

牵引供电系统次谐振抑制技术的研究

针对铁路牵引供电系统中频繁发生的牵引供电系统低频次谐振现象，首先建立了牵引供电系统及电力机车的数学模型，利用数学模型分析了系统发生谐振的机理；其次针对谐振问题给出了依靠机车自身控制抑制振荡的解决方案，提出了在机车网侧整流器中加入振荡抑制环节的方法；最后通过仿真验证了该方法的效果。

于 姗¹ 荆 龙¹ 金新民^{1,2}/1. 北京交通大学国家能源主动配电网技术研发中心 2. 北京电动车辆协同创新中心

0 引言

近年来，我国在电气化铁路领域得到了飞速的发展，电力机车的投入量迅速增加，机车的应用变得越来越广泛，随之而来也出现了一些牵引网与机车发生次谐振的问题，在我国发生次谐振的一些实际案例中，大多是多辆机车并同一处在升弓准备时发生谐振，此谐振频率通常在3~7 Hz之间^[1]，我国首例振荡现象是2007年在湖东机务段，后来在上海南翔动车所、青岛动车所和徐州铁路枢纽等多地发生了振荡现象，这类问题一旦发生容易使牵引系统封锁，从而失去牵引力，严重威胁牵引供电的安全稳定运行，会导致非常严重的后果。而目前这一问题的研究仍处于初级阶段，该类问题亟待解决。

针对牵引系统的抑制次谐振现象，文献[1]介绍了振荡分析方法，提出了修改整流器结构和控制参数抑制振荡的措施，以及增加功率振荡抑制环节等措

施，同时也可以牵引网侧减小线路阻抗或者增大变压器电容容量，最终达到抑制谐振的目的，但是该文章并没有进行详细的研究验证。文献[2]对国外发生的单相低频振荡现象进行分析，事故振荡频率为16.7 Hz，指出传统的PI控制没有涉及到通过改变变流器控制的方法使机车稳定运行，所以导致了低频振荡的发生，并进一步提出了采用改变影响稳定性的变量控制策略来抑制系统低频振荡。文献[3]针对四象限变流器建立小信号分析模型，考虑牵引网阻抗的影响，利用Nyquist稳定判据得出了列车同时运行出现低频振荡现象时的列车数量极限值和变流器控制参数的稳定区域。文献[4]主要是对低频振荡分析方法作了介绍，并提出抑制振荡的要点是增加系统阻尼。文献[5]提出动态电压补偿的方法，并指出可以将补偿装置等效成一电流源达到抑制振荡的效果。文献[6]提出了在PWM控制环节上修改控制参数来解决振荡的策略，并在实际中得到应用，2008年西门子技术人员到现场修改参数后使多台机车不再振荡，这一方案简单经济可行。

本文主要是对牵引系统建立数学模型，并对系统次谐振问题的机理进行分析，根据谐振发生的原因提出了抑制次谐振的措施：①修改机车侧控制参数；②在变流器控制装置中增加功率振荡阻尼器POD来抑制振荡。重点是利用在机车网侧整流器控制策略中增加POD环节来验证抑制的方法，最后利用仿真验证了该方法的效果。



于 姗/硕士研究生

关键词/Keywords

牵引供电·
电力机车·
谐振抑制·

本项目受国家能源应用技术研究及工程示范项目：基于分层储能的主动配电网关键装备研制(NY20150302)资助。

1 牵引供电系统建模

牵引网供电部分等效成理想电压源与线路上的阻抗串联，变流器和负载支路一并接入受电端，整个牵引供电系统的结构如图1所示。

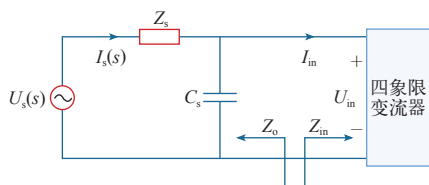


图1 牵引供电系统结构拓扑

图中， U_s 为电网侧理想电压源； Z_s 为电网线路上的等效阻抗； C_s 为电网线路上的对地电容； Z_o 为从分布电容向电网侧看过去的等效输出阻抗； Z_{in} 为从分布电容向变流器侧看过去的等效输入阻抗； I_s 为流过电网线路上的电流； I_{in} 为机车变流器的输入电流。

