

基于比例谐振控制的弓网低频振荡抑制方法研究

李金池, 姚大顺, 张 林

(中车大连电力牵引研发中心有限公司, 辽宁 大连 116041)

摘要: 同一供电臂下多台电力机车或多列动车组引起的弓网低频振荡问题一直是铁路供电与牵引控制领域较为棘手的问题。结合单相四象限整流器比例谐振控制器设计方法和弓网低频振荡机理分析, 提出了一种抑制弓网低频振荡的方法。其重点是对基于比例谐振控制的单相四象限整流器算法模型进行改进, 消除一拍延迟环节, 改善控制器阻尼比, 并进行了仿真验证与实车验证。验证结果显示改进后的比例谐振控制算法有效改善单相四象限整流器电流调节性能, 并在抑制弓网低频振荡方面表现出较好的效果。

关键词: 比例谐振; 弓网低频振荡; 单相四象限整流器; 控制算法

Low frequency oscillation suppression method of pantograph catenary based on PR control

LI Jinchi, YAO Dashun, ZHANG Lin

(CRRC Dalian Electric Traction R&D Center Co., Ltd. ,Dalian 116041, China)

Abstract: The low-frequency oscillation of pantograph catenary caused by electric locomotives or EMUs under the same Power-supply arm has always been a thorny problem in the field of railway power supply and traction control. The paper designed Proportional-resonant (PR) controller of Single-phase Rectifiers, analysed the principle of low-frequency oscillation of pantograph catenary, presented several solutions for the low-frequency oscillation. Then improved Proportional-resonant (PR) controller of Single-phase Rectifier ,eliminated one beat delay that exits in control algorithm, as a solution for the low-frequency oscillation, Simulation tests were carried out to prove this improvement , and the real experimental of the train also presented a good result. Improvement of Proportional-resonant (PR) control algorithm of Single-phase Rectifier perform better in regulation of input current,and provides a better method for low frequency oscillation Suppression.

Key words: proportional-resonant; low-frequency oscillation of pantograph catenary; single-phase rectifier; control algorithm

0 引言

随着我国高速动车组与重载货运机车技术不断发展, 电气化铁路上的长编组列车数量越来越多。随着同一供电臂下机车与动车数量增多, 弓网间极易产生高频谐振与低频谐振故障。通过

调整载波移相策略改变列车等效开关频率, 解决高频谐振问题, 但低频谐振频率通常在50 Hz以下, 伴随车载变流器输入电流与中间电压的波动, 需要调整调试变流器控制参数, 且效果不易验证。我国铁路上的HXD1、HXD2和HXD3

等主要货运车型都发生过10 Hz以下低频振荡事故，CRH1、CRH5动车组也曾发生低频振荡现象。弓网低频振荡与高频振荡不同的是，高频振荡可以通过调整载波移相策略，改变牵引网侧谐波分布的方式，弓网低频振荡由于振荡频率较低，不能通过调整载波移相解决。

文献[1-3]介绍了自抗扰的控制策略在抑制弓网低频振荡上的研究；文献[4-5]从车网耦合阻抗角度出发分析弓网低频振荡机理，并提出改变牵引系统控制参数抑制弓网低频振荡的方法；文献[6]建立了低频振荡时谐波分析方法；文献[7]在分析车网耦合系统基础上，提出了四象限整流器主动阻尼补偿措施抑制低频振荡现象。

本文从单相四象限整流器控制角度出发分析弓网低频振荡机理，在基于比例谐振控制的四象限整流器控制算法基础上提出解决措施，重点对原有的比例谐振控制算法进行改进，消除了传统四象限变流器控制上存在的一拍延迟，并进行了离线模型下的仿真验证与实车验证，验证结果显示改进后的比例谐振控制算法在抑制弓网低频振荡方面具有较好的效果。

1 单相四象限整流器比例谐振控制方法设计

1.1 单相四象限整流器比例谐振模型

单相四象限整流器主要由牵引变压器二次电路与两相全桥电路构成，等效原理如图1所示。图1中， u_s 为交流电源电压； u_r 为四象限输入侧制动电压； L 和 R 为变压器二次等效电感和电阻。

