

基于多变量控制的高铁低频振荡过电压阻尼方法

向 川, 刘志刚, 张桂南, 姚书龙

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 针对高速铁路网电压低频振荡导致动车组牵引封锁的现象, 首先建立动车组线侧脉冲整流器状态空间模型; 其次, 对四象限整流器多变量控制策略进行详细的数学推导及参数设计, 并在其闭环状态方程推导的基础上, 研究了多台动车组采用多变量控制的车网系统稳定性, 结果表明系统能够处于渐进稳定状态; 然后在 MATLAB 的 Simulink 模块中搭建双重化变流器及其控制模型, 对比分析瞬态直接电流控制和多变量控制的控制效果, 得出多变量控制具有更好的动、静态特性; 最后将 2 种控制方法下的整流器仿真模型接入牵引网系统链式仿真模型中, 进一步验证多变量控制对车网低频振荡过电压良好的阻尼特性。

关键词: 牵引传动; 高铁; 脉冲整流器; 多变量控制; 车网系统; 稳定性; 低频振荡; 过电压; 阻尼

中图分类号: U 266; TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.08.010

0 引言

随着高速铁路的迅速发展, 新型“交-直-交”牵引传动模式的动车组 EMU(Electrical Multiple Units) 因其功率因数高、功率大、牵引力大等优势在电气化铁路系统中得到广泛应用。但机车运行密度的增大也导致了一些问题的产生: 1995 年 4 月, 瑞士苏黎世发生了由谐波过电流引起的机车封锁事故^[1]; 京哈线、京津城际自开通以来也数次出现车网电气量振荡现象^[2]。

截至目前, 国内外相关学者针对该问题从动车组变流器控制方面开展了相关研究。文献[1]利用级联谐波传递函数分析控制系统稳定性, 得出车网系统稳定性由整流器控制决定; 文献[3]利用赫尔维茨判据和小增益原理分析了 PI 参数对车网系统稳定性的影响; 文献[4]通过 dq 解耦的方式进行动车组控制系统建模, 分析得出二阶广义积分器参数与车网系统稳定性的关系; 文献[5]通过瞬时值模型和简化基波频率模型分析系统低频动态特性, 得出控制系统的结构和参数对车网系统稳定性的影响。以上研究均认为动车整流器控制策略是影响车网电气量振荡的关键, 并分别通过调节其控制参数或改进控制策略对该现象进行相关抑制。

传统整流器控制方法主要分为 2 类: 间接电流控制^[6]和直接电流控制^[7]。瞬态直接电流控制是电力机车和高速动车组目前采用较多的控制策略。为了改善机车线侧脉冲整流器控制性能, 文献[8-10]提出多变量控制方法应用于单相 16.7 Hz 牵引网机车线侧变流器, 但是未从理论分析角度给出完善解析;

文献[11]提出一种机车四象限变流器的高性能间接电流控制方法, 但是仅关注其动态性能的改善; 文献[12-13]提出的方法均可抑制固定阶次的谐波, 但抑制频段是离散的, 作用局限; 文献[14-16]针对三相 PWM 整流器进行了控制策略的改进, 但不能直接应用于动车组单相 PWM 控制, 且未对提出的谐振阻尼特性进行论证。

本文针对国内多个动车出现的车网电气量低频振荡现象, 首先对比瞬态直接电流控制给出某型动车组的多变量控制策略的数学分析及设计方法; 然后推导整流器闭环状态方程, 并利用特征值分析方法研究多变量控制下车网系统的稳定性, 并通过 MATLAB/Simulink 搭建模型验证了多变量控制下整流器的工作特性; 最后, 通过“牵引网-动车组”电气耦合系统仿真模型进一步验证多变量控制在车网系统中的低频振荡阻尼效果。

1 动车组脉冲整流器数学建模

国内某型动车组基本动力单元的传动系统如图 1 所示。

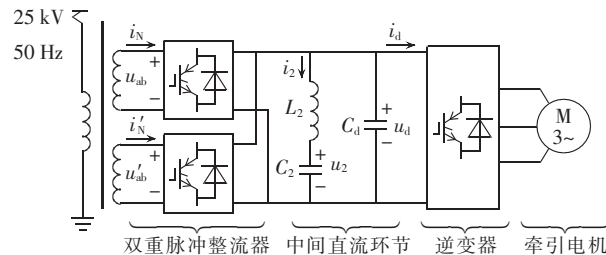


图 1 动车组基本动力单元牵引传动系统

Fig.1 Traction drive system of basic power unit for EMUs

由图 1 可以看出, 动车组牵引传动系统整流部分采用双重化四象限脉冲整流器, 由于车网出现电气量低频振荡时, 负载工作在空载/轻载状态, 逆变

收稿日期: 2015-04-24; 修回日期: 2016-06-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51377136); 高速铁路基础研究联合基金重点资助项目(U1434203, U1134205)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51377136) and High-speed Railway Basic Research Fund Key Project(U1434203, U1134205)

