文章编号：1001-8360(2018)06-0036-08

城轨列车再生制动振荡抑制策略研究

方晓春，贾兆欣，杨中平，林 飞
（北京交通大学 电气工程学院，北京 100044）

摘 要：城轨列车再生制动的限流控制可能会引起直流网压与电机电流振荡，降低系统稳定性。本文建立供电区间模型，包含分别进行再生制动和牵引的两列车，并按照系统限流的关键电气量进行工作模式分类。展开系统功率特性分析，建立小信号模型，判断各工作模式的稳定性。利用小信号模型下的系统传递函数，解析限流曲线控制下的振荡原理，给出抑制振荡的方案，提出相关参数设计方法。理论分析和 Matlab/Simulink 仿真证明了该振荡抑制策略的可行性，能够有效提高系统稳定性。最后实验验证了方案的可行性。

关键词：再生制动；限流控制；振荡抑制策略
中图分类号：U260.35 **文献标志码**：A doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2018.06.005

Anti-oscillation Strategy for Regenerative Braking of Metro Trains

FANG Xiaochun, JIA Zhaoxin, YANG Zhongping, LIN Fei
(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The current-limit control of metro trains when braking may cause the oscillation of DC link voltage and motor current, which reduces the stability of the system. In this paper, a power supply interval model was set up which includes two trains that perform regenerative braking and traction respectively, where the working modes of the system were classified respectively according to the key electrical parameters of the system current limiting. After the analysis of the power characteristics of the system, the small signal model was established to determine the stability of each working mode. The system transfer function under the small signal model was used to analyze the oscillation mechanism under the control of the current limiting curve. Then, the anti-oscillation strategy and the related parameter design method were proposed. The feasibility and stability of the method were verified with the theoretical analysis, Matlab/Simulink simulation and experiments.

Key words: regenerative braking; current-limiting control; anti-oscillation strategy

受限于较短的线路站间距，城轨列车需要频繁地启动与制停。反复的启停过程能够产生大量的再生制动能量。若返回电网的再生能量不被附近牵引列车完全利用，就会引起直流供电网电压升高。当直流网压升高超过网压波动限制时，可能引发再生制动失效。为防止再生制动失效，列车再生制动需要受到限流曲线的控制[1-2]，如图 1 所示。图 1 横轴为牵引变流器直流侧支撑电容电压 U_f，纵轴为牵引电机转矩指令电流 I_q^*，U_{lim} 为限流控制起始电压，U_{max} 为最大电压，I_{max} 为产生最大再生制动力时的转矩电流。当 U_f 低于 U_{lim} 时，I_q^* 恒定为 I_{qmax}。当 U_f 大于 U_{lim} 时，则逐渐减小 I_q^* 而进行限流控制，限流曲线为直线。当 U_f 超过上限 U_{max} 时，$I_q^*=0$，再生制动停止。

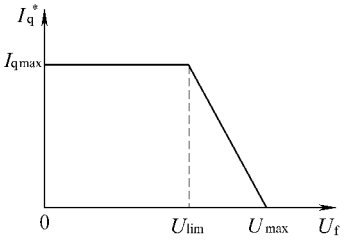


图 1 再生制动限流曲线

图 1 所示限流曲线的 U_{max} 受限于牵引变流器电

收稿日期：2016-10-18；修回日期：2017-05-17
作者简介：方晓春(1987—)，男，江西上饶人，讲师，博士。
E-mail：xcfang@bjtu.edu.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

压等级等条件,需设定为恒值。直流供电网的线路阻抗会造成再生制动能量的传输损耗。牵引车距离再生车越远,压降越明显。设定 $U_{\lim}$ 接近 $U_{\max}$ 有利于减少线路损耗。然而 $U_{\lim}$ 越接近 $U_{\max}$,限流曲线斜率就越大,等效于再生制动限流控制的比例增益越大,进而影响系统控制稳定性。再生制动列车的变流器直流侧可能出现电压过冲而引发过电压保护,导致再生失效。此外,也可能引起直流侧电压和牵引电机电流的持续振荡[3-5]。

为抑制再生制动限流控制引发的传动系统电压、电流振荡,文献[3]根据列车工况调整限流曲线,使得系统总是运行在图 1 所示 $U_{\lim}$ 左侧区域,不再进行电流指令逐渐下降的限流控制,从而消除了振荡。文献[4]建立系统小信号模型,分析振荡机理,提出了调整控制器参数进行振荡抑制的方案。文献[3-4]中,消耗再生能量的牵引列车被简化为电阻,牵引列车对系统稳定性的影响没有得到充分考虑。城轨列车传动系统直流侧电压、电流振荡机理与抑制策略研究主要集中在牵引工况[6-10],其中的建模与分析方法值得借鉴。

本文对包含牵引列车和再生列车的牵引供电系统进行建模,通过对模型的解析分析振荡机理,提出振荡抑制策略,给出控制参数的解析计算方法,以抑制振荡现象。

1　再生制动系统建模与稳定性分析

1.1　系统工作模式

假设同一供电区间内有牵引车和再生车各一列,系统构成如图 2 所示。若牵引车功率小于再生车功率,则系统为低载再生系统。本文建模中忽略牵引供电网线路阻抗以及各部分损耗,并假设列车恒速运行。

