型,并基于CRH3高速列车的仿真数据对等效模型的参数进行辨识,获得电力机车的负荷模型;在此基础上,文献[11-12]进一步建立了牵引供电系统供电臂的负荷模型,用以等效铁路牵引负荷,该负荷模型描述方程简单且参数辨识更易实现,便于实现对电力系统小干扰稳定性影响的分析。

牵引负荷作为电力系统最大的单体动态负荷,其负荷特性对电力系统小干扰稳定性的影响不容忽视。为此,在建立电气化铁路牵引负荷等效数学模型的基础上,本文推导考虑电气化铁路牵引负荷接入的电力系统线性化状态方程;在此基础上,利用特征值分析法分析牵引负荷的接入位置、接入占比等对电力系统小干扰稳定的影响,并基于特征值

根轨迹,分析牵引负荷对系统稳定运行边界及稳定裕度的影响。

## 1 牵引负荷等效数学模型

电气化铁路的牵引负荷主要包括牵引供电系统的损耗和列车负荷,其中,列车负荷又主要包括牵引电机、整流和逆变回路组成的牵引传动系统,以及空调、热水器和照明等组成的车载负荷。目前,中国的牵引电机一般采用三相感应电机<sup>[11-12]</sup>,而列车空调中的压缩机一般也采用感应电动机,因而可用感应电动机来综合等效牵引电机、空调等负荷。另一方面,牵引传动系统中的整流、逆变回路均需消耗无功,其负荷特性可用静态负荷模拟<sup>[9]</sup>;同时,牵引供电系统的损耗、热水器及照明等负荷基本为阻抗类负荷,故也可利用静态负荷来描述。因此,在考虑牵引负荷的组成及各类负荷特性的基础上,本文利用感应电动机并联静态负荷的综合负荷模型来等效电气化铁路的牵引负荷,如图1所示, $U$ 为牵引变压器高压母线电压; $P$ 、 $Q$ 分别为牵引负荷消耗的总有功和无功功率; $P_m$ 、 $Q_m$ 分别为感应电动机消耗的有功和无功功率, $P_s$ 、 $Q_s$ 分别为静态负荷消耗的有功和无功功率。

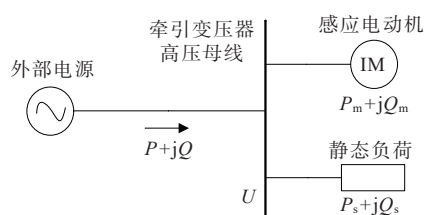


图1 牵引负荷模型组成

Figure 1 Composition of traction load model

### 1.1 感应电动机

列车的运行速度 $v$ 决定于牵引电机的转速,而牵引电机的机械转矩是转速的二次函数,即也是列车速度的二次函数。因此,在牵引负荷的感应电动机等效模型中,亦可利用列车速度的二次函数来表征其机械负载转矩<sup>[10-12]</sup>:

$$T_m = (av^2 + bv + c)M_t \quad (1)$$

式中, $M_t$ 为单列列车的重量; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为需辨识的参数。

当牵引网上有多列列车时,各列车为同时运行,因而对于含有多辆列车的牵引负荷等效,可考虑为将各列车的等效感应电动机并联<sup>[11]</sup>,进而等效为一个综合的感应电动机。一般情况下可认为牵引网上各列车的运行特性近似相同,因而,当列车

数量为 $n$ 时,综合感应电动机的机械负载转矩为单台感应电动机的 $n$ 倍,而电抗为单台感应电动机的 $1/n$ 倍<sup>[13]</sup>。

同时,由于感应电动机的定子暂态过程对电力系统小干扰稳定的影响可以忽略<sup>[11]</sup>,故利用三阶机电暂态模型便能较准确地描述感应电动机的有功和无功功率,并反映其动态性能<sup>[10-12]</sup>。因此,本文为了便于分析,牵引负荷等效模型中的感应电动机采用极坐标下的三阶机电暂态模型,其状态方程为

$$\begin{cases} T' \frac{dE'}{dt} = -E' + CU \cos \delta \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_v - \frac{CU}{T'E'} \sin \delta \\ M \frac{d\omega_r}{dt} = -\frac{UE'}{X'/n} \sin \delta - nT_m \end{cases} \quad (2)$$

式中, $T' = TX'/X$ , $T$ 为感应电动机暂态时间常数, $X'$ 为暂态电抗, $X$ 为同步电抗; $E'$ 为感应电动机暂态电抗后电势,与交轴转子暂态电势 $E'_q$ 和直轴转子暂态电势 $E'_d$ 有关,且 $E' = \sqrt{E'^2_d + E'^2_q}$ ;  $C = (X - X')/X$ ;  $\delta$ 为 $E'$ 与直轴的夹角; $\omega_r$ 、 $\omega_v$ 分别为感应电动机转子电角速度、同步角速度; $M$ 为感应电动机惯性时间常数。 $E'$ 、 $\delta$ 和 $\omega_r$ 为感应电动机状态变量; $T'$ 、 $C$ 、 $X'$ 、 $M$ 为需辨识的参数。