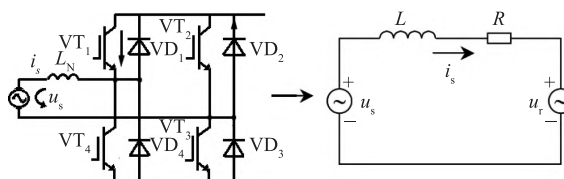


图1 牵引四象限变流器等效原理图

Fig. 1 Equivalent circuit of four-quadrant converter

牵引四象限控制算法主要包含电压环和电流环。电压环以中间电压给定值为控制目标，对中间电压进行闭环控制，消除中间电压实际值与给

定值误差。

电流环对四象限变流器等效电感上的电流进行闭环控制。电流指令值是50 Hz交流量，PI调节器不能对交流量进行无静差的跟踪，因此引入了比例-谐振（Proportional-Resonant, PR）调节器作为电流环的控制器。PR调节器的传递函数为

$$G_{PR}(s) = K_p + K_R \frac{2s}{s^2 + \omega_1^2} \quad (1)$$

它能够对谐振频率 ω_1 分量无静差跟踪。设离散域控制器采样周期为 T ，得到离散域表达式为

$$G_{PR}(z) = \frac{K(z-a)(z-b)}{z^2 - 2\cos(\omega_1 T)z + 1} \quad (2)$$

式中， K 为控制器增益； a 、 b 为控制器零点。

根据图1，以四象限变流器等效电感为受控对象，控制周期为 T ，离散域传递函数为

$$G_L(z) = \frac{\frac{1}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}T} \right)}{z \left(z - e^{-\frac{R}{L}T} \right)} \quad (3)$$

电流环开环传递函数为

$$G_{OP}(z) = G_{PR}(z)G_L(z) \quad (4)$$

1.2 四象限变流器比例谐振控制器参数设计

取四象限变流器开关频率350 Hz，等效电感参数 $L=1$ mH， $R=0.01$ Ω ，中间支撑电容9 mF，在MATLAB中利用控制系统设计工具箱以电流环开环传递函数根轨迹的设计方法，设计出PR控制器控制传递函数，图2为其根轨迹图。

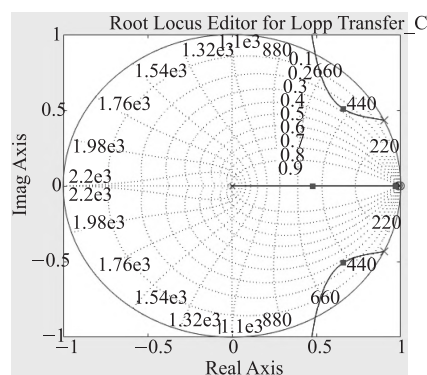


图2 根轨迹方法设计PR控制器

Fig. 2 PR controller designing based on root-locus method

设计出的PR控制器传递函数为

$$G_{PR}(z) = \frac{0.1168(z-0.9983)(z-0.9858)}{z^2 - 1.802z + 1} \quad (5)$$

2 弓网低频振荡机理与解决措施

2.1 弓网低频振荡模型建立与仿真

图3为车网耦合的等效阻抗模型，其中， Z_L 为多台牵引四象限变流器并联后的等效阻抗； U_L 为列车输入端电网电压； U_N 为变电所供电电压； Z_N 为从变电所到列车端之间线路阻抗。

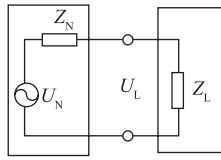


图3 车网耦合等效电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit of coupling system of train and traction network

弓网低频振荡实际上是由电网电压 U_L 与牵引四象限变流器中间电压振荡形成，而 U_N 是稳定的。

根据电路原理， U_L 可以表示为

$$U_L(s) = U_N(s) \frac{1}{1 + Z_N(s)/Z_L(s)} \quad (6)$$

U_L 的稳定性由传递函数 $H_L(s)$ 决定，计算式为

$$H_L(s) = \frac{1}{1 + Z_N(s)/Z_L(s)} \quad (7)$$

U_L 的稳定性与牵引供电线路等效阻抗、列车等效阻抗匹配有关。根据Middlebrook稳定判据，为了确保列车与牵引网系统稳定，必须满足

$$|Z_N(s)/Z_L(s)| \ll 1 \quad (8)$$

即牵引供电系统等效阻抗与列车等效阻抗的比值越小，系统越稳定；反之系统越不稳定。

2.2 弓网低频振荡时的解决措施

通过适当减小电压环PI参数的方法可以增强系统惯性，增大四象限变流器阻抗特性，使系统趋于稳定。但减小电压环PI参数后中间电压调节能力降低，在负载与网压突变等复杂工况下可能会导致中间回路欠电压与过电压故障。本文通过改进四象限变流器比例谐振模型的方法增大四象限变流器阻抗，从而增强列车与牵引网组成的弓