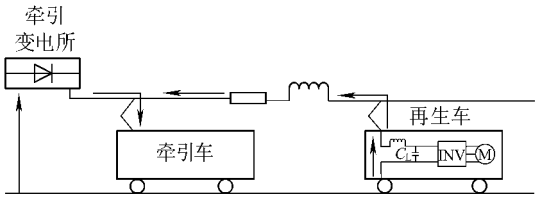


图 2　单供电区间再生制动系统构成

对图 2 进行简化,得到图 3 所示等效电路。其中,牵引变电所的不控整流被简化为二极管 D_1,电压源 U_s 代表整流器输出端空载电压,D_1 与 U_s 串联构成简化的变电所;R_f 为直流侧等效电阻,L_f 为滤波电感,i_s 为供电线路电流;C_{f1} 为再生车直流侧电容,电流源 I_{inv1} 代表再生车逆变器而输出电能,U_{f1} 为再生车直流侧电容电压;C_{f2} 为牵引车直流侧电容,电流源 I_{inv2} 代表牵引车逆变器而吸收电能,U_{f2} 为牵引车直流侧电容电压。

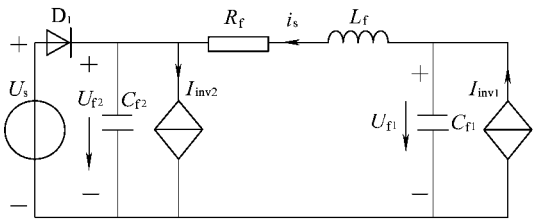


图 3　系统简化等效电路

按照 D_1 的开通状态和 U_{f1} 是否处于限流区可以将图 3 所示电路的工作模式分为 4 种,见表 1。

表 1　再生制动系统工作模式分类

工作模式	再生电压范围	二极管
1	$U_{\lim}<U_{f1}<U_{\max}$	开通
2	$U_{\lim}<U_{f1}<U_{\max}$	关断
3	$U_{f1}\leqslant U_{\lim}$	开通
4	$U_{f1}\leqslant U_{\lim}$	关断

本文将通过求解不同工作模式下的状态空间方程以分析系统稳定性。所研究列车以永磁同步电机为牵引电机。

1.2　系统状态方程与稳定性分析

上述单区间再生系统中,牵引逆变器功率可表示为

$$\eta I_{inv}U_f = I_dU_d + I_qU_q \tag{1}$$

式中:η 为逆变器能量转换效率;I_q、I_d 为电机交、直轴电流;U_q、U_d 为电机交、直轴电压;I_{inv} 为逆变器端电流;U_f 为直流侧电容电压。

本文假设:

(1)逆变器能量转换效率为 1。

(2)永磁同步电机采用 $i_d=0$ 控制。

(3)速度为常数。

式(1)可以简化为

$$I_{inv}U_f = I_qU_q \tag{2}$$

按照以上假设,分析逆变器牵引工况、再生工况以及图 3 所示系统电压、电流特性。

1.2.1　逆变器牵引工况特性分析

永磁同步电动机稳态交轴电压方程为

$$U_q = \omega_eL_dI_d + R_mI_q + \omega_e\Psi_f \tag{3}$$

式中:ω_e 为电角速度;L_d 为直轴电感;R_m 为定子电阻;Ψ_f 为永磁体磁链。在电机转速较高时可以忽略定子电阻压降 R_mI_q,在 $i_d=0$ 控制下 $U_q=\omega_e\Psi_f$。稳态分析中假设速度恒定,可以认为 U_q 恒定。由于逆变器的调制功能,牵引工况逆变器为牵引电机提供的功率一般情况下不受直流侧电容电压影响,本文分析时设列车牵引功率 P_2 为常数。此时,牵引工况逆变器稳态

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

特性表现为 I_{inv} 随 U_f 成反比变化。

$$I_{inv}=U_qI_qU_f^{-1}=P_2U_f^{-1} \tag{4}$$

1.2.2 逆变器再生工况特性分析

根据图 1 所示限流曲线，并结合式(4)可以得到再生工况逆变器的稳态特性为

$$I_{inv}=\begin{cases}P_1U_f^{-1} & U_f\leqslant U_{lim}\\ k_pU_q(U_{max}U_f^{-1}-1) & U_{lim}\leqslant U_f\leqslant U_{max}\\ 0 & U_{max}\leqslant U_f\end{cases} \tag{5}$$

式中：k_p 为限流曲线斜率；P_1 为再生功率。

对比式(4)与式(5)可以发现，未进入限流区，即 $U_f<U_{lim}$ 时，再生工况静态特性与牵引工况相同，I_{inv} 随 U_f 成反比变化；进入限流区对 I_q 进行限制后，I_{inv} 相对 U_f 呈非线性关系。