感应电动机消耗的功率可表示为

$$\begin{cases} P_m = -(nUE' \sin \delta)/X' \\ Q_m = [nU(U - E' \cos \delta)]/X' \end{cases} \quad (3)$$

## 1.2 静态负荷

由于指数型静态负荷模型具有更好的精度<sup>[13]</sup>,且具有更少的辨识参数,因而本文中牵引负荷的等效静态负荷采用指数型模型,其表达式如下:

$$\begin{cases} P_s = P_{s0} (U/U_0)^p \\ Q_s = Q_{s0} (U/U_0)^q \end{cases} \quad (4)$$

式中, $P_{s0}$ 、 $Q_{s0}$ 、 $U_0$ 分别为静态负荷有功、无功和电压的稳态值; $p$ 、 $q$ 分别为静态负荷模型的有功、无功电压特征指数,也是需辨识的参数。

## 1.3 牵引负荷等效模型稳态值

当各状态变量微分为零时,根据感应电动机的状态方程可求得相应状态变量的稳态值,即

$$\begin{cases} \delta_0 = \frac{1}{2} \arcsin(-2T_m X'/CU_0^2) \\ E'_0 = CU_0 \cos \delta_0 \\ \omega_{r0} = \omega_{v0} + (CU_0 \sin \delta_0)/T'E'_0 \end{cases} \quad (5)$$

由于牵引负荷吸收的总有功和无功为

$$\begin{cases} P = P_m + P_s \\ Q = Q_m + Q_s \end{cases} \quad (6)$$

因此,联立式(3)、(5)、(6),可求得静态负荷的稳态值为

$$\begin{cases} P_{s0} = P_0 + (nU_0 E'_0 \sin \delta_0)/X' \\ Q_{s0} = Q_0 - nU_0^2/X' + (nU_0 E'_0 \cos \delta_0)/X' \end{cases} \quad (7)$$

## 2 考虑牵引负荷接入的电力系统小干扰模型

### 2.1 牵引负荷小干扰模型

电力系统各元件的数学模型在稳态值附近进行线性化,是建立电力系统小干扰模型的基础<sup>[14]</sup>,因此,牵引负荷等效模型中的感应电动机和静态负荷也需进行线性化。电力网络方程是对电力系统运行参数和网络参数关系的描述,常用节点导纳矩阵表示网络方程。而导纳矩阵的元素包含电导(实部)和电纳(虚部),为了避免后续的矩阵中出现复数,导致计算量增大,将导纳矩阵每个元素的实部和虚部分开,用 $2 \times 2$ 的矩阵表示。此时的节点电压电流转换为 $x$ - $y$ 轴的分量,即

$$\begin{bmatrix} I_{ix} \\ I_{iy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ix} \\ U_{iy} \end{bmatrix}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中, $I_{ix}$ 和 $I_{iy}$ 、 $U_{ix}$ 和 $U_{iy}$ 分别为第 $i$ 个节点的电流、电压的 $x$ - $y$ 轴分量; $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 分别为第 $i$ 、 $j$ 节点间的电导和电纳。

#### 2.1.1 感应电动机线性化模型

感应电动机方程包含状态方程和负荷电压特性方程两部分。首先,根据式(2)对感应电动机状态方程进行线性化,得到矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \partial \Delta \delta \\ \partial \Delta \omega_r \\ \partial \Delta E' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{CU_0 E'_0 \cos \delta_0}{E'^2_0 T'} & 1 & \frac{CU_0 \sin \delta_0}{E'^2_0 T'} \\ \frac{nU_0 E'_0 \cos \delta_0}{MX'} & 0 & \frac{nU_0 \sin \delta_0}{MX'} \\ \frac{-CU_0 \sin \delta_0}{T'} & 0 & \frac{-1}{T'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega_r \\ \Delta E' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-CE'_0 U_{x0} \sin \delta_0}{E'^2_0 T U_0} & \frac{-CE'_0 U_{y0} \sin \delta_0}{E'^2_0 T U_0} \\ \frac{nE'_0 U_{x0} \sin \delta_0}{MX' U_0} & \frac{nE'_0 U_{y0} \sin \delta_0}{MX' U_0} \\ \frac{CU_{x0} \cos \delta_0}{T U_0} & \frac{CU_{y0} \cos \delta_0}{T U_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_x \\ \Delta U_y \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, $\partial$ 为微分算子; $\Delta$ 表示各变量对应的线性化/偏差分量; $\Delta U_x$ 、 $\Delta U_y$ 分别为电压 $U$ 的 $x$ - $y$ 轴偏差分量;

下角标0表示各变量稳态值。

同时,为了让感应电动机与网络方程联系起来,需将感应电动机的负荷电压特性方程代入电压、电流和功率的关系式<sup>[15-16]</sup>,转换为 $x$ - $y$ 轴下的电压电流关系式:

$$P_m + jQ_m = -(U_x + jU_y)(I_{mx} - jI_{my}) \quad (10)$$

式中, $U_x$ 、 $U_y$ 分别为电压 $U$ 的 $x$ - $y$ 轴分量; $I_{mx}$ 、 $I_{my}$ 分别为感应电动机电流对应的 $x$ - $y$ 轴分量。