网系统稳定性。

图4中展示了控制对象离散化时一阶延迟环节，即比较值在三角载波顶点和底点计算更新，在接下来的顶点或底点处加载，因此控制上具有一周期延迟特性。

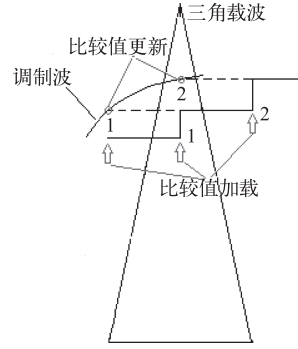


图4 比较值计算更新与加载时序示意图

Fig. 4 Sequence of comparison calculation and load

四象限脉冲电压与电流示意图如图5所示。

图5中， $t_0 \sim t_3$ 为一控制周期。结合图1等效电路图， $t_0 \sim t_1$ 时刻四象限输入电压 u_r 为0， $t_1 \sim t_2$ 时刻四象限输入电压 u_r 为中间电压 U_d ， $t_2 \sim t_3$ 时刻四象限输入电压 u_r 为0，因此 i_1 与 i_2 满足以下关系式

$$i_2 = i_1 + \frac{1}{L} \int_{t_0}^{t_2} u_s \left(1 + e^{-\frac{L}{R}t} \right) dt + \frac{1}{L} \int_{t_1}^{t_2} (u_s - U_d) \left(1 + e^{-\frac{L}{R}t} \right) dt + \frac{1}{L} \int_{t_2}^{t_3} u_s \left(1 + e^{-\frac{L}{R}t} \right) dt \quad (9)$$

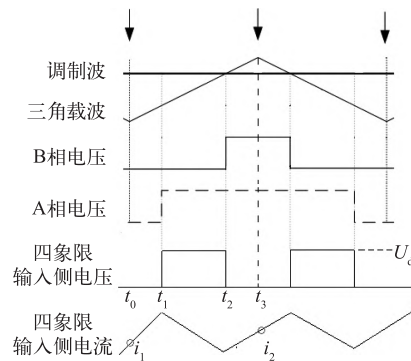


图5 四象限脉冲电压与电流示意图

Fig. 5 Diagram of four-quadrant PWM voltage and current

令变压器二次电压 $u_s = U_m \sin \omega t$ ，在中间电压 U_d 恒定情况下式(9)结果为

$$i_2 = i_1 + \frac{U_m}{\omega L} \cos \omega t \left|_{t_0}^{t_3} - \frac{U_d}{L} \left(t - \frac{R}{L} e^{-\frac{L}{R} t} \right) \right|_{t_1}^{t_2} + \left(\frac{L}{R \omega^2} \sin \omega t - \frac{\cos \omega t}{\omega} \right) e^{-\frac{L}{R} t} \left|_{t_0}^{t_3} \right. \quad (10)$$

式中, $t_3 = t_0 + 1/2/f_s$; $t_1 = t_0 + (1 - \delta)/4/f_s$; $t_2 = t_0 + (1 + \delta)/4/f_s$; f_s 为开关频率; δ 为上一周期的调制比, 代入到式 (10) 可以得出两个相邻控制算法更新时刻 i_1 与 i_2 的关系。

利用 i_1 与 i_2 的关系可以解决比较值更新与加载一周延迟问题, 从而改善系统动态性能。此时式 (3) 变为

$$G_L(z) = \frac{\frac{1}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L} T} \right)}{\left(z - e^{-\frac{R}{L} T} \right)} \quad (11)$$

代入式 (4) 后重新设计系统开环根轨迹。新根轨迹设计 PR 控制器如图 6 所示。

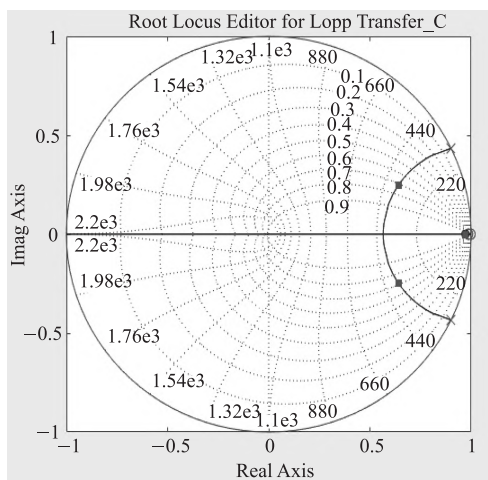


图 6 新根轨迹设计 PR 控制器

Fig. 6 PR controller designing based on new root-locus method

综合考虑系统闭环响应调节时间与超调量, 为得到最佳阻尼比 0.707, 可以得到 PR 控制器传递函数

$$G_{PR}(z) = \frac{0.1853(z - 0.9983)(z - 0.9858)}{z^2 - 1.802z + 1} \quad (12)$$

