

# 城轨牵引系统对主变压器降容率的影响分析

张明锐<sup>1</sup>, 龚晓冬<sup>1</sup>, 钟建辉<sup>2</sup>, 唐贾言<sup>2</sup>

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 上海市城市建设设计研究总院, 上海 200125)

**摘要:** 以轨道交通集中供电方式为例, 分别建立了交、直流 2 种牵引方式下的 12 脉波、24 脉波整流供电系统模型, 研究在不同牵引、整流方式下谐波电流对主变压器降容率的影响。研究结果表明, 降容率随直流电阻损耗增大而减小; 相比 12 脉波整流, 24 脉波整流对主变降容率影响较小; 降容率随牵引负荷功率增大而减小。研究结果对轨道交通牵引系统整流器方案选择、牵引方式选择和主变压器容量确定提供了依据。

**关键词:** 供电方式; 整流方式; 谐波; 交流牵引; 变压器降容率

**中图分类号:** U239.5

**文献标志码:** A

## Analysis of Effect of Urban Mass Transit Traction on Derating of Transformers

ZHANG Mingrui<sup>1</sup>, GONG Xiaodong<sup>1</sup>, ZHONG Jianhui<sup>2</sup>, TANG Jiaayan<sup>2</sup>

(1. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute, Shanghai 200125, China)

**Abstract:** Models of power supply system composed by AC and DC traction modes with 12-pulse or 24-pulse rectifiers were established by taking centralized power supply in rail transit for example in order to study the effect on derating of transformers caused by harmonic currents in different traction and rectification. The study results show that the higher proportion of DC resistance losses in the total load losses of the transformer is, the lower derating rate is; 24-pulse rectifier has less effect on transformer derating than 12-pulse rectifier; the larger the traction load power is, the lower the derating rate is. The results provide reference for selection of rectifier system, traction type and the main transformer's capacity determination in urban mass transit.

**Key words:** power supply type; rectifier system; harmonics;

AC traction; transformer derating

随着电力电子设备的大量应用, 电网谐波污染日益严重。变压器是电力系统中的重要设备, 谐波电流不仅产生附加损耗, 导致其出力下降, 严重时还会降低使用寿命。因此, 深入研究谐波损耗对变压器具有重要意义。

变压器谐波损耗计算方法多样, 文献[1]提出参数法, 即根据变压器内部参数拟合公式计算谐波损耗。文献[2-3]在使用变压器试验参数计算的同时考虑了集肤效应, 但是这种方法所需参数与变压器内部材料、结构相关, 获取较难。文献[4]利用经验公式估算谐波损耗, 当变压器结构相差较大时结果会有较大偏差。本文利用 IEEE C57.110—2008<sup>[5]</sup> 标准提出的谐波损耗因子计算附加损耗, 并计算由此引起的变压器降容率。该方法将变压器的损耗以损耗因子的形式反映, 克服了需获取大量试验数据的困难, 特别适用于工程设计和评估的需要<sup>[6]</sup>。

以轨道交通供电系统实际电气参数为依据, 仿真计算 12 脉波与 24 脉波整流、直流牵引与交流牵引方式下牵引系统的谐波电流, 定量计算整流系统和牵引方式对主变压器降容率的实际影响, 为轨道交通牵引供电系统的方案选择和主变压器选择提供科学依据和工程指导。

## 1 轨道交通牵引供电方式

城市轨道交通供电方式可分为集中式、分散式和混合式 3 种。

集中供电方式是指由 110 kV 城市电网供电, 经主变电所形成 35 kV 中压环网, 再经牵引变电所降

收稿日期: 2012-10-26

基金项目: 上海市自然科学基金(13ZR1444400); 上海市科委重大项目(13DZ1200403); 中央高校基本科研业务费专项资金(0800219169)

第一作者: 张明锐(1971—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为轨道交通供电、微网与分布式发电。E-mail: zmr@tongji.edu.cn

通讯作者: 龚晓冬(1988—), 男, 硕士生, 主要研究方向为轨道交通供电。E-mail: gongxiaodong88@hotmail.com

压整流后分别为牵引负载和动力照明设施供电。当一座牵引变电站因故障退出运行时,为减少电压降,采取大双边供电方式<sup>[7]</sup>。分散供电方式是指不设主变电所,直接由城市 35 kV 或 10 kV 变电所向轨道沿线的牵引变电所、降压变电所供电。混合供电方式即以集中供电为主,部分线路采用分散供电补充。目前我国轨道交通系统较多地采用了集中供电方式<sup>[8]</sup>。