进一步对 $I_{mx}$ 和 $I_{my}$ 进行线性化,可得感应电动机电压电流偏差分量之间的关系:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{mx} \\ \Delta I_{my} \end{bmatrix} = M^T \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega_r \\ \Delta E' \end{bmatrix} + (N + \begin{bmatrix} 0 & -n/X' \\ n/X' & 0 \end{bmatrix}) \begin{bmatrix} \Delta U_x \\ \Delta U_y \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$M =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{U_{x0} \cos \delta_0 - U_{y0} \sin \delta_0}{U_0 X' / n E'_0} & \frac{U_{y0} \cos \delta_0 + U_{x0} \sin \delta_0}{U_0 X' / n E'_0} \\ 0 & 0 \\ \frac{U_{y0} \cos \delta_0 + U_{x0} \sin \delta_0}{U_0 X' / n} & \frac{U_{y0} \sin \delta_0 - U_{x0} \cos \delta_0}{U_0 X' / n} \end{bmatrix}$$

$$N =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{U_{y0} \sin \delta_0 - U_{x0} \cos \delta_0}{X' U_0^3 / n E'_0 U_{y0}} & \frac{-U_{y0} \sin \delta_0 - U_{x0} \cos \delta_0}{X' U_0^3 / n E'_0 U_{x0}} \\ \frac{-U_{y0} \cos \delta_0 - U_{x0} \sin \delta_0}{X' U_0^3 / n E'_0 U_{y0}} & \frac{U_{x0} \sin \delta_0 + U_{y0} \cos \delta_0}{X' U_0^3 / n E'_0 U_{x0}} \end{bmatrix}$$

式中, $\Delta I_{mx}$ 、 $\Delta I_{my}$ 分别为感应电动机电流 $x$ - $y$ 轴偏差分量。

### 2.1.2 静态负荷线性化模型

由于静态负荷描述方程中不含状态方程,因而只需将式(4)所示的负荷电压特性方程进行线性化。采用感应电动机类似的关系式,可得到静态负荷 $x$ - $y$ 轴下的电压电流关系式,并进行线性化后可得静态负荷的电压电流偏差分量方程:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{sx} \\ \Delta I_{sy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{xx} & F_{xy} \\ F_{yx} & F_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_x \\ \Delta U_y \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$F_{xx} = \frac{P_{s0}}{U_0^2} \left( (2 - P_v) \frac{U_{x0}^2}{U_0^2} - 1 \right) + \frac{Q_{s0}}{U_0^2} \left( (2 - Q_v) \frac{U_{x0} U_{y0}}{U_0^2} \right)$$

$$F_{xy} = \frac{Q_{s0}}{U_0^2} \left( (2 - Q_v) \frac{U_{y0}^2}{U_0^2} - 1 \right) + \frac{P_{s0}}{U_0^2} \left( (2 - P_v) \frac{U_{x0} U_{y0}}{U_0^2} \right)$$

$$F_{yx} = -\frac{Q_{s0}}{U_0^2} \left( (2 - Q_v) \frac{U_{x0}^2}{U_0^2} - 1 \right) + \frac{P_{s0}}{U_0^2} \left( (2 - P_v) \frac{U_{x0} U_{y0}}{U_0^2} \right)$$

$$F_{yy} = \frac{P_{s0}}{U_0^2} \left( (2 - P_v) \frac{U_{y0}^2}{U_0^2} - 1 \right) - \frac{Q_{s0}}{U_0^2} \left( (2 - Q_v) \frac{U_{x0} U_{y0}}{U_0^2} \right)$$

式中, $\Delta I_{sx}$ 、 $\Delta I_{sy}$ 分别为静态负荷电流 $x$ - $y$ 轴偏差分量。

## 2.2 考虑牵引负荷接入的电力系统小干扰模型

将电力系统的同步发电机、励磁系统、牵引负荷和其他电力系统负荷的数学模型在稳态值附近线性化,并依据电力系统网络方程将各元件关联,形成全系统的线性化状态空间方程,即系统小干扰模型<sup>[17]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \partial \Delta x \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中, $\Delta x$ 为电力系统各元件状态变量的线性化分量; $\Delta y$ 为电力系统代数向量的线性化分量; $J_{11}$ 、 $J_{12}$ 、 $J_{21}$ 、 $J_{22}$ 为系统网络方程及各部分线性化模型形成的矩阵。