1.2.3 单供电区间再生制动系统特性分析

基于式(4)、式(5)所示牵引工况、再生工况列车逆变器特性，结合图 3 所示等效电路图，可以得到表 1 所示 4 种模式下的状态方程为

模式 1：

$$\begin{bmatrix}\mathrm{d}\Delta i_s/\mathrm{d}t\\ \mathrm{d}\Delta u_{f1}/\mathrm{d}t\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-R_f/L_f & 1/L_f\\ -1/C & -k_pU_qU_{max}/\eta C_{f1}U_{f1}^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta i_s\\ \Delta u_{f1}\end{bmatrix} \tag{6}$$

模式 3：

$$\begin{bmatrix}\mathrm{d}\Delta i_s/\mathrm{d}t\\ \mathrm{d}\Delta u_{f1}/\mathrm{d}t\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-R_f/L_f & 1/L_f\\ -1/C & -P_1/\eta C_{f1}U_{f1}^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta i_s\\ \Delta u_{f1}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}-1/L_f\\ 0\end{bmatrix}\Delta u_s \tag{7}$$

模式 2：

$$\begin{bmatrix}\mathrm{d}\Delta i_s/\mathrm{d}t\\ \mathrm{d}\Delta u_{f1}/\mathrm{d}t\\ \mathrm{d}\Delta u_{f2}/\mathrm{d}t\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-R_f/L_f & 1/L_f & -1/L_f\\ -1/C_{f1} & -k_pu_qU_{max}/C_{f1}U_{f1}^2 & 0\\ 1/C_{f2} & 0 & P_2/C_{f2}U_{f2}^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta i_s\\ \Delta u_{f1}\\ \Delta u_{f2}\end{bmatrix} \tag{8}$$

模式 4：

$$\begin{bmatrix}\mathrm{d}\Delta i_s/\mathrm{d}t\\ \mathrm{d}\Delta u_{f1}/\mathrm{d}t\\ \mathrm{d}\Delta u_{f2}/\mathrm{d}t\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-R_f/L_f & 1/L_f & -1/L_f\\ -1/C_{f1} & -P_1/C_{f1}U_{f1}^2 & 0\\ 1/C_{f2} & 0 & P_2/C_{f2}U_{f2}^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta i_s\\ \Delta u_{f1}\\ \Delta u_{f2}\end{bmatrix} \tag{9}$$

根据上述 4 种模式下的状态方程可以得到牵引车功率变化时各模式下的系统极点变化。设再生列车功率 P_1 固定为 3 MW，牵引车功率 P_2 从 2.9 MW 开始减小到 500 kW，系统参数见表 2，各模式下靠近虚轴的极点变化轨迹如图 4 所示。

表 2 再生制动系统仿真电路参数设定

参数	数值
C_{f1}/mF	11
C_{f2}/mF	11
R_f/mΩ	48.3
L_f/mH	5.2
U_{lim}/V	1 720
U_{max}/V	1 800
I_{max}/A	3 000
U_s/V	1 650

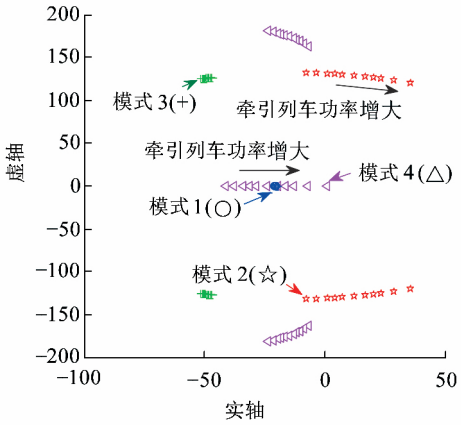


图 4 P_2 变化时的根轨迹

如图 4 所示，模式 2 和模式 4 下可能出现正实部极点。其中，模式 2 下只有当 P_2 较小，极点的实部才是负数，系统在较大功率范围内失稳。低载再生制动工况下，牵引车功率小于再生车功率，模式 4 下网压快速上升，系统将进入模式 1 或者模式 2。只需针对模式 2 进行分析，提升系统稳定性。