器和牵引电机影响很小^[1-5,17],因此可将其等效为一个阻性负载以简化研究。另外,双重整流器各整流单元拓扑结构相同,本文针对单个脉冲整流器进行研究分析,等效电路如图 2 所示。

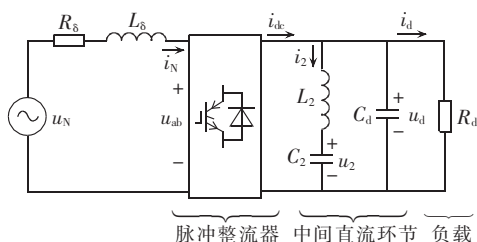


图 2 单个四象限脉冲整流器等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of single four-quadrant pulse rectifier

图 2 中, u_N 为车载变压器二次侧电压; i_N 为整流器输入电流; u_{ab} 为整流器的输入电压; i_{dk} 为中间直流环节电流; i_d 为负载电流; i_2 为谐振回路电流; u_2 为谐振回路电容电压; u_d 为直流侧电压; R_δ 和 L_δ 分别为归算到副边的车载变压器电阻和漏电感; L_2 和 C_2 分别为谐振回路的电感和电容; C_d 为直流侧的支撑电容; R_d 为等效负载。

对上述电气参数整合处理,取状态向量 $\mathbf{x}$ 、输入向量 $\mathbf{u}$ 和输出向量 $\mathbf{y}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [u_d \ u_2 \ i_2 \ \psi_\delta]^T \\ \mathbf{u} &= [u_{ab} \ u_N \ i_d]^T \\ \mathbf{y} &= [u_d \ i_N]^T \end{aligned} \quad (1)$$

结合图 2,可得到系统的状态空间模型。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{u}_d \\ \dot{u}_2 \\ \dot{i}_2 \\ \dot{\psi}_\delta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{C_d} & \frac{\rho(t)}{C_d L_\delta} \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & 0 \\ \frac{1}{L_2} & -\frac{1}{L_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{R_\delta}{L_\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_2 \\ i_2 \\ \psi_\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{C_d} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_N \\ i_d \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u_d \\ i_N \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_2 \\ i_2 \\ \psi_\delta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, ψ_δ 为电流 i_N 流过 L_δ 时产生的磁链; $\rho(t)$ 为四象限整流器交、直流变换时的变比例系数。

由式(2)可看出,该模型有 4 个状态变量 u_d 、 u_2 、 i_2 和 ψ_δ 。单从输出方程来看,输出量只由 u_d 和 ψ_δ 直接决定;但在状态方程中,各状态量间存在耦合,因此 u_2 和 i_2 同样会对输出量产生间接的影响。若要实

现期望的输出,4 个状态量都必须达到相应的期望值,并根据其在控制过程中的主次地位进行整合。

2 整流器多变量控制策略数学分析

相比于瞬态直接电流控制,多变量控制计及二阶谐振环节的电气量,多变量控制框图如图 3 所示。图中, $\hat{\mathbf{y}}$ 和 $\hat{\mathbf{x}}$ 分别为输出估计向量和状态估计向量; $\mathbf{y}_m$ 为测量的输出向量; $\mathbf{x}^*$ 为状态设置值向量; $u_{ab,fb}$ 为多变量控制输出的 u_{ab} 分量; $u_{ab,ff}$ 为前馈控制输出的 u_{ab} 分量。

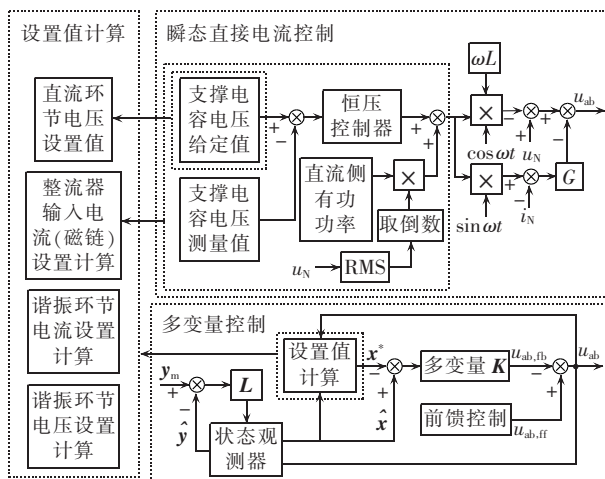


图 3 多变量控制与瞬态直接电流控制框图

Fig.3 Block diagrams of multivariable control and instantaneous direct current control

由图 3 可明显看出,在瞬态直接电流控制给定了直流环节电压设置值和整流器输入电流设置值的基础上,多变量控制还对振荡环节电流和电压进行了设定值计算,并实现控制,且多变量控制对整流器输入电流的控制是以漏磁链的形式实现的。