3 仿真实验

为验证本文上述论证的正确性, 假设一台机车共有 8 重牵引四象限变流器, 搭建供电网和整

车仿真电路模型, 如图 7 所示。仿真模型主要包括线路阻抗、牵引变压器、四象限整流器、中间支撑电容和牵引逆变器, 电动机模型使用等效阻抗替代。

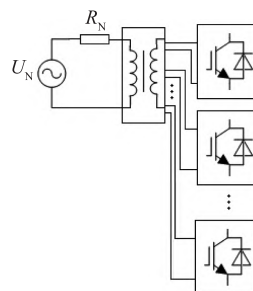


图 7 整车仿真电路模型

Fig. 7 Circuit model of simulation

仿真参数选择见下表。

表 仿真模型参数

Tab. Parameters of circuit model

仿真参数	线路阻抗	0.63 Ω、64°
	变压器电压比	25 000 V/950 V
	变压器漏感阻抗	1 mH、0.01 Ω
	变流器开关频率	350 Hz
	中间母线电压目标值	1 800 V
	中间支撑电容 C_d	9 mF
	电动机等效阻抗	0.7 Ω、0.9 mH
	二次滤波参数	5 mF、0.507 mH

每组变流器四象限整流器、牵引逆变器和电动机等效阻抗组成的变流器模型如图 8 所示。

设线路供电长度 10 km, 同一供电臂下 1 台机车时, 仿真结果如图 9 所示 (图中波形从上至下依次为中间电压、列车端网压、网流、四象限输入电流、逆变器输出电流, 下同), 中间电压、网压和网流运行平稳无振荡现象。

通过增大同一供电臂下供电线路阻抗的方法复现弓网低频振荡现象。当供电线路阻抗增大到 100 km 供电距离时 (等效模拟同一供电臂下供电长度 10 km 有 10 台机车同时运行), 仿真结果如图 10 所示, 中间电压、网压和网流出现低频振荡现象, 振荡频率 3 Hz 左右。