2 振荡分析与抑制策略

2.1 模式 2 振荡分析

以再生车逆变器电流变化量 Δi_{inv1} 为输入，再生车支撑电容电压变化量 Δu_{f1} 为输出，不加限流控制时的系统框图如图 5 所示。

图 6 所示为加入限流曲线控制后的系统控制框图。T_d 为逆变器-电机系统闭环控制一次延时；γ 为电机电流和逆变器电流变化量之比。

$$\gamma=\Delta i_{inv1}/\Delta i_{q1}=U_{q1}/U_{f1} \tag{10}$$

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

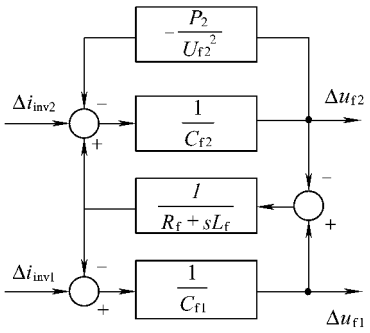


图 5　再生系统开环框图

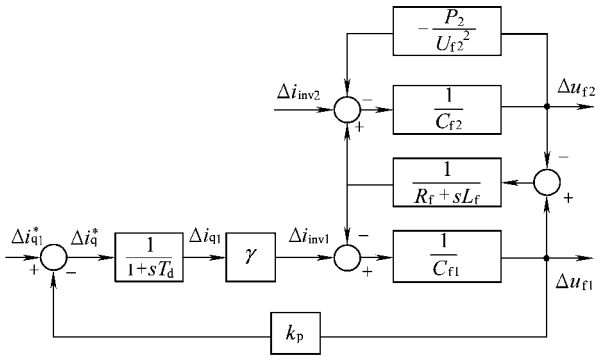


图 6　限流曲线控制下的系统框图

求解图 6 所示系统闭环传递函数

$$G(s)=\frac{A_1s^2+A_2s+A_3}{B_1s^4+B_2s^3+B_3s^2+B_4s+B_5} \tag{11}$$

其中,

$$A_1=\gamma C_{f2}L_fU_{f2}^2$$
$$A_2=\gamma(C_{f2}R_fU_{f2}^2-L_fP_2)$$
$$A_3=\gamma(U_{f2}^2-P_2R_f)$$
$$B_1=T_dC_{f1}C_{f2}L_fU_{f2}^2$$
$$B_2=T_d(C_{f1}C_{f2}RU_{f2}^2-C_{f1}L_fP_2)+C_{f1}C_{f2}L_fU_{f2}^2$$
$$B_3=T_d(C_{f1}U_{f2}^2+C_{f2}U_{f2}^2-C_{f1}P_2R_f)+(C_{f1}C_{f2}R_fU_{f2}^2-C_{f1}L_fP_2)+k_p\gamma C_{f2}L_fU_{f2}^2$$
$$B_4=-T_dP_2+(C_{f1}U_{f2}^2+C_{f2}U_{f2}^2-C_{f1}P_2R_f)+k_p\gamma(C_{f2}R_fU_{f2}^2-L_fP_2)$$
$$B_5=-P_2-k_p\gamma P_2R_f$$

根据传递函数绘制系统 Bode 图,如图 7 所示,系统的共振频率为 130 rad/s,约为 20.69 Hz,与 L_fC_{f1} 谐振频率接近。

综上所述,在限流控制下系统会出现固定频率振荡,需要设计能够稳定运行的再生控制器。

2.2　振荡抑制策略

低载再生系统中,再生车的逆变器输出功率 P_1 大于牵引车逆变器输入功率 P_2,依据式(4)、式(5)所示列车牵引工况、再生工况逆变器特性,系统特性如图 8 所示。

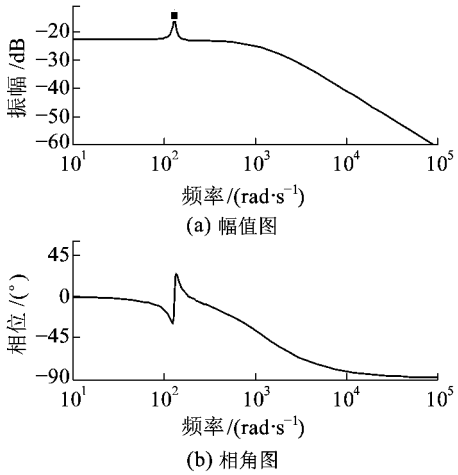


图 7　限流曲线控制下的系统 Bode 图

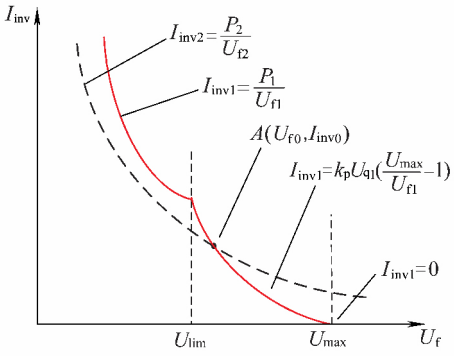


图 8　系统稳态特性

图 8 中,实曲线为再生车特性曲线,虚曲线为牵引车特性曲线,两者交点为系统功率平衡点。$U_{lim}<U_f<U_{max}$ 的限流控制区内,再生车输出随其直流侧电容电压上升而快速下降,当电容电压达到 U_{max} 时输出为 0。因此在限流控制区域中存在一个平衡点(U_{f0}, I_{inv0}),其坐标为

$$\begin{cases}U_{f0}=U_{max}-\dfrac{P_2}{k_pU_{q1}}\\ I_{inv0}=\dfrac{k_pU_{q1}P_2}{k_pU_{q1}U_{max}-P_2}\end{cases} \tag{12}$$

根据式(12)可知,平衡点坐标受 U_{q1}、P_2 影响,即当再生车速度、牵引车功率等系统参数改变时,该平衡点也将改变。实际系统中 U_{q1}、P_2 等参数变化相对较慢,可以根据计算得到稳态平衡点坐标,在此平衡点附近设计稳定的基于线性近似的控制器。