进一步消去式(13)中的 $\Delta y$ ,可得系统小干扰状态方程:

$$\partial \Delta x = J \Delta x \quad (14)$$

式中, $J = J_{11} - J_{12} J_{22}^{-1} J_{21}$ 。

通过计算状态矩阵 $J$ 的特征值和特征向量,可以给出电力系统小干扰稳定性的信息,进而研究影响系统稳定性的相关因素<sup>[15-18]</sup>。

## 3 考虑牵引负荷接入的电力系统小干扰稳定性分析

### 3.1 研究对象

本文以WSCC三机九节点系统<sup>[19]</sup>为对象进行小干扰稳定性分析,系统拓扑结构如图2所示,1为平衡节点,2、3为PV节点,5、6和8为负荷节点,采用指数型静态负荷模型模拟负荷;以容量100 MV·A和电压220 kV为系统基准值。为了简化系统建模,发电机I采用经典模型,发电机II和III采用双轴模型,并均装有自并励静止励磁系统<sup>[15-16]</sup>。牵引负荷模型采用文1中所推导的等效数学模型并参考文献[12]中的仿真数据,用于辨识参数和描述牵引负荷。

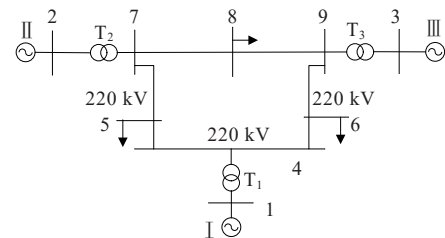


图2 WSCC三机九节点系统结构

Figure 2 Three-machine nine-node structure of WSCC

### 3.2 牵引负荷对电力系统小干扰稳定性影响

#### 3.2.1 牵引负荷参数的影响

1) 基础工况。机车数量为 3,牵引负荷接入电力系统负荷节点 6 位置,机车速度为 150 km/h 时牵引负荷占系统总负荷的比重为 5.21%。改变牵引负荷的机车速度,分析不同机车速度对系统小干扰稳定性的影响。当电力系统特征值的阻尼比小于 5% 时,系统处于弱阻尼状态<sup>[15]</sup>,此时系统振荡衰减的效果不佳,稳定性较差。因此,本文仅考虑处于弱阻尼状态的特征值,如表 1 所示,随着机车速度增大,系统振荡模态对应的特征值实部不变,虚部增大,振荡频率不变,其衰减阻尼比逐渐减小,但变化很小,系统的小干扰稳定性基本不变。

**表 1** 不同机车速度下的特征值变化  
**Table 1** Variation of eigenvalues at different locomotive speeds

机车速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	振荡模态特征值			
	实部	虚部	频率/Hz	衰减阻尼比/%
100	-0.346 2	±8.356 6i	1.330 0	4.139 4
150	-0.346 2	±8.356 6i	1.330 0	4.139 3
200	-0.346 2	±8.356 7i	1.330 0	4.139 2

2) 采用上述工况,改变牵引负荷的机车数量,分析不同机车数量对系统稳定性的影响,系统特征值变化如表 2 所示,随着机车数量增加,特征值实部增大,虚部减小,振荡频率减小,衰减阻尼比逐渐减小,系统的稳定性逐渐降低。

**表 2** 不同机车数量下的特征值变化  
**Table 2** Variation of eigenvalues under different number of locomotives

机车数量/ 辆	振荡模态特征值			
	实部	虚部	频率/Hz	衰减阻尼比/%
1	-0.349 6	±8.361 7i	1.330 8	4.177 8
2	-0.347 9	±8.359 4i	1.330 4	4.158 0
3	-0.346 2	±8.356 6i	1.330 0	4.139 3
4	-0.344 6	±8.353 4i	1.329 5	4.122 3
5	-0.343 2	±8.349 8i	1.328 9	4.107 3
6	-0.342 0	±8.345 9i	1.328 3	4.094 6

由上述分析可知,随着机车速度的增加,系统稳定性基本不变;随着机车数量的增加,特征值实部向虚轴移动,衰减阻尼比逐渐减小,系统的稳定性逐渐降低。

#### 3.2.2 牵引负荷接入位置的影响

1) 采用文 3.2.1 中工况,当接入电力系统的牵引负荷数量为 1 时,改变接入位置,分析不同牵引负荷接入位置对系统稳定性的影响。电力系统特征值变化如表 3 所示,接入节点 5、6 时系统稳定性相差很小,节点 5 稳定性稍强。而节点 8 对比其他 2 个节点,特征值实部更大,特征值虚部、振荡频率和衰减阻尼比更小,系统稳定性降低。接入节点不同时系统稳定性排序为节点 5>节点 6>节点 8。

**表 3** 不同牵引负荷接入位置的特征值变化  
(牵引负荷数量为 1)

**Table 3** Variation of eigenvalues with different traction load access position (The number of traction loads is 1)

接入 位置	振荡模态特征值			
	实部	虚部	频率/Hz	衰减阻尼比/%
节点 5	-0.346 1	±8.353 1i	1.329 4	4.139 9
节点 6	-0.346 2	±8.356 6i	1.330 0	4.139 3
节点 8	-0.330 0	±8.320 9i	1.324 3	3.963 3