2.1 多变量控制状态观测器求解

由于现实电路中振荡环节部分的电流和电压值难以测取,因此需要引入状态观测器进行估计。

传统控制的状态观测器设计中,状态空间矩阵必须是常数矩阵,因此需要选取一个恒定值替换 $\rho(t)$,由此带来的误差可在极点配置过程中通过选取复数坐标系左半平面远离虚轴的极点进行消除。通过对该系统的可控性判断,只要 $\rho(t) \neq 0$,系统就是能控的,本文中选取 $\rho(t) = 0.314$,则有:

$$\mathbf{A}_{\text{simp}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{C_d} & \frac{0.314}{C_d L_\delta} \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & 0 \\ \frac{1}{L_2} & -\frac{1}{L_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{R_\delta}{L_\delta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

输入向量 $\mathbf{u}$ 中只有 u_{ab} 是被多变量控制影响的,

故忽略 $\boldsymbol{u}$ 中的 u_N 和 i_d 元素,使其降阶为 u_{ab} ,则输入矩阵得到如下简化:

$$\boldsymbol{B}_{\text{simp}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}^T$$

(4)

所得状态观测器结构如图 4 虚线框中所示,计算中涉及的电路参数取值如表 1 所示。

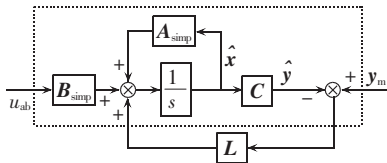


图 4 状态观测器结构
Fig.4 Structure of state observer

表 1 参数列表

Table 1 Parameter list

参数	取值	参数	取值
R_{net}/Ω	0.01	C_d/mF	3
L_{net}/mH	1.8	R_d/Ω	10
R_δ/Ω	0	U_N/V	1550
L_δ/mH	2.3	K_P	0.3
L_2/mH	0.603	T_i/s	0.1
C_2/mF	4.56		

2.2 多变量控制各设置值计算

交流侧漏磁链设定值通过设置电流值乘漏电感计算得到,计算公式如下:

$$\begin{cases} I_{N1}^* = K_P(U_d^* - \hat{U}_d) + \int (U_d^* - \hat{U}_d) dt / T_i \\ I_{N2}^* = I_{\text{dm}} \hat{U}_d / U_N \\ I_N^* = I_{N1}^* + I_{N2}^* \\ \psi_\delta^* = L_\delta I_N^* \sin \omega t \end{cases}$$

(5)

其中,带“*”的变量为设定值; $U_d^* = 3000 \text{ V}$; K_P 为比例常数; T_i 为积分时间常数; U_N 为车载变压器二次侧电压有效值; $\hat{U}_d$ 为状态观测器输出的直流侧电压; I_{dm} 为测量得到的负载电流。

谐振环节电流设定值可结合整流器无损耗和无储能元件的简化假设,通过整流器交流侧与直流侧瞬时功率守恒计算得到:

$$i_2^* = \frac{u_{ab} i_N^* - U_{ab} I_N^* \cos \varphi}{U_d^*}$$

(6)

其中, φ 为 u_{ab} 超前 u_N 的相位角。同理,谐振环节电压设定值计算式如下:

$$u_2^* = \frac{1}{C_2} \int i_2^* dt = \frac{1}{C_2} \int \frac{u_{ab} i_N^* - U_{ab} I_N^* \cos \varphi}{U_d^*} dt$$

(7)

交流侧漏磁链设定值、谐振环节电压、电流设计框图如图 5 所示。

2.3 多变量控制反馈矩阵 $\boldsymbol{K}$ 设计

本文采用线性二次型最优控制器算法计算反馈矩阵 $\boldsymbol{K}^{[18]}$ 。取其指标函数为:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (\Delta \boldsymbol{x}^T \boldsymbol{Q} \Delta \boldsymbol{x} + u_{ab,fb} \boldsymbol{R} u_{ab,fb}) dt$$

(8)

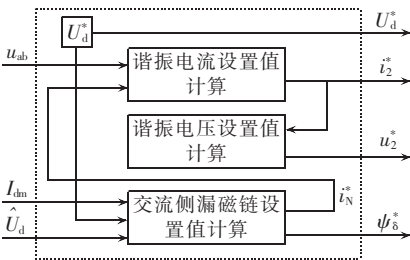


图 5 设置值计算框图
Fig.5 Block diagram of setting calculation

其中, $\Delta \boldsymbol{x} = \hat{\boldsymbol{x}} - \boldsymbol{x}^*$ 为状态估计值与状态设置值之差; $\boldsymbol{Q}$ 为对称半正定矩阵,记录了各状态偏差值的权重; $\boldsymbol{R}$ 为对称正定矩阵,反映所需输入功率的大小。控制的目标是状态偏差 $\Delta \boldsymbol{x}$ 最小化,同时所需的驱动能量 $u_{ab,fb}$ 最小,即指标函数最小,因而最优控制的输出量 $u_{ab,fb}$ 需满足如下条件:

$$u_{ab,fb} = -\boldsymbol{K} \Delta \boldsymbol{x} = -\boldsymbol{R}^{-1} \boldsymbol{B}_{\text{simp}}^T \bar{\boldsymbol{P}} \Delta \boldsymbol{x}$$