从前文分析可知,在限流曲线控制下,系统工作在模式 2 时存在不稳定的情况。本文将图 6 所示限流曲线控制中的比例控制替换为 PI 控制器 $C(s)$。基于前

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

文建立的系统模型，可以得到加入 PI 控制器 $C(s)$ 后的闭环传递函数框图，如图 9 所示。其中，$U_{\lim}<u_{\mathrm{ref}}<U_{\max}$，$u_{\mathrm{ref}}$ 是 PI 控制下的限流闭环控制起始点电压。

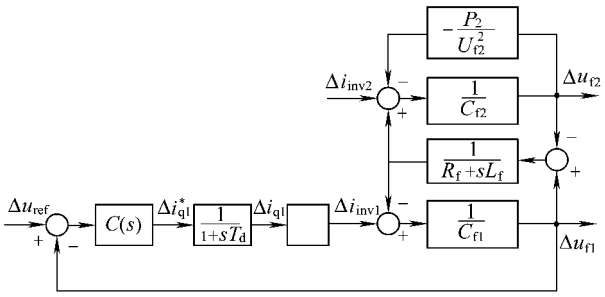


图 9 振荡抑制框图

图 9 所示系统不包含 $C(s)$ 的开环传递函数为

$$P(s)=\frac{\gamma(C_{f2}Ls^2-L\alpha s+1)}{(1+sT_d)(C_{f1}C_{f2}Ls^3-C_{f1}L\alpha s^2+(C_{f1}+C_{f2})s-\alpha)} \tag{13}$$

$P(s)$ 的零极点分布图如图 10 所示。

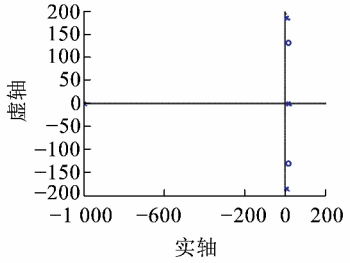


图 10 $P(s)$ 的零极点分布图

根据图 10 所示零极点分布可知，系统传递函数的基本形式为

$$P(s)=K\frac{1}{(1-sT)}\frac{1}{(1+sT_d)}\frac{(\frac{s}{\omega_a}+\xi_1)^2+\beta_1^{-2}}{(\frac{s}{\omega_r}+\xi_2)^2+\beta_2^{-2}} \tag{14}$$

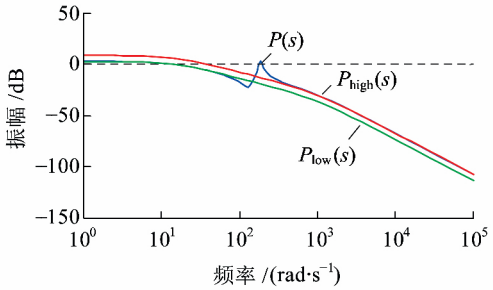
式中：$C=\frac{C_{f1}C_{f2}}{C_{f1}+C_{f2}}$；$\omega_a$ 为系统反共振频率，$\omega_a^2=\frac{1}{LC_{f2}}$；$\omega_r$ 为系统共振频率，$\omega_r^2=\frac{1}{LC}$；$K=-\frac{1}{C_{f1}}\frac{\omega_a^2}{\omega_r^2}T$。

令 $s=\mathrm{j}\omega$，当 $\omega\to0$ 时，$\frac{(\frac{s}{\omega_a}+\xi_1)^2+\beta_1^{-2}}{(\frac{s}{\omega_r}+\xi_2)^2+\beta_2^{-2}}$ 可以近似为 1；$\omega\to\infty$ 时，可近似为 $\frac{\omega_r^2}{\omega_a^2}$。可以得到简化后的低频域和高频域开环传递函数为

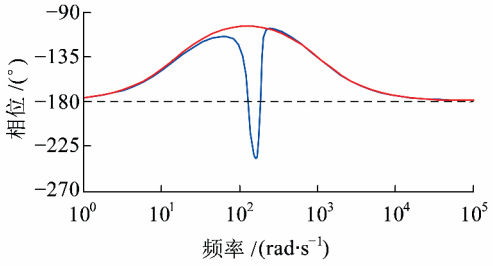
$$P_{\mathrm{low}}(s)=\frac{\gamma}{T_d(C_{f1}+C_{f2})}\frac{1}{(s-\frac{1}{T})}\frac{1}{(s+\frac{1}{T_d})} \tag{15}$$

$$P_{\mathrm{high}}(s)=\frac{\gamma}{T_dC_{f1}}\frac{1}{(s-\frac{1}{T})}\frac{1}{(s+\frac{1}{T_d})} \tag{16}$$