2) 当接入牵引负荷数量为 2 时,改变接入位置,特征值变化如表 4 所示,可得相似结论,同时接入节点 6、8 的系统稳定性最差,同时接入节点 5、8 的系统稳定性优之,同时接入节点 5、6 的系统稳定性最好。

**表 4** 不同牵引负荷接入位置的特征值变化  
(牵引负荷数量为 2)

**Table 4** Variation of eigenvalues with different traction load access position (The number of traction loads is 2)

接入 位置	振荡模态特征值			
	实部	虚部	频率/Hz	衰减阻尼比/%
节点 5、6	-0.340 7	±8.341 9i	1.327 7	4.081 0
节点 6、8	-0.326 0	±8.310 7i	1.322 7	3.919 7
节点 5、8	-0.326 3	±8.307 4i	1.322 2	3.925 3

综上所述,由于负荷节点存在差异,接入不同节点会影响系统小干扰稳定性。

#### 3.2.3 牵引负荷占比的影响

采用文 3.2.1 中工况,增加牵引负荷接入系统的数量,提高牵引负荷占比,分析不同牵引负荷占比对系统稳定性的影响。电力系统特征值变化如表 5 所示,随着牵引负荷占比的增加,特征值实部逐渐增大,虚部逐渐减小,振荡频率逐渐减小,衰减阻尼比减小,系统稳定性降低。

表5 不同牵引负荷比例下的特征值变化

Table 5 Variation of eigenvalues under different traction load ratios

接入数量	振荡模态特征值			
	实部	虚部	频率/Hz	衰减阻尼比/%
1	-0.346 2	±8.356 6i	1.330 0	4.139 3
2	-0.326 0	±8.310 7i	1.322 7	3.919 7
3	-0.323 7	±8.297 6i	1.320 6	3.898 1

### 3.3 牵引负荷对系统稳定运行边界的影响

励磁系统能调节和维持发电机端电压以及调节并行发电机之间的无功功率分配<sup>[20]</sup>,是发电机的重要组成部分,它直接影响发电机的运行特性,对电力系统的安全稳定运行有着重要的影响<sup>[21]</sup>。在系统稳态运行时,励磁系统的参数对发电机阻尼力矩影响较大<sup>[22]</sup>,采用不同的发电机励磁系统参数会影响发电机的阻尼力矩<sup>[23]</sup>。当发电机受到小干扰后,转子转速将发生变化,正的阻尼力矩可以抑制发电机的振荡,使系统恢复小干扰稳定。

励磁参数的调整会影响发电机的阻尼力矩,对系统小干扰稳定带来影响,严重情况下甚至会导致系统小干扰失稳。而励磁系统参数调节的范围越小,系统稳定运行的边界越小,系统的小干扰稳定裕度也就越低。励磁系统参数的调节范围体现了系统小干扰稳定裕度的高低。因此,本文选用励磁参数来表征系统的小干扰稳定裕度,研究牵引负荷对系统稳定运行边界的影响;通过绘制励磁参数变化时的特征值根轨迹图,研究牵引负荷对发电机励磁参数的调节范围、稳定裕度和稳定性的影响。

发电机Ⅱ、Ⅲ采用相同的自并励静止励磁系统<sup>[15-16]</sup>,如图3所示,各励磁参数意义: $K_A$ 、 $T_A$ 分别为励磁系统综合等值增益、时间常数, $T_B$ 、 $T_C$ 为串联校正环节的等值时间常数, $T_R$ 为测量环节时间常数;励磁参数设置如表6所示。自并励静止励磁系统具有高励磁电压响应速度、能提高系统稳定性能等优点<sup>[24]</sup>。

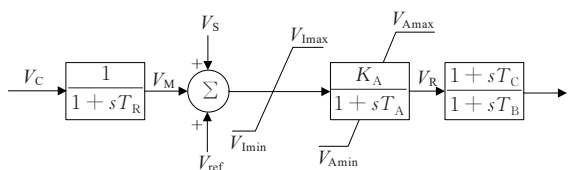


图3 自并励静止励磁系统

Figure 3 Self-shunt static excitation system

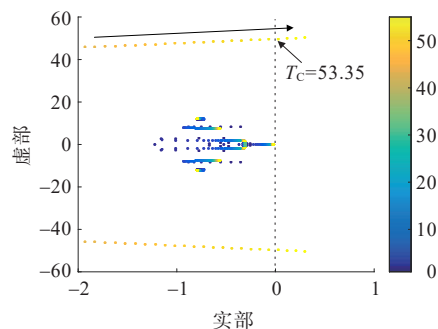
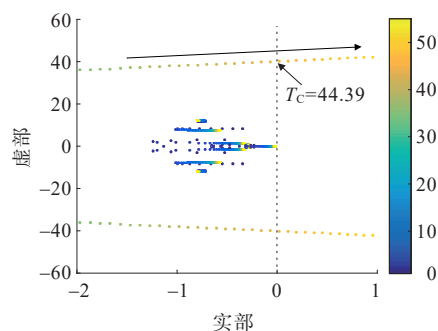
表6 励磁系统参数