(9)

其中, $\bar{\boldsymbol{P}}$ 为式 (10) 所示稳态 Ricatti 方程的解。

$$\boldsymbol{A}_{\text{simp}}^T \bar{\boldsymbol{P}} + \bar{\boldsymbol{P}} \boldsymbol{A}_{\text{simp}} - \bar{\boldsymbol{P}} \boldsymbol{B}_{\text{simp}} \boldsymbol{R}^{-1} \bar{\boldsymbol{P}} + \boldsymbol{Q} = 0$$

(10)

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} 0.05 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.05 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.05 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.5 \times 10^7 \end{bmatrix}$$

结合表 1 中参数,根据上述计算过程,可求得 $\boldsymbol{K}$:

$$\boldsymbol{K} = [-3.033, 0.7970, 0.0643, -17328]$$

(11)

2.4 多变量控制状态观测矩阵 $\boldsymbol{L}$ 设计

系统中观测器误差动态性能必须比闭环状态反馈动态性能快,一般要求观测器动态响应时间为闭环状态反馈的 1/10。而特征值中的主导极点能够反映系统的动态特性,因此求解 $\boldsymbol{L}$ 时,首先计算闭环状态反馈控制器的特征值。

$$|s\boldsymbol{I} - (\boldsymbol{A}_{\text{simp}} - \boldsymbol{B}_{\text{simp}} \boldsymbol{K})| = 0$$

(12)

结合表 1 中参数,得到 $\boldsymbol{A}_{\text{simp}} - \boldsymbol{B}_{\text{simp}} \boldsymbol{K}$ 的特征值为 $\lambda_1 = -17321, \lambda_{2,3} = -2.8176 \pm j957.06, \lambda_4 = -2.3326$ 。由于特征值实部均为负数,所以车网系统是渐近稳定的。

选取观测器期望特征值时,考虑其实部小于 0 且至少为 $\boldsymbol{A}_{\text{simp}} - \boldsymbol{B}_{\text{simp}} \boldsymbol{K}$ 的主导特征值的 10 倍。

因此期望的闭环极点取值为 $\lambda_{D1} = -20000, \lambda_{D2,3} = -28.2 \pm j957.06, \lambda_{D4} = -22000$ 。通过多输入、多输出特征值配置方法^[19],可得:

$$\boldsymbol{L} = \begin{bmatrix} 22056 & 104.667 \\ 21990 & 0 \\ -37278 & 0 \\ 0 & 46 \end{bmatrix}$$

(13)

2.5 多变量控制稳定性分析

对该整流器多变量控制策略进行内部稳定性分析,若满足内部渐近稳定性,则系统也满足有界输入有界输出稳定性。

在第 1 节状态空间模型建模和第 2.1 节观测器建模时,整流器交流侧仅考虑了车载变压器的漏电抗,并未计及来自牵引网的影响。为了验证设计的可行性,考虑牵引网同一条供电臂下同一地点有 n 台机车同时运行时,网侧阻抗上的电压降是单台动车组的 n 倍,因此实际状态空间模型为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}'\mathbf{x} + \mathbf{B}_{\text{simp}}u_{ab} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}'\mathbf{x} \end{cases} \quad (14)$$

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{C_d} & \frac{\rho(t)}{C_d(nL_{\text{net}}+L_\delta)} \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & 0 \\ \frac{1}{L_2} & -\frac{1}{L_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{nR_{\text{net}}}{nL_{\text{net}}+L_\delta} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{C}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{nL_{\text{net}}+L_\delta} \end{bmatrix}$$

系数矩阵中, n 为动车组数量, R_{net} 和 L_{net} 分别为归算到车载变压器副边的网侧电阻和电感。

结合式(14),基于状态观测器动态补偿器如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{A}' - \mathbf{B}_{\text{simp}}\mathbf{K} - \mathbf{L}\mathbf{C}')\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{L}\mathbf{y} + \mathbf{B}_{\text{simp}}\mathbf{K}\mathbf{r} \\ u_{ab} = -\mathbf{K}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{r} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $\mathbf{r}$ 为设置值。由式(14)、(16)得到闭环状态方程:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\hat{\mathbf{x}}} \\ \dot{\mathbf{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}' & -\mathbf{B}_{\text{simp}}\mathbf{K} \\ \mathbf{L}\mathbf{C}' & \mathbf{A}' - \mathbf{B}_{\text{simp}}\mathbf{K} - \mathbf{L}\mathbf{C}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \mathbf{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{\text{simp}}\mathbf{K} \\ \mathbf{B}_{\text{simp}}\mathbf{K} \end{bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{y} = [\mathbf{C}' \ 0] \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \mathbf{x} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (17)$$

进一步表示为:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}_{\text{close}}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{B}_{\text{close}}\mathbf{r} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}_{\text{close}}\tilde{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (18)$$

通过研究 n 变化时 $\mathbf{A}_{\text{close}}$ 矩阵的特性可以获得该闭环系统的稳定性。分别取 n 为 1、10、100 时,结合表 1 参数,求出 $\mathbf{A}_{\text{close}}$ 的特征值并在复数坐标系中作图,如图 6 所示。