图 11 对比了 $P_{\mathrm{low}}(s)$、$P_{\mathrm{high}}(s)$ 和 $P(s)$ 的 Bode 图。



(a) 幅值图



(b) 相角图

图 11 $P(s)$，$P_{\mathrm{low}}(s)$，$P_{\mathrm{high}}(s)$ Bode 图对比

如图 11 所示，除反共振与共振频率附近频域外，$P_{\mathrm{low}}(s)$ 能够反映出 $P(s)$ 在低频域的特性，而 $P_{\mathrm{high}}(s)$ 能够反映出 $P(s)$ 在高频域的特性，因此 $P(s)$ 可以用 $P_{\mathrm{low}}(s)$ 与 $P_{\mathrm{high}}(s)$ 拟合，并以之作为设计控制器的依据。上述近似成立的原因在于模式 2 中 L_f 的低频域抗阻非常小，低频域下可以将 L_f 视为短路状态，而在高频域视为开路状态；低频域 C_{f1} 与 C_{f2} 并联，在高频域时只有 C_{f1}。

从传递函数可以看出 $P_{\mathrm{low}}(s)$ 和 $P_{\mathrm{high}}(s)$ 均由两个惯性环节串联而成，在低频段以非最小相位的惯性环节为主导，高频域以最小相位惯性环节为主导。中频域的 $P(s)$ 也即反共振至共振附近的区域，其相位穿越 −180°的线。此处共振增益变大，会对系统稳定性造成影响。根据串联综合校正法对开环函数进行校正，以期望得到-2-1-2 型的开环对数幅频特性[11]，来规范化和简单化系统特性并以该特性下所能取得的最佳特性来确定参数。

按照上述简化后的开环传递函数进行校正，可以得到 $P_{\mathrm{high}}(s)$ 在对应形式下的 PI 控制器参数为

$$\begin{cases}k_p=\dfrac{C_{f1}}{2\gamma T_d}\\ k_i=\dfrac{C_{f1}}{8\gamma T_d^2}\end{cases} \tag{17}$$

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

校正后的系统闭环传递函数为

$$G_c(s)=\frac{G_{o1}(s)\dfrac{\gamma}{T_d(s+\dfrac{1}{T_d})}(k_p+\dfrac{k_i}{s})}{1+G_{o1}(s)\dfrac{\gamma}{T_d(s+\dfrac{1}{T_d})}(k_p+\dfrac{k_i}{s})} \tag{18}$$

如前文所述，牵引功率 P_2 影响平衡点处的电压 U_{f0}。因此，在校正后的闭环传递函数中，按照表 2 中的参数，改变 P_2 进行仿真。图 12 是 P_2 分别为 0.5、1、1.5、2、2.5 MW 时绘制的系统 Bode 图。

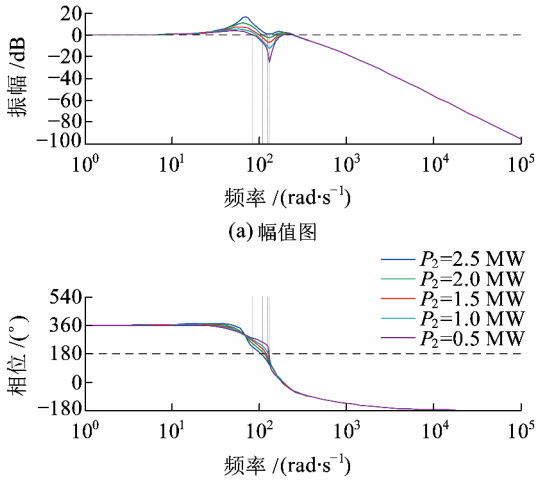


图 12　$G_c(s)$ Bode 图

如图 12 所示，校正后的系统增益在共振频率附近也是控制在一定范围内的，系统特性在高频域同样不存在峰值，从而能够稳定运行。此外，控制器设计时并没有使用作为负载的牵引列车的参数，即本文所提再生系统稳定控制结果不受牵引列车参数变化的影响。共振频率与设计不同时，也不影响再生系统稳定控制结果。