Table 6 Parameters of excitation system

$K_A$	$T_A/s$	$T_B/s$	$T_C/s$	$T_R/s$
200	0.02	10	1	0.03

#### 3.3.1 牵引负荷接入对电力系统励磁参数调节范围的影响

在未接入牵引负荷前的电力系统中,改变发电机Ⅱ的励磁参数,观察特征值根轨迹穿过虚轴时所对应的参数值,即励磁参数调节范围,如图4所示,给出了改变励磁参数 $T_C$ 、电力系统的特征值根轨迹图及调节范围;同样,在接入牵引负荷后,绘制特征值根轨迹,如图5所示。调节范围是指参数从正常值变至边界值,边界值是指在该参数下,特征值轨迹刚好与虚轴相交,并用边界值来指代参数的调节范围。

图4 牵引负荷未接入工况下 $T_C$ 变化时系统特征值根轨迹Figure 4 Root locus of system eigenvalues under different  $T_C$  without traction load access图5 牵引负荷接入工况下 $T_C$ 变化时系统特征值根轨迹Figure 5 Root locus of system eigenvalues under different  $T_C$  with traction load access

对比图4、5,接入牵引负荷后励磁参数 $T_C$ 的调节范围减小,系统的稳定裕度降低,在同样的励磁参数下,系统特征值位置更靠右,系统稳定性更低。此外,图4、5表明:在增大励磁参数 $T_C$ 时,系统的特征值实部向虚轴移动,系统稳定性不断降低。

基于上述方法,改变文3.3中提及的发电机Ⅱ

的励磁参数,得到系统特征值根轨迹穿过虚轴时所对应的参数值,如表 7 所示,可以看出,当接入牵引负荷后,电力系统发电机 II 各励磁参数的调节范围均减小,系统的稳定裕度和稳定性降低。

表 7 励磁参数调节范围

Table 7 Adjustable range of excitation parameters

接入情况	励磁参数				
	$T_A/s$	$T_B/s$	$T_C/s$	$T_R/s$	$K_A$
未接入	0.97	$+\infty$	53.35	0.98	10 245
接入	0.72	1 030	44.90	0.77	8 428

### 3.3.2 牵引负荷参数对电力系统励磁参数调节范围的影响

在牵引负荷接入后,为研究不同机车数量和不同接入位置时磁参数调节范围的变化,分析不同牵引负荷参数对系统的稳定性及稳定裕度的影响,验证文 3.2 中稳定性的变化。本文选取励磁参数  $T_A$ 、 $T_R$  进行对比分析,其对靠近虚轴的振荡模式影响更大。工况 1 为文 3.2.1 中的基础工况,工况 2 在工况 1 基础上修改机车数量为 5,工况 3 在工况 1 基础上将牵引负荷接入位置变为节点 8。工况 1、2 时  $T_A$  参数变化的特征值根轨迹分别如图 6、7 所示。

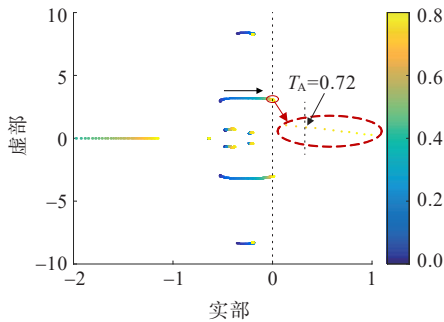


图 6 工况 1  $T_A$  变化时系统特征值根轨迹

Figure 6 Root locus of system eigenvalues under different  $T_A$  at operation condition 1

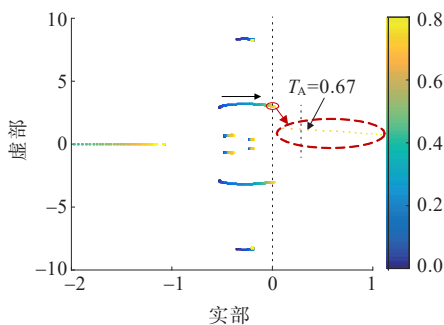


图 7 工况 2  $T_A$  变化时系统特征值根轨迹

Figure 7 Root locus of system eigenvalues under different  $T_A$  at operation condition 2

工况 1、3 下  $T_R$  参数变化的特征值根轨迹分别如图 8、9 所示,对比可知,当牵引负荷接入电力系统的节点位置由 6 改变至 8 后,系统的励磁参数  $T_R$  调节范围有所减小,系统的稳定裕度和稳定性降低。此外,增大励磁参数  $T_R$ ,系统靠近虚轴的振荡模式对应的特征值向虚轴移动,系统的稳定性不断降低。

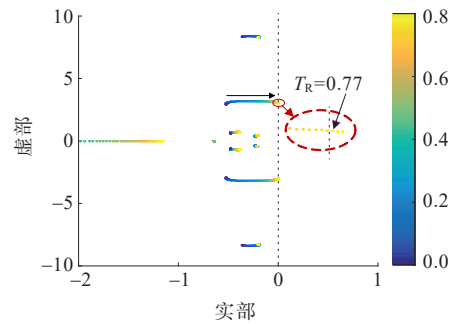


图 8 工况 1  $T_R$  变化时系统特征值根轨迹

Figure 8 Root locus of system eigenvalues under different  $T_R$  at operation condition 1