牵引网参数如表1所示。

表1 牵引网参数

牵引变压器容量/MW	变压器等效阻抗	线路长度/km	线路单位阻抗
12.5	$0.395 + 7.52j$	10	$0.08 + 0.12j$

根据PWM控制原理，一般采用双环控制方式（即内环电流控制外环电压控制的方式），在机车中变流器大多采用了瞬态直接电流控制策略^[7]。所以机车侧变流器的控制采用瞬态电流控制方法，具体控制原理如图2所示，瞬态电流对应的数学模型是

$$u_{ab}(t) = u_N(t) - I_N^*(R_N \sin \omega t + \omega L_N \cos \omega t) - K[I_N^* \sin \omega t - i_N(t)] \quad (1)$$

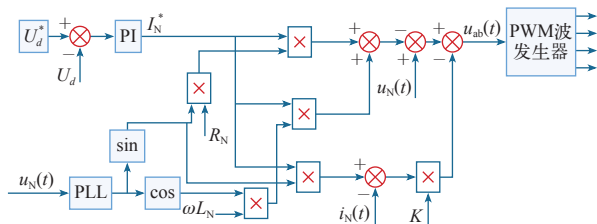


图2 电力机车网侧变流器控制原理

2 次谐振机理分析

在一个理想的并网系统中，当电网阻抗无穷小且不考虑电网电压谐波时，系统输出电流主要

由逆变器输出电流决定，并网系统不存在谐波振荡现象。但是在实际情况中，由于受电网传输线缆等参数的影响，电网阻抗并不为零，因此电网阻抗与逆变器输出阻抗在频域上会出现交点。如果电网阻抗过大或逆变器控制参数设计不合理，则有可能由于过小的相角裕度造成特定次谐波振荡，导致并网系统不稳定。在变流器应用到机车中的工况下，可以利用阻抗比判据的分析方法，判断变流器与电网之间级联后系统的稳定性。电网和机车两模块的级联，即多台机车并联在同一供电臂下，这种多个相同或者不同模块之间的并联使得供电系统出现不稳定的工况。稳定性问题表现在各机车模块在单独运行时都能正常运行，一旦多台机车并联，整个系统就会出现振荡，严重的还可能引起机车封锁。多台机车并联时，由于每台机车自身参数不同，会通过耦合来影响其他机车的运行。

牵引网中的次谐振是在多台机车静置升弓的工况下发生的，因为单台机车运行时，系统是稳定的，牵引逆变器输出负载电流很小，所以次谐振不是由机车的逆变器和电动机模块引起。牵引网和机车变流器是引起次谐振的主要因素，牵引网中考虑到地电容，故当机车和牵引网的阻抗达到一定条件构成谐振回路时，会发生次谐振现象，因此牵引网的参数是导致次谐振的主要因素之一。机车侧变流器等效成电流源与纯阻性负载的并联，在正常工况下，直流侧发生频率在3~5 Hz波动，与多台机车并联时电压波动频率大约为中心频率3.4 Hz，由四象限变流器控制的参数和牵引网参数不匹配引起，所以四象限变流器的参数也是影响谐振的主要因素之一。因此，可以得到牵引网与机车组成的系统发生次谐振是由于四象限脉冲整流器控制参数和牵引网参数不匹配造成的。

3 次谐振抑制方法

针对牵引供电系统中低次谐振的现象，可以从牵引线路上采取措施，如减小线路阻抗或增加变压器容量，但这些都需增加硬件设施，并不是十分经济，所以可以从机车侧采取一些措施，

更加经济有效。

3.1 修改控制参数

以HXD2型机车为例，主要由网侧变流器和逆变器组成，网侧变流器主要由IGBT功率模块组成，机车的输入阻抗即为网侧变流器的输入阻抗。机车侧变流器采用瞬态电流控制策略，可等效成外环电压环控制内环电流环控制的双环控制结构，控制框图如图3所示。