在出现弓网低频振荡的仿真参数下, 使用重新设计后的控制器传递函数仿真 10 台机车运行工况, 仿真结果如图 11 所示。

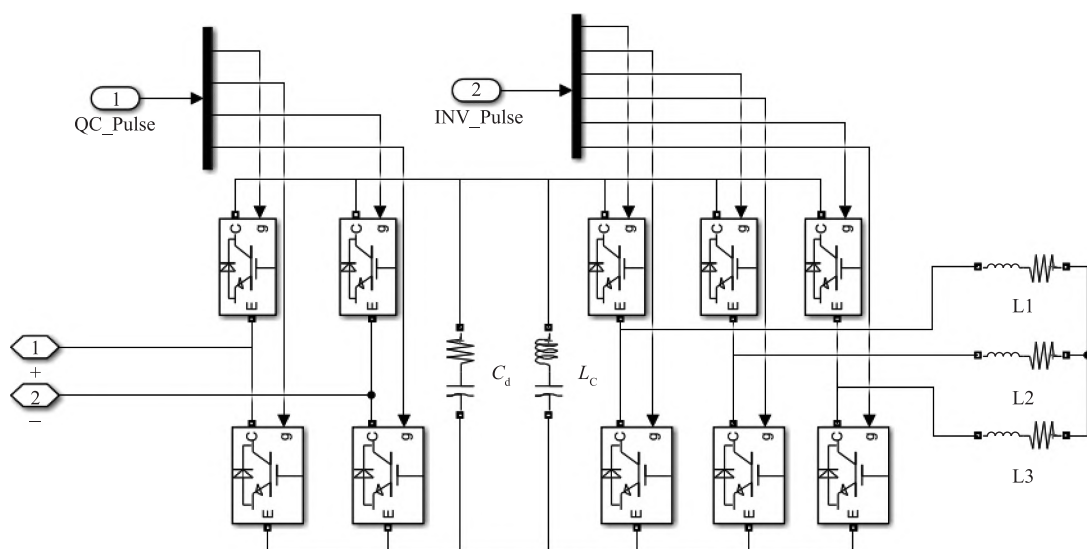


图 8 变流器仿真模型

Fig.8 Simulation model of converter

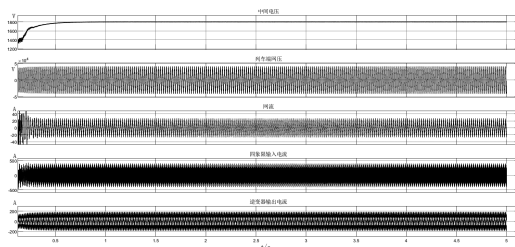


图 9 1 台机车仿真结果

Fig.9 Simulation result of one locomotive using new algorithm

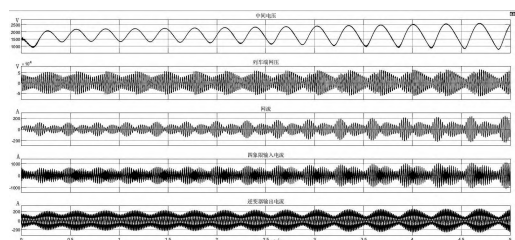


图 10 同一供电臂下 10 台机车仿真结果

Fig. 10 Simulation result of ten locomotives using new algorithm

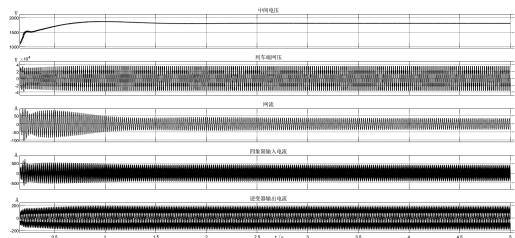
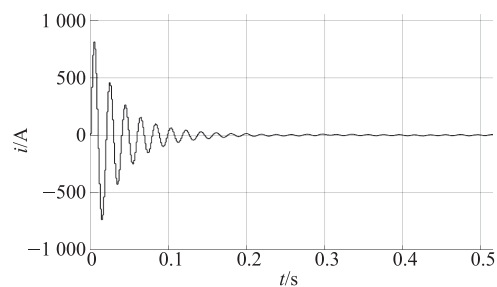


图 11 使用新算法同一供电臂下 10 台机车仿真结果

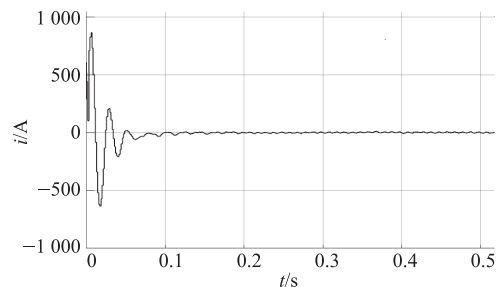
Fig. 11 Simulation result of twenty locomotives at the same feeding section using new algorithm

仿真结果显示经过使用重新设计后的控制算法，即使同一供电臂下机车数量达到10台，中间电压与网压、网流也未出现任何低频振荡现象。

图12a、b分别为仿真10台机车运行工况下的参数时，原控制算法和新控制算法电流误差响应图。从图12a和图12b对比可以看出，重新设计后的控制算法响应速度更快，稳定性更好。



(a) 原控制算法



(b) 新控制算法

图 12 原控制算法和新控制算法电流误差调节响应图

Fig. 12 Response of current regulation of old and new algorithm

4 弓网低频振荡实车验证

图13为某型动车组在前期调试过程中出现的弓网低频振荡现象。

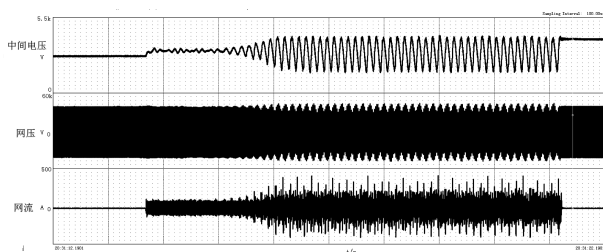


图 13 动车组弓网低频振荡波形

Fig. 13 Low-frequency oscillation waveform of the EMU

从图13中可以看出,四象限脉冲启动后中间电压与网流、网压产生低频振荡现象,低频振荡频率在7 Hz左右,这与上述仿真现象基本一致。

图14为参照文中论证的方法重新设计控制算法后在同一供电臂下采集的数据波形。从图14中可以看出,网压、中间电压和网流稳定无波动。后续应用该算法后生产的动车组也未再出现弓网低频振荡现象。