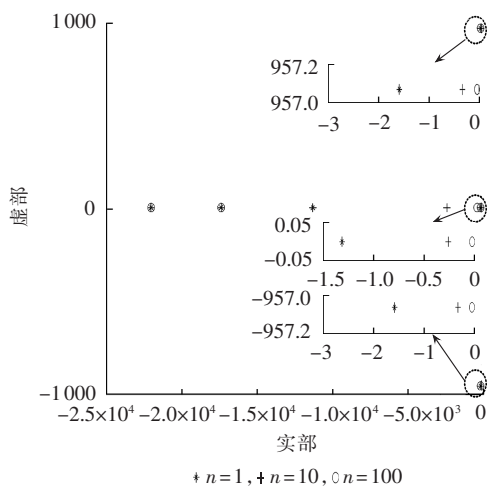


图 6 不同 n 值时 $\mathbf{A}_{\text{close}}$ 矩阵特征值分布
Fig.6 Distribution of $\mathbf{A}_{\text{close}}$ eigenvalue for different values of n

从图 6 可看出,当动车组数量 n 分别取 1、10、100 时, $\mathbf{A}_{\text{close}}$ 的部分特征值基本不发生变化,特征值即使向虚轴靠近,但也均位于复平面左半部分;此外,由于渐近稳定系统总是有界输入有界输出稳定的,因此多变量控制也是有界输入有界输出稳定的。综合上述分析,多台动车组使用多变量控制方法并入牵引网运行时,系统稳定性能够得到保证。

3 动车组整流器仿真模型搭建及分析

在 MATLAB/Simulink 中搭建双重化四象限脉冲整流器的仿真模型,如图 7 所示。双重化脉冲整流器分别采用瞬态直接电流控制和多变量控制的输出电压波形、交流侧电流、电压波形如图 8、图 9 所示。不同控制方式下双重化脉冲整流器直流侧电压性能指标如表 2 所示。

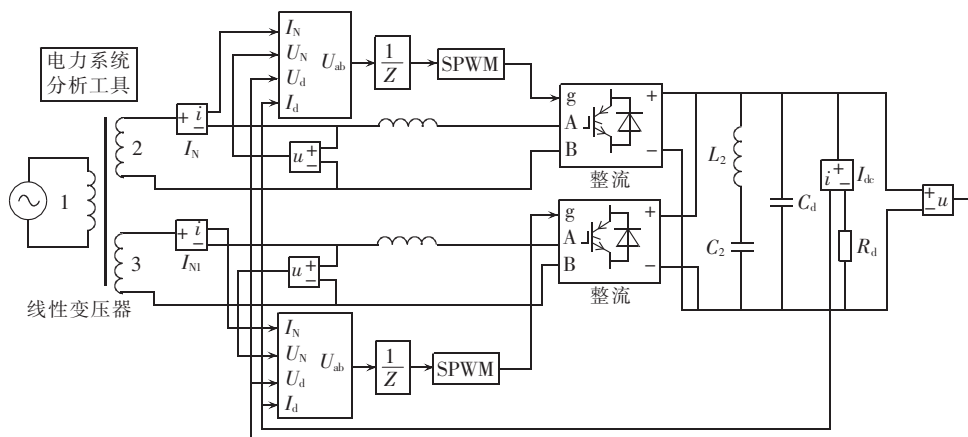


图 7 双重化四象限脉冲整流器的仿真模型

Fig.7 Simulation model of doubly-redundant four-quadrant pulse rectifier

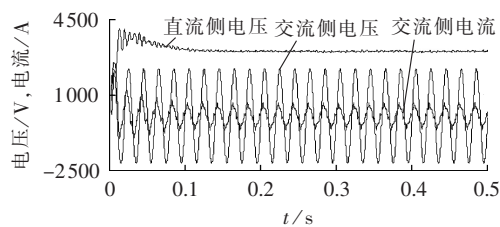


图 8 瞬态直接电流控制下电压、电流波形
Fig.8 Waveforms of voltages and current under instantaneous direct current control

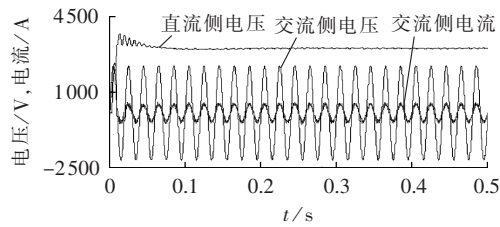


图 9 多变量控制下电压、电流波形
Fig.9 Waveforms of voltages and current under multivariable control

表 2 双重化整流器直流侧输出电压性能指标
Table 2 Performance indexes of DC-side output voltage of doubly-redundant rectifier

控制方式	性能指标			
	超调量/%	峰值时间/s	调节时间/s	电压波动/V
瞬态直接电流控制	35.3	0.0125	0.15	±70
多变量控制	24.4	0.0125	0.07	±40