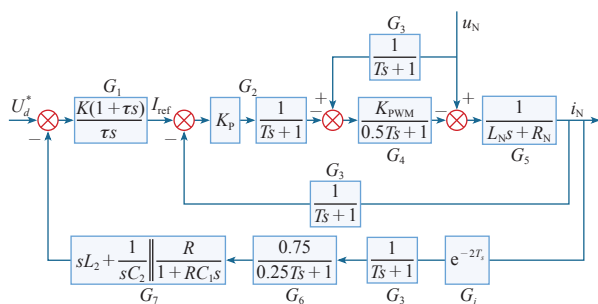


图3 双环控制框图拓扑结构

图中， U_d^* 为直流侧给定电压； K 为PI调节中比例放大系数； τ 为比例积分环节系数之比； C_1 为直流侧支撑电容； R 为直流侧负载电阻； T 为开关周期； T_s 为采样周期。

考虑电压环后的机车阻抗传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{Z_p(s)} = \frac{G_5 - G_3 G_4 G_5}{1 + G_2 G_3 G_4 G_5 + G_1 G_2 G_3 G_4 G_5 G_6 G_7 G_8} \quad (2)$$

由于电流环动态响应快，主要影响高频段的特性；电压环时间常数大，动态响应慢，所以电压环的参数影响低频段的稳定性。而电压环中涉

及到的参数主要是负载侧电阻 R 、直流侧支撑电容 C_1 、比例放大系数 K 及采样周期 T_s 的值，直流侧支撑电容值越大（即容抗越小），电容充放电所需时间越长，积分电路充放电越慢，继而电流反馈到电压侧所用的时间就越长。由此可知，改变支撑电容的方法不经济，负载电阻很大接近空载，采样周期不变，那么主要影响作用的是比例放大系数 K ，针对改变比例放大系数 K 值大小画出Bode图，具体如图4所示。

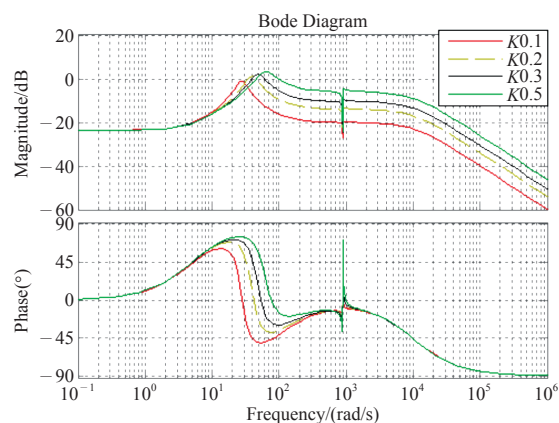


图4 不同比例放大系数的影响

所以变流器PWM控制环节中的电压环放大系数 K 值对振荡调节起着很大作用，能够改变车网系统的稳定性。由图4可知，比例放大系数 K 值越大，系统越不稳定。

所以可以通过调节变流器参数来改变振荡，其中图3中的部分参数如表2所示。

表2 系统模块参数的取值

电网侧阻抗参数			变流器控制侧参数						
等效电感	等效电阻	对地电容	L滤波电感	采样周期	桥路增益	对地电容	电流环比例系数	电压环比例系数	空载时负载电阻
L_e/mH	R_e/Ω	$C_g/\mu\text{F}$	L_f/mH	T_s/s	K_{PWM}	C_d/mF	K_p	K	R/Ω
1.9	0.05	10	2	10^{-5}	0.75	5	8	K_p	20

3.2 增加POD控制环节

在机车变流器控制中增加功率振荡阻尼（POD）环节，其设计原理是网压滞后网流并处于低谷时，应增大电流的无功分量，使机车增加容性电流的吸收；网压超前网流并处于峰值时，减小电流的无功分量，使机车增加感性电流的吸收，从而达到稳定网压、抑制振荡的作用。其原理是使机