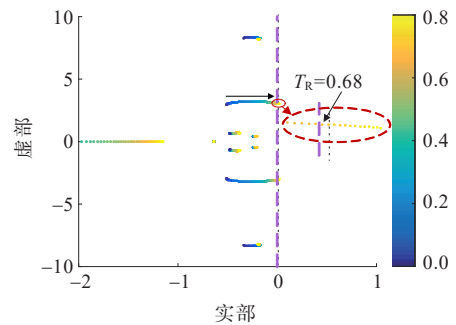


图 9 工况 3  $T_R$  变化时系统特征值根轨迹

Figure 9 Root locus of system eigenvalues under different  $T_R$  at operation condition 3

通过上述步骤对比 3 种工况下电力系统励磁参数调节范围的变化,如表 8 所示。

表 8 励磁参数调节范围

Table 8 Adjustable range of excitation parameters

工况	$T_A/s$	$T_R/s$
1	0.72	0.77
2	0.67	0.72
3	0.63	0.68

1) 对比工况 1、2 发现,机车数量增加后电力系统的励磁参数  $T_A$ 、 $T_R$  调节范围减少,电力系统的稳定裕度和稳定性降低,验证了文 3.2.1 中机车数量变化对电力系统小干扰稳定性的影响;

2) 对比工况 1、3 可知,当牵引负荷接入电力系

统的节点位置由6改变至8后,电力系统的励磁参数 $T_A$ 、 $T_R$ 调节范围减少,电力系统的稳定裕度和稳定性降低,验证了文3.2.2中接入位置变化对电力系统小干扰稳定性的影响;

3) 对比工况2、3的参数调节范围,工况3的电力系统的励磁参数 $T_A$ 、 $T_R$ 调节范围均较小,电力系统的稳定裕度和稳定性更低(工况2、3分别对应表2中机车数量为5和表3接入位置为8的工况);对比2种工况的特征值实部及衰减阻尼比,工况3的特征值实部更靠近虚轴,衰减阻尼比更小,系统稳定性更低。通过比较阻尼比和系统励磁参数调节范围都能得到相同的稳定性结论。

## 4 结 语

本文研究了不同牵引负荷参数、接入位置和牵引负荷占比对电力系统小干扰稳定性的影响,并通过改变系统发电机的励磁参数,研究牵引负荷接入及参数变化对励磁参数的稳定调节范围的影响。研究表明:当牵引负荷接入电力系统后,牵引负荷的机车数量、负荷占比和接入位置会影响电力系统的小干扰稳定性,而机车速度对系统小干扰稳定的影响很小;当牵引负荷接入系统、机车数量增加以及接入稳定性更差的节点,系统励磁参数的调节范围收缩,系统稳定裕度降低。

此外,牵引负荷接入西部山区薄弱电网是否会给电力系统小干扰稳定性带来更严重的影响,需进一步探究。

## 参 考 文 献:

- [1] 毛玲,邓思文,赵登辉,等.新能源汽车监测平台在行驶和充电场景中的应用与思考[J].电工技术学报,2022,37(1):48-57.  
MAO Ling, DENG Siwen, ZHAO Denghui, et al. Application and thinking of big data technology of new energy vehicle monitoring platform in driving and charging scenarios[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(1):48-57.
- [2] 刘自发,刘炎.基于虚拟直流机的直流微电网电压稳定控制策略[J].电力系统保护与控制,2023,51(4):62-71.  
LIU Zifa,LIU Yan.Voltage stability control strategy of a DC microgrid based on a virtual DC machine[J].Power System Protection and Control,2023,51(4):62-71.
- [3] OMATA T,UEMURA K.Aspects of voltage responses of induction motor loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems:A Publication of the Power Engineering Society, 1998,13(4):1337-1344.
- [4] 赵兵,汤涌.感应电动机负荷的动态特性分析[J].中国电机工程学报,2009,29(7):71-77.  
ZHAO Bing, TANG Yong. Dynamic characteristics analysis of induction motor loads[J].Proceedings of the CSEE,2009,29(7):71-77.
- [5] 朱晓荣,冯天娇.基于小信号稳定性的直流微电网多控制器参数全局优化方法[J].电力建设,2023,44(6):112-125.  
ZHU Xiaorong, FENG Tianjiao. Global optimization method for multi-controller parameters of DC microgrid based on small-signal stability[J]. Electric Power Construction,2023,44(6):112-125.
- [6] 李桂红,韩肖清.感应电动机负荷参数及运行状态对电力系统小干扰稳定性的影响[J].电力学报,2010,25(2):131-134.  
LI Guihong, HAN Xiaoqing. Effect of induction-motor parameters and operating status on small signal stability in power system[J].Journal of Electric Power,2010,25(2):131-134.
- [7] 孙华东,周孝信,李若梅.计及感应电动机负荷的静态电压稳定性分析[J].中国电机工程学报,2005,25(24):1-7.  
SUN Huadong,ZHOU Xiaoxin,LI Ruomei.Static voltage stability analysis considering induction motor loads[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(24):1-7.
- [8] 李宇骏,陆艺源,牟同鹏,等.新能源发电经换流器并网系统的稳定性分析与控制综述[J].电网与清洁能源,2023,39(12):79-94.  
LI Yujun,LU Yiyuan,MOU Tongpeng,et al .A review of stability analysis and control of renewable energy integration systems via converters[J].Power System and Clean Energy,2023,39(12):79-94.
- [9] 牛晨,王果,姚俊.基于有源滤波器自适应阻抗重塑的高速铁路谐波谐振抑制[J].智慧电力,2022,50(5):85-93.  
NIU Chen, WANG Guo, YAO Jun. Harmonic resonance suppression of high-speed railway based on active filter adaptive impedance reshaping[J]. Smart Power, 2022, 50(5):85-93.
- [10] 周盛,余丹萍,江全元.CRH3动车组牵引传动系统的负荷建模[J].机电工程,2011,28(1):118-122.  
ZHOU sheng, YU Danping, JIANG Quanyuan. Load modeling of CRH3 electric multiple unit traction drive system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2011,28(1):118-122.
- [11] 周盛.高速铁路牵引负荷建模及分析[D].杭州:浙江大学,2011.  
ZHOU Sheng. Load modeling and analysis of High-speed railway traction load[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2011.
- [12] 吴双.高速铁路牵引供电系统负荷建模[D].成都:西南交通大学,2013.