综上所述，本文提出的 PI 控制器以及控制参数设计方法能够提升系统稳定性。

3　抑制策略实验验证

为了模拟前文所述的单区间再生系统，本文实验采用两个电机控制平台分别模拟一个供电区间内的再生列车和牵引列车。

实验平台一：再生列车由对拖永磁同步电机平台进行模拟，其控制器为 DSP28335。平台实物图如图 13 所示。

实验平台二：牵引列车以带测功机为负载的永磁同步电机模拟，其依托 Myway 平台进行控制。平台实物如图 14 所示，通过测功机控制器可以对电机负载功率进行控制。

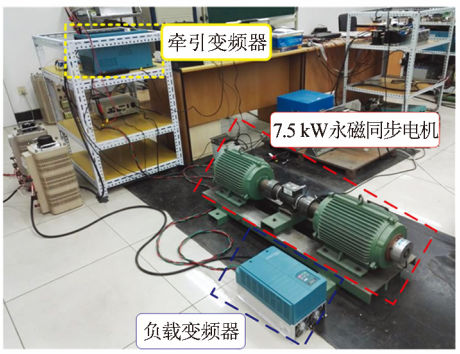


图 13　再生列车模拟平台

图 14　牵引列车模拟平台

再生车模拟平台牵引侧变流器的直流侧与牵引车模拟平台的变流器直流侧进行并联，以并联的直流侧模拟直流供电网，并在两者的直流侧之间串入滤波电感 L_f。实验中，再生列车模拟平台以固定转速运行，转速由负载侧电机控制，负载侧电机输出转矩为正，为平台提供能量；再生列车模拟平台牵引侧电机电流闭环控制，交轴电流指令为负，输出转矩为负，进行再生制动。再生制动能量通过并联的变流器直流侧提供给牵引列车模拟平台。牵引列车模拟平台的电机消耗一定功率，运行在牵引工况。实验平台参数见表 3。

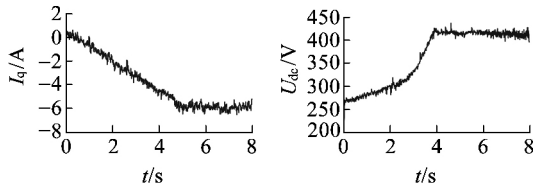
表 3　实验平台关键参数

参数名称	参数值
再生列车模拟电机额定功率/kW	7.5
牵引列车模拟电机额定功率/kW	5.5
滤波电感/mH	55
再生侧支撑电容/mF	3.3
牵引侧支撑电容/mF	1.8

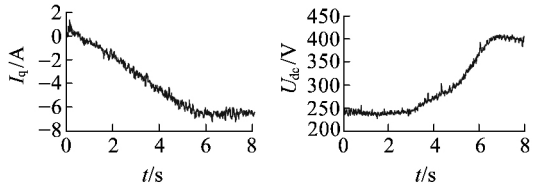
考虑实验平台电压等级，实验时选择限流控制的

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

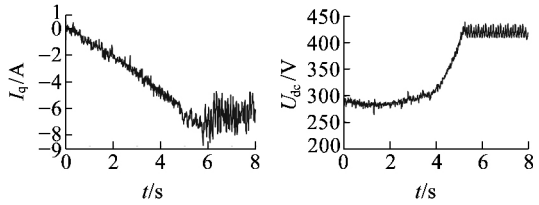
起始电压 U_{lim} 为 400 V，限流曲线电压最大值 U_{max} 为 450 V，牵引列车模拟平台功率 P_2 取 300、600 和 900 W，实验结果分别对应图 15 中的(a)、(b)、(c)图。P_2 为 300 W 和 600 W 时，再生制动模拟电机能够稳定运行。P_2=900 W，模拟的直流网压 U_{dc} 和再生制动模拟电机转矩电流 i_q 出现振荡，振荡发生在恒功率再生制动时。电流振荡幅值约为±1.5 A，电压振荡幅值约为±10 V。



(a) P_2=300 W



(b) P_2=600 W

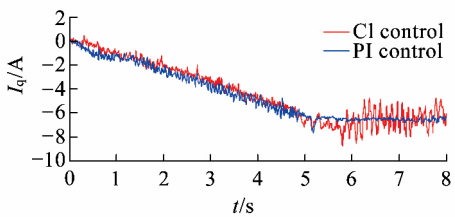


(c) P_2=900 W

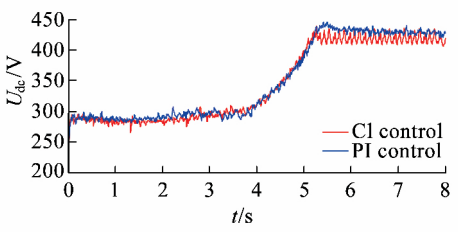
图 15 限流曲线控制下的 U_{dc} 和 I_q 波形

图 15(c)中振荡频率约为 9 Hz，根据电容电感参数可以得到系统的共振频率为 11.8 Hz。实际振荡频率和理论计算较为接近。

如前文所述，P_2=900 W 时，系统出现振荡而不稳定，因此在 P_2=900 W 条件下开展振荡抑制实验。选取直流侧电压闭环控制起始点 U_{ref}=430 V。振荡抑制效果如图 16 所示。图 16 中，CL control 代表限流曲线控制，PI control 代表基于 PI 控制器的电压闭环控制。



(a) I_q 波形



(b) U_{dc} 波形

图 16 I_q 和 U_{dc} 波形对比图

根据图 16 所示结果，采用基于 PI 控制器的电压闭环控制时，系统在 P_2=900 W 时也变得稳定，而且 U_{dc} 与设定的电压指令值 U_{ref}=430 V 基本一致。实验验证了本文系统稳定控制方法的有效性。

4 结束语

本文针对城轨列车再生制动时，限流曲线控制下直流网压、电机电流振荡现象进行建模分析与稳定控制。

按照系统限流的关键电气量进行工作模式分类。展开系统功率特性分析，建立小信号模型，判断各工作模式的稳定性。

根据所建立的再生制动模型进行解析，在功率平衡点附近进行线性化处理，得到系统小信号模型下的传递函数。提出利用 PI 控制器进行稳定控制，并给出关键控制参数的设计方法，结合系统 Bode 图验证了振荡抑制策略下系统的稳定性。

抑制策略实验模拟了单区间再生系统，并结合理论分析设计了实验方案。通过改变牵引列车模拟平台功率，再现了再生制动振荡现象。根据振荡抑制实验结果，采用本文提出的基于 PI 控制器的电压闭环控制与相应的参数设计方案能够达到抑制振荡的效果，保证系统稳定性。

参考文献：

[1] WANG B, YANG Z P, LIN F, et al. An Improved Genetic Algorithm for Optimal Stationary Energy Storage System Locating and Sizing[J]. Energies, 2014, 7: 6434-6458.