从图 8 和图 9 中可以看出,瞬态直接电流控制下整流器启动后输入电流经过 3 个周期后达到稳定,其电流总谐波畸变率(THD)为 19.19%;而多变量控制下电流稳定仅需要 1 个周期,且 THD 明显减小,为 10.19%。由表 2 可以看出,与瞬态直接电流控制相比,多变量控制不仅能达到要求的控制目标,而且控制性能更优,直流环节电压超调量减少了 10.9%,调节时间减少了 0.08 s,电压波动减小至±40 V。

4 车网级联系统仿真分析

为了进一步验证多变量控制策略对车网低频振荡的良好阻尼特性,本文搭建了牵引网链式仿真模型,采用平衡牵引变压器,牵引网统一链式电路模型^[20],自耦变压器(AT)供电方式。牵引变压器和自耦变压器参数如表 3 所示,牵引网导体参数如表 4 所示,根据文献^[21]中的方法计算得牵引网阻抗值如表 5 所示。表 5 中,下标 1 和 2 分别代表上行和下行线路;行、列为相同项目时的值对应该项目的自阻抗;行、列为不同项目时的值对应这 2 个项目的互阻抗。在距离牵引网上行线变电所 9 km 的 A、B 位置接入 n 台动车组,接入方式如图 10 所示,从而对高速铁路车网耦合系统的稳定性进行研究。采用瞬态直接电流控制,在保证 PI 调节器参数不变的前提下,

表 3 变压器参数

变压器	容量/(MV·A)	变比	短路阻抗/%
牵引	40	220/27.5	8.5
自耦	8.5	55/27.5	1.8

表 4 牵引网导体的主要参数

导线名称	导线型号	直流电阻/($\Omega\cdot\text{km}^{-1}$)	导体计算半径/mm
接触线 C	CuMg-150	0.1191	7.2
承力索 J	THJ-120	0.1810	7.0
钢轨 R	UIC60	0.1350	12.79
保护线 PW	LGJ-120	0.2860	7.0
正馈线 F	2×LGJ-185	0.0820	9.51
贯通地线 G	TJ-95	0.2500	12.4

表 5 高速铁路牵引网阻抗

Table 5 Traction network impedance of high-speed railway					Ω/km
	T_1	F_1	PW_1	R_1	
T_1	0.126+j0.431	0.053+j0.188	0.053+j0.208	0.052+j0.173	
F_1	0.053+j0.188	0.136+j0.571	0.054+j0.205	0.052+j0.138	
PW_1	0.053+j0.208	0.054+j0.205	0.339+j0.593	0.052+j0.158	
R_1	0.052+j0.173	0.052+j0.138	0.052+j0.158	0.119+j0.408	
T_2	0.053+j0.179	0.056+j0.145	0.056+j0.148	0.052+j0.154	
F_2	0.051+j0.151	0.053+j0.141	0.053+j0.133	0.051+j0.127	
PW_2	0.052+j0.151	0.053+j0.132	0.053+j0.130	0.051+j0.136	
R_2	0.052+j0.155	0.052+j0.125	0.052+j0.136	0.051+j0.183	

注:T为C、J的合并,R为两条钢轨的合并。

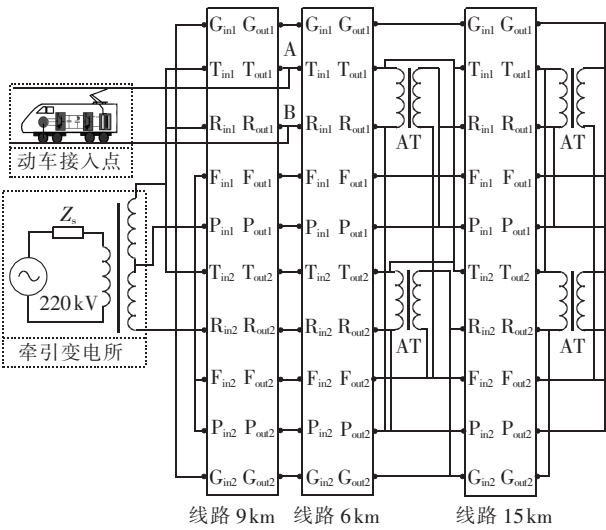


图 10 “牵引网-动车组”耦合系统仿真模型

Fig.10 Simulation model of coupled system of traction network and EMUs

接入 EMUs 小于 6 台时,系统均能保持稳定,越接近 6 台,控制器的动态跟踪性能越差,当达到 6 台时失稳,接入 6 台 EMUs 时的波形如图 11 所示。