- WU Shuang. High-speed railway traction power supply system load modeling[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [13] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 73-174.
- JU Ping, MA Daqiang. Power system load modeling[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 73-174.
- [14] 陈亦平, 曹玉磊, 赵利刚, 等. 基于指数变换的电力系统不稳定特征值计算方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(3): 161-168.
- CHEN Yiping, CAO Yulei, ZHAO Ligang, et al. Calculation method for unstable eigenvalue of power system based on exponential transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 161-168.
- [15] 刘天琪. 现代电力系统分析理论与方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016: 186-204.
- LIU Tianqi. Theory and methods of modern power system analysis[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016: 186-204.
- [16] WANG X, SONG Y, Irving M. Modern power systems analysis[M]. Boston, MA, USA: Springer, 2008: 405-487.
- [17] 康思伟, 董文凯, 郭诗然, 等. 基于虚拟同步机控制的新能源发电并网系统小干扰稳定临界短路比[J]. 电力建设, 2022, 43(3): 131-140.
- KANG Siwei, DONG Wenkai, GUO Shiran, et al. Critical short-circuit ratio of small-signal stability for a grid-connected renewable power generation system based on virtual synchronous generator control[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(3): 131-140.
- [18] 王一珺, 杜文娟, 王海风. 大规模风电汇集系统小干扰稳定性研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1934-1946.
- WANG Yijun, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Review on small signal stability analysis of large-scale wind power collection system[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1934-1946.
- [19] SAUER P W, PAI M. Power system dynamics and stability[M]. Urbana, IL, USA: John Wiley & Sons, 1997: 183-231.
- [20] 潘学萍, 许一, 赵天骐, 等. 考虑系统稳定边界的同步调相机励磁与升压变参数联合优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 45-54.
- PAN Xueping, XU Yi, ZHAO Tianqi, et al. Joint optimization of parameters of synchronous condenser excitation and step-up transformer considering the stability boundary of the power system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(08): 45-54.
- [21] 周年光, 王钦, 姚伟, 等. 发电机励磁辅环控制参数对电力系统阻尼的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 12-22.
- ZHOU Nianguang, WANG Qin, YAO Wei, et al. Influence analysis of generator excitation auxiliary control parameters on power system damping[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 12-22.
- [22] 吕品, 戈宝军, 姜超, 等. 隐极发电机阻尼绕组和槽楔对励磁转矩的影响[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(1): 69-78.
- LU Pin, GE Baojun, JIANG Chao, et al. Influence of damping winding and slot wedge on excitation torque of hidden pole generator[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(1): 69-78.
- [23] 谷志锋, 朱长青, 赵文杰, 等. 励磁系统参数对发电机组力矩特性的影响[J]. 中国机械工程, 2013, 24(18): 2448-2451.
- GU Zhifeng, ZHU Changqing, ZHAO Wenjie, et al. Influence of excitation system parameters on moment characteristics of generator set[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(18): 2448-2451.
- [24] 霍承祥, 于大海, 马晓光, 等. 励磁系统动态增益对凸极发电机动态阻尼的影响[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 116-121.
- HUO Chengxiang, YU Dahai, MA Xiaoguang, et al. Impact of dynamic gain of excitation system on dynamic damping of salient-pole generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 116-121.