[2] 贾兆欣. 城轨列车再生制动节能与振荡抑制研究[D]. 北京：北京交通大学，2016.

[3] YUSIVAR F, UCHIDA K, KIHARA T, et al. An Anti Oscillation Strategy for the Regenerative Braking Control of Permanent Magnet Synchronous Motor with Insufficient Load Power Consumption[C]//The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. New York: IEEE, 2001: 1457-1462.

[4] SAITO T, KONDO K, KOSEKI T. An Analytical Design Method for a Regenerative Braking Control System for DC-

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

electrified Railway Systems under Light Load Conditions [J]. IEEJ Transactions on Industry Applications, 2012, 132 (2): 268-277.

[5] ASANO J. A Damping Control Method to Enhance Regenerative Brake Power under Light Consumption Load Conditions. Industrial Electronics Society[C]//IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE. New York: IEEE, 2013: 4516-4521.

[6] SUDHOFF S D, CORZINE K A, GLOVER S F, et al. DC Link Stabilized Field Oriented Control of Electric Propulsion Systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1998, 13(1): 15-22.

[7] 林文立,刘志刚,孙大南,等. 地铁牵引系统的稳定性提升控制[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(2): 56-61.
LIN Wenli, LIU Zhigang, SUN Danan, et al. Stability Improvement Control for Metro Traction Drive System[J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(2): 56-61.

[8] 孙大南,刘志刚,林文立,等. 地铁牵引变流器直流侧振荡抑制策略研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(8): 52-57.
SUN Danan, LIU Zhigang, LIN Wenli, et al. Research on DC-Link Oscillation Suppression Strategy in Metro Traction Converter[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(8): 52-57.

[9] 赵雷廷,刁利军,董侃,等. 地铁牵引变流器-电机系统稳定性控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 101-107.
ZHAO Leiting, DIAO Lijun, DONG Kan, et al. Stabilization Control for Metro Traction Converter-Motor System[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28 (6): 101-107.

[10] 方晓春,钟志宏,杨中平,等. 阻抗不匹配引起的逆变器-IPMSM 系统直流侧振荡抑制方法对比[J]. 电工技术学报, 2017, 32(12): 50-58.
FANG Xiaochun, ZHONG Zhihong, YANG Zhongping, et al. Comparative Research on DC Side Oscillation Suooression Methods for Inverter-IPMSM System Caused by Impedance Mismatch [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 50-58.

[11] 胡寿松,自动控制理论[M]. 5 版. 北京:科学出版社, 2007: 265-270.

(责任编辑　聂清立)

中国科协发布 12 个领域的 60 个重大科学问题和工程技术难题

2018 年 5 月 27 日,中国科协在第 20 届中国科协年会闭幕式上发布了 2018 年 60 个重大科学问题和工程技术难题。

2018 年 1 月起,中国科协通过所属全国学会及学会联合体,面向广大科技工作者,委托中科院文献情报中心组织开展了“中国科协 2018 年重大科学问题和工程技术难题征集活动”。

征集围绕十九大报告关注的重点领域、《“十三五”国家社会发展科技创新规划》等,确定了数理化基础科学、信息科技、智能制造、生命科学、先进材料、能源环境、农业科技、公共安全、交通运输、空天科技、地球科学、医学与健康等 12 个学科及技术领域。

征集活动得到了全国学会、学会联合体的大力支持和科技工作者的热情响应。共有 76 家全国学会、学会联合体积极参与,700 多位科技工作者参与撰写,1 142位专家学者参与推荐,2 142 名科研一线科学家参与初选,54 名学科领军专家参与复选,33 名战略科学家参与终选,最终遴选出 60 个重大科学问题和工程技术难题。

其中,在交通运输类 6 个获选项目中,中国铁道学会入选 3 个,分别为“基于北斗卫星和 5G 通信技术的新型高速铁路列车运行控制技术”“高原高寒冻土地区高速铁路与公路修建关键技术”“时速 1 000 km 及以上低真空管道运输高速磁悬浮铁路建造关键技术”。

一、地球科学

01　超高精度量子惯性导航技术(中国测绘地理信息学会)

02　空间天气的及时准确预报(中国空间科学学会)

03　岩石圈构造应力场及其作用过程(中国岩石力学与工程学会)

(下转第 74 页)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net