由图 11 可以看出,网侧电压、电流出现低频调制信号,网侧电压峰值在 29.8~46 kV 波动;受端电压、电流也出现振荡现象,导致四象限整流器工作失

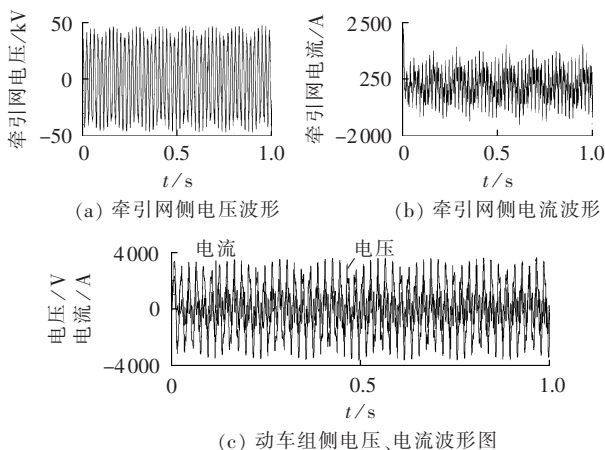


图11 瞬态直接电流控制下6台动车组接入时电压、电流波形图

Fig.11 Waveforms of voltage and current under instantaneous direct current control when 6 EMUs are accessed

败,严重时将导致动车组牵引封锁。

考虑多变量控制策略动车组接入达到6台时,车网能保持稳定,继续增加动车组台数,车网依旧稳定。多变量控制下接入6台EMUs时的波形如图12所示。

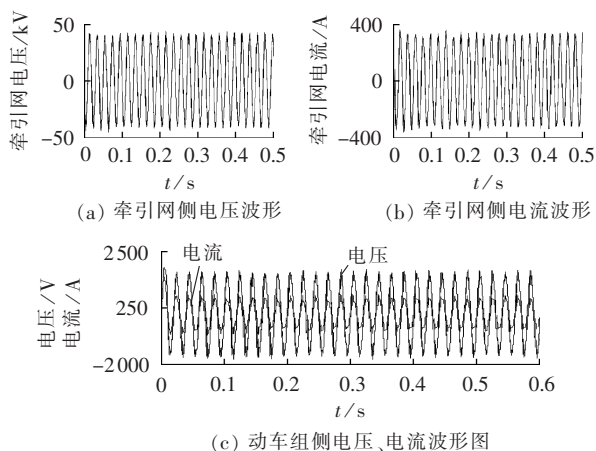


图12 多变量控制下6台动车组接入时电压、电流波形图

Fig.12 Waveforms of voltage and current under multivariable control when 6 EMUs are accessed

由图12可以看出,网侧电压稳定在40 kV左右,网侧电流稳定在300 A左右,均未发生振荡;受端电流经过1个周期的时间(0.02 s)达到稳定,和受端电压均保持稳定,未发生车网低频振荡现象。

5 结论

针对高铁车网低频振荡问题,本文首先根据动车组线侧变流器的电压、电流关系建立了状态空间模型;在此基础上对比瞬态直接电流控制,完成了多变量控制的理论分析和参数设计,并推导出多变量控制的闭环状态方程,利用矩阵特征值分析的方法讨

论了多变量控制下动车组的稳定性;然后,搭建了基于瞬态直接电流控制和多变量控制的双重化脉冲整流器的仿真模型,并对比了控制效果;最后,将这2种控制策略应用于动车组,并在“牵引网-动车组”耦合系统仿真模型中进行验证。通过理论研究和仿真分析得出如下结论:

a. 特征值稳定性分析时得到的闭环特征值在接入机车数大范围变化时仍位于复平面左半部分,证明了采用多变量控制的多台动车组接入系统的稳定性;

b. 不考虑牵引网影响时,从输出电气量动、静态特性来比较,多变量控制的性能均优于瞬态直接电流控制;

c. 在车网电气耦合系统中,瞬态直接电流控制失稳时多变量控制仍能够保持稳定性,多变量控制在低频车网振荡方面具有良好的阻尼特性。

参考文献:

- [1] MOLLERSTEDT E, BERNHARDSSON B. Out of control because of harmonics-an analysis of the harmonic response of an inverter locomotive[J]. IEEE Control Systems, 2000, 20(4): 70-81.
- [2] 刘建强,郑琼林,杨其林. 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, 28(4): 221-227.
LIU Jianqiang, ZHENG Qionglin, YANG Qilin. Resonance mechanism between traction drive system of high-speed train and traction network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 221-227.
- [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.
HAN Zhiling, TANG Lei, LI Wei. Causal analysis and resolution of the voltage instability between AC drive electric locomotive and power supply network [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(10): 25-28.
- [4] WANG H, WU M, SUN J. Analysis of low-frequency oscillation in electric railways based on small-signal modeling of vehicle-grid system in dq frame [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(9): 1124-1131.
- [5] DANIELSEN S, FOSSO O B, MOLINAS M, et al. Simplified models of a single-phase power electronic inverter for railway power system stability analysis-development and evaluation [J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(2): 204-214.
- [6] DIXON J W, OOI B T. Indirect current control of a unity power factor sinusoidal current boost type three-phase rectifier [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1988, 35(4): 508-515.
- [7] 冯晓云. 电力牵引交流传动及其控制系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 103-105.
- [8] CARSTEN H, MARTIN O, VOLKER S, et al. Improvement of low-frequency railway power system stability using an advanced multivariable control concept [C] // 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. Porto, Portugal: IEEE, 2009: 560-565.
- [9] OETTMEIER M, BARTELT R, HEISING C, et al. LQ-optimized multivariable control for a single-phase 50 kW, 16.7 Hz railway traction line-side converter [C] // 13th European Conference on