车给定功率的增加或减小趋势跟随网压的增加或减小趋势变化，避免机车出现相位相反的情形。

考虑无功时，单相网压和网流信号可表示为

$$\begin{aligned} e &= E \sin \omega t \\ i &= I \sin (\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (3)$$

式中， $I = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$ ； φ 为网流超前网压的相角，

$$\varphi = \arctan \frac{i_q}{i_d}。$$

由于所加环节输入的是网压幅值,输出的是无功电流参考值 i_q ,在瞬态电路控制中加入无功电流控制环节,则可以达到抑制谐振的效果。POD环节包含测量环节、滤波器、PI调节及限幅环节。放大器以及限幅环节保证无功电流的调整足够影响电压大小且不会过大,控制框图如图5所示。

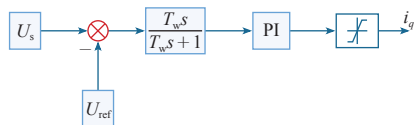


图5 POD控制环节

由于测量延迟环节,所用时间可取为0.02 s的一阶惯性环节,所以POD传递函数为

$$G = \frac{1}{0.02s+1} \times \frac{T_w s}{T_w s+1} K_p \quad (4)$$

依据式(4)画出Bode图,如图6所示。

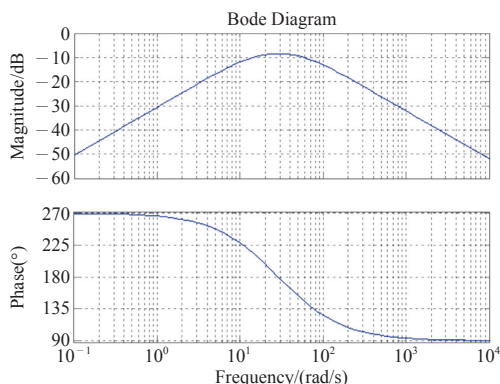


图6 POD控制环节传递函数的bode图

由图6可以看出,在低频段调节时该模块的相位与测量值是反相的,与设计思路中在网侧电压到达低谷时,增大无功电流的大小这一原理相吻合。

加入POD环节后瞬态电流变为

$$u_{ab}(t) = u_N(t) - I[R_N \sin(\omega t + \varphi) + \omega L_N \cos(\omega t + \varphi)] - K[I_N^* \sin(\omega t + \varphi) - i_N(t)] \quad (5)$$

POD环节根据每台机车网压实测值与额定值比较后的差值再经过PI调节器得到无功电流,再反馈到机车的变流器双环控制环节中,从而对电流幅值与相位作出重新调整,使变流器能够对无

功环节作出吸收或释放的幅值与相位调节,同时使无功能量能够得到充分的调节,从而减小线路上电容容量饱和、无功能量在线路上引起振荡的发生。

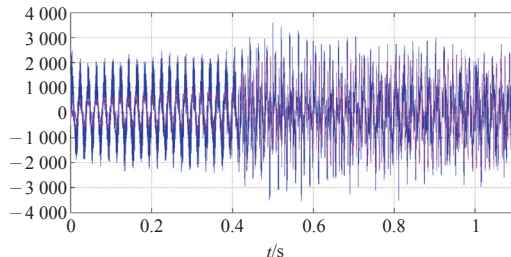
在机车变流器侧加入无功电流控制环节后,对网侧电压谐振有一定的抑制作用,变流器本身可以发出或者吸收无功,利用这一特性对线路上阻抗元件容量的吸收和释放能起到补偿的作用。功率振荡阻尼环的控制环节加入后,系统稳定性的判断也可利用阻抗比判据来判定。