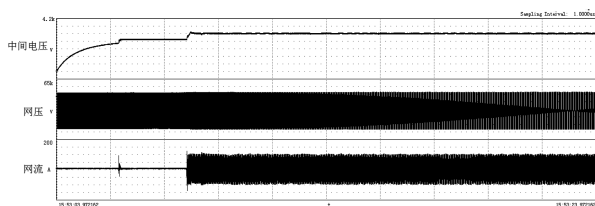


图 14 新控制算法在动车组上运行波形

Fig. 14 The EMU waveform using new algorithm

5 结束语

本文阐述了使用根轨迹设计单相四象限整流器电流环的方法,并结合弓网低频振荡机理的分析,以抑制弓网低频振荡为目的,对单相四象限变流器比例谐振控制算法模型进行改进,消除了传统控制算法上存在的一拍延迟。在弓网低频振荡机理的分析基础上,运用离线仿真的方法验证了单相四象限变流器控制算法模型改进的正确性与有效性,验证结果显示改进后的比例谐振控制算法可以抑制弓网低频振荡。最后应用本文论证方法重新设计的实车控制算法解决了现实中动车

组出现的弓网低频振荡问题,进一步验证了本文改进的控制算法的有效性。

参考文献

- [1] 张凯,谢源,李少朋,等.基于线性自抗扰控制的电网模拟器整流侧控制[J].计算机应用与软件,2022(7):26-31.
- [2] 王英,陈思彤,王迎晨,等.基于IADRC的CRH5型车网耦合系统低频振荡抑制方法[J].电力系统保护与控制,2019(6):1-8.
- [3] 姚书龙,刘志刚,张桂南,等.基于自抗扰控制的牵引网网压低频振荡抑制方法[J].电网技术,2016(1):207-213.
- [4] 张杰,尚敬,张志学,等.电气化铁路车网低频振荡机理研究[J].机车电传动,2016(4):16-22.
- [5] 赵朝蓬.徐州铁路枢纽接触网电压低频振荡分析及对策研究[J].电力科学与技术学报,2016(6):89-96.
- [6] 付莉,张桂南,高仕斌,等.高速铁路车网耦合系统网压振荡模态分析与对策[J].电力系统保护与控制,2016(1):24-32.
- [7] 刘诗慧,林飞,杨中平,等.抑制电气化铁路低频振荡的四象限变流器控制方法[J].电工技术学报,2016(12):73-83.
- [8] 王剑,郑琼林,高吉磊,等.基于根轨迹法的单相 PWM 整流器比例谐振电流调节器设计[J].电工技术学报,2012(9):251-255.
- [9] 张郭军.基于Simulink和C++的混合编程研究[J].计算机应用与软件,2007(4):174-175.
- [10] 邢超,李言俊,张科,等.基于Matlab/Simulink的实时控制实验环境[J].计算机应用与软件,2004(3):46-47.
- [11] 刘建强,郑琼林,杨其林,等.高速列车牵引传动系统与牵引网谐振机理[J].电工技术学报,2013(4):221-227.
- [12] 李宏强,王晓茹,徐家俊,等.车网耦合的牵引供电系统谐波仿真分析[J].电力系统保护与控制,2014(10):116-122.
- [13] 曹芸凯,赵涛,朱爱华,等.计及电网和线路阻

- 抗的并联逆变器谐振抑制方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022(2): 188-196.
- [14] 杨明, 杨杰, 赵铁英, 等. 弱电网下抑制谐振频率偏移的并网逆变器谐波抑制策略[J]. 电机与控制学报, 2021(8): 87-98.
- [15] 吴丽珍, 安利锋, 陈伟, 等. 考虑电网阻抗变化的LLCL并网逆变器谐振抑制策略[J]. 兰州理工大学学报, 2021(4): 76-82.
- [16] 张占俊, 李建文, 董耀, 等. 弱电网下多逆变器并网谐振失稳分析方法[J]. 电气技术, 2020(10): 21-28.

作者简介

李金池(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为机车与动车组牵引变流器控制系统。

姚大顺(1991—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为机车与动车组牵引变流器控制系统。

张林(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为机车与动车组牵引变流器控制系统。

(收稿日期: 2023-05-31)