- Power Electronics and Applications. Barcelona, Spain: IEEE, 2009: 1-10.
- [10] HEISING C, OETTMEIER M, BARTELT R, et al. Multivariable pole-placement control design for a single-phase 50 kW, 16.7 Hz railway traction line-side converter[C]//2nd International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Lisbon, Portugal: IEEE, 2009: 273-278.
- [11] HE Liqun, XIONG Jian, OUYANG Hui, et al. High-performance indirect current control scheme for railway traction four-quadrant converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6645-6654.
- [12] SONG K, WU M, WANG H. A high performance control strategy for three-level NPC EMU converters[C]//7th International Power Electronics Conference. Hiroshima, Japan: IEEE, 2014: 640-646.
- [13] VOJTĚCH B, JANŽ, ZDENĚK P. Control of single-phase AC/DC converter with compensation of low-frequency disturbances [C]//2011 International Conference on Applied Electronics. Pilsen, Czech Republic: IEEE, 2011: 51-54.
- [14] 赵葵银, 杨青, 唐勇奇. 基于虚拟磁链的 PWM 整流器的直接功率控制[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(2): 82-84.
ZHAO Kuiyin, YANG Qing, TANG Yongqi. Direct power control of PWM rectifier based on virtual flux[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(2): 82-84.
- [15] 丁祖军, 刘保连, 倪伟. PWM 整流器中优化变结构控制策略的设计[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(1): 76-83.
DING Zujun, LIU Baolian, NI Wei. Design of improved variable structure control for PWM rectifier[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(1): 76-83.
- [16] 马宏伟, 李永东, 郑泽东, 等. 一种 PWM 整流器的模型预测控制方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 21-25.
MA Hongwei, LI Yongdong, ZHANG Zedong, et al. Model predictive control of PWM rectifier[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 21-25.
- [17] MENTH S, MEYER M. Low frequency power oscillations in electric railway systems[J]. Elektrische Bahnen, 2006, 104(5): 216-221.
- [18] 陆明科, 揭贵生, 王恒利, 等. 基于线性二次型调节器的三相逆变器积分+状态反馈控制[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1941-1947.
LU Mingke, JIE Guisheng, WANG Hengli, et al. A linear quadratic regulator based control strategy with integral control and state feedback for three-phase inverter[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1941-1947.
- [19] RUGH W J. Linear system theory[M]. 2nd ed. Upper Saddle River, New Jersey, USA: Prentice-Hall Information and System Sciences Series, 1996: 244-248.
- [20] 吴命利. 电气化铁道牵引网的统一链式电路模型[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 52-58.
WU Mingli. Uniform chain circuit model for traction networks of electric railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 52-58.
- [21] 张杨, 刘志刚. 基于电磁暂态分析的高速铁路牵引网谐波模型及谐波特性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 70-75.
ZHANG Yang, LIU Zhigang. Modelling and characteristic analysis of harmonic in high-speed railway traction network based on PSCAD/EMTDC platform[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 70-75.

作者简介:



向川

向川(1991—),男,云南昆明人,硕士研究生,研究方向为高速铁路车网系统建模分析(E-mail: xiangchuan@my.swjtu.edu.cn);

刘志刚(1975—),男,河南巩义人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为现代信号处理及其在电力系统和牵引供电系统中的应用(E-mail: liuzg@swjtu.cn);

张桂南(1988—),男,黑龙江克东人,博士研究生,研究方向为高速铁路车网耦合系统稳定性分析;

姚书龙(1991—),男,甘肃陇南人,硕士研究生,研究方向为现代信号处理及其在牵引供电系统中的应用。

Low-frequency oscillation overvoltage damping based on multivariable control for high-speed railway

XIANG Chuan, LIU Zhigang, ZHANG Guinan, YAO Shulong

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The voltage low-frequency oscillation of high-speed railway traction network may block the traction of EMUs (Electrical Multiple Units), aiming at which, a state space model of line-side pulse rectifier is established, the multivariable control strategy of four-quadrant converter is mathematically deduced and its parameters are designed in detail. The stability of traction network system is studied based on the derived closed-loop state equations for the EMUs with multivariable control, which shows the system is in the asymptotic stability state. A doubly redundant rectifier and its control model are simulated in MATLAB/Simulink and the control effect is compared between the instantaneous direct current control and the multivariable control, which shows the multivariable control has better dynamic and static performance. The simulated rectifier model is applied to the simulation model chain of traction network system for two control strategies, which further verifies the better performance of multivariable control in the overvoltage damping during the low-frequency oscillation of traction network.

Key words: traction drive; high-speed railway; pulse rectifier; multivariable control; traction network system; stability; low-frequency oscillation; overvoltage; damping