4 仿真实验

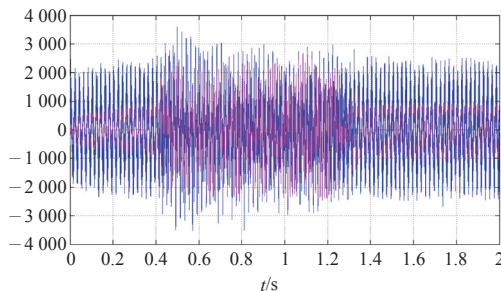
在多台机车并联的工况下,对单台机车的网压网流仿真波形进行观察并分析。

4.1 修改变流器参数仿真结果

在多台机车并联的工况下, K 值改变,在Simulink中仿真出电网侧的电压和电流波形, $K=5$ 时网压网流仿真波形如图7所示。

图7 $K=5$ 时网压网流仿真波形

改变 K 的振荡抑制效果如图8所示。其中粉色曲线是网侧电流,由图8可知,在 $t=1.3$ s时,将增益由不稳定区域 $K=5$ 变为稳定区域内的 $K=3$,可以看到波形由振荡变为稳定的状态,说明修改比例参数可以抑制振荡,使系统恢复稳定。

图8 改变 K 的振荡抑制效果

通过改变变流器的控制参数来抑制谐振,使 K 在稳定区域内,系统恢复稳定。这种方法更加简单经济有效,所以优先采用改变参数的方法来抑制谐振,从而提高系统的稳定性,这种调节控制参数的方法已经在实际中得到应用。

4.2 加入POD控制环节仿真结果

在多台机车并联工况下,单台机车均加入控制无功电流后,在1 s时启动POD控制,POD加入后并网电流波形、直流侧电压波形如图9、图10所示。

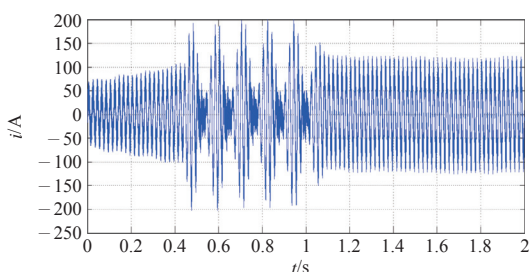


图9 POD加入后并网电流波形

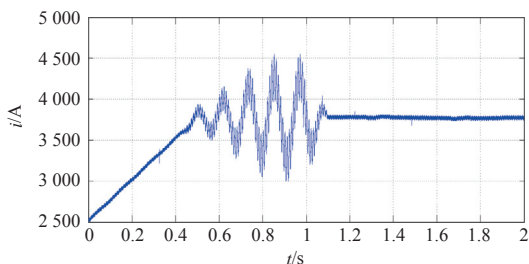


图10 POD加入后直流侧电压波形

由图可知,在1.1 s时网压网流本应振荡,但由于POD控制环节的增加,使系统恢复稳定运行的状态,这种方法能够有效抑制振荡。

5 结束语

对于我国电气化铁路多台机车并联发生次谐

振的现象,机车内部控制与网侧阻抗对牵引供电次谐振有一定的影响。通过改变控制器参数值(即减小电压环比例放大系数 K 的值),将系统的不稳定性增益变小,从而提高系统稳定性。在机车的控制环节增加功率振荡阻尼,该环节能够吸收阻尼振荡电流,实时改变无功能量的吸收与释放,进而增加系统的稳定性,达到抑制振荡的效果。

参考文献

- [1] 王晖,吴命利.电气化铁路低频振荡研究综述[D].北京:北京交通大学,2015.
- [2] Bartelt R, Heising C, Staudt V. Improvement of low-frequency system stability in 16.7-Hz railway-power grids by multivariable line-converter control in a multiple traction-vehicle scenario [J]. Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), 2010: 1-6.
- [3] 韩智玲,唐蕾,李伟.交流传动电力机车车网电压不稳定的原因分析与解决[J].铁道学报,2011,33(10):25-28.
- [4] 陈允平,孙婉胜,张海梁,等.低频振荡分析和控制方法的研究[D].武汉:武汉大学,2007.
- [5] 陈家良.基于瞬时无功的动态电压波动补偿器研究[D].上海:上海交通大学,2012.
- [6] 郑琼林.交流传动HXD1电力机车谐振原因分析与对策[D].北京:北京交通大学,2009.
- [7] 龚小燕.牵引供电系统低频振荡机理研究与抑制措施[D].成都:西南交通大学,2014.

(收稿日期:2016-02-22) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告