牵引方式分为直流牵引和交流牵引。直流牵引一般采用直流串励电动机作为牵引动力,电能直接取自 DC1500V 接触网;交流牵引一般采用三相异步电动机作为牵引动力。为抑制牵引供电系统产生的谐波电流注入电网,目前我国城市轨道交通的牵引整流变电站已经由 12 脉波向 24 脉波发展,并将以 24 脉波为主<sup>[9]</sup>。

## 2 变压器降容率算法<sup>[5]</sup>

谐波条件下,对于油浸式变压器,总负荷损耗标么值  $P_{LL}^*$  为

$$P_{LL}^* = I^*{}^2 (1 + F_{HL} P_{EC-R}^* + F_{HL-STR} P_{OSL-R}^*) \quad (1)$$

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2} \quad (2)$$

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2} \quad (3)$$

式中:  $I^*$  为受谐波影响的变压器负荷电流标么值;  $F_{HL}$  为绕组涡流损耗谐波损耗因子;  $P_{EC-R}^*$  为额定状态下绕组涡流损耗标么值;  $F_{HL-STR}$  为杂散损耗谐波损耗因子;  $P_{OSL-R}^*$  为额定状态下杂散损耗标么值;  $h$  为谐波次数;  $h_{\max}$  为最大谐波次数;  $I_h$  为  $h$  次谐波电流有效值。

从式(2)、式(3)定义可知,在给定谐波电流的频谱组成后,结合实际运行电流便可算出谐波损耗因子<sup>[10]</sup>,然后根据变压器参数确定谐波电流造成的降容率。

为限制总负荷损耗低于额定值  $P_{LL-R}^*$ ,最大允许电流标么值为

$$I_{\max}^* = \sqrt{\frac{P_{LL-R}^*}{1 + F_{HL} P_{EC-R}^* + F_{HL-STR} P_{OSL-R}^*}} \quad (4)$$

定义变压器的降容率为

$$R_{A/R} = \frac{S_R - S}{S_R} \times 100\% = 1 - \frac{V_{rms}}{V_{rms-R}} \cdot I_{\max}^* \quad (5)$$

式中:  $S_R$ ,  $V_{rms-R}$  分别为变压器额定容量、额定电压;  $S$ ,  $V_{rms}$  分别为谐波条件下变压器运行容量、电压有

效值<sup>[10-11]</sup>。

定义变压器总杂散损耗为

$$P_{TSL-R} = P_{EC-R} + P_{OSL-R} = P_{LL-R} - K(I_{1-R}^2 R_1 + I_{2-R}^2 R_2) \quad (6)$$

式中:  $P_{EC-R}$  为额定状态下绕组涡流损耗;  $P_{OSL-R}$  为额定状态下杂散损耗;  $P_{LL-R}$  为额定状态下负荷损耗;  $K$  为常数;  $I_{1-R}$  为变压器一次侧额定电流;  $R_1$  为变压器一次侧相间直流电阻;  $I_{2-R}$  为变压器二次侧额定电流;  $R_2$  为变压器二次侧相间直流电阻。

对单相变压器,  $K$  取 1.0; 对三相变压器,  $K$  取 1.5; 对  $\Delta$  型绕组,  $R_1 = (2/9) \times R_{dc1}$ ,  $R_2 = (2/9) \times R_{dc2}$ ; 对 Y 型绕组,  $R_1 = (2/3) \times R_{dc1}$ ,  $R_2 = (2/3) \times R_{dc2}$ ; 其中,  $R_{dc1}$ ,  $R_{dc2}$  分别为变压器一次侧、二次侧直流电阻。

对于油浸式变压器,可近似认为

$$P_{EC-R} = 0.33 P_{TSL-R} \quad (7)$$

## 3 牵引供电系统模型

### 3.1 整流器模型

目前上海市建成运行的轨道交通系统基本采用集中供电方式。轨道交通 1 号线历史最悠久,供电系统亦具有代表性,又经历了牵引系统“直改交”; 2 号线开始即直接采用交流牵引方式。因此,以 1 号线供电系统参数仿真计算直流牵引方式下谐波电流,以 2 号线为例分析交流牵引方式下的谐波电流。

1 号线主变压器采用油浸自冷式双绕组变压器,额定电压比为 115:35,一次侧调压范围为  $\pm 9 \times 1.1\%$ , Ynd11 接线,额定容量为 31.5 MV·A, 1 号线由于采用德国设备,中压采用 33 kV, 变压器基本参数如表 1 所示。

表 1 地铁 1 号线主变压器参数

Tab.1 Parameters of the main transformer in Metro Line No.1

额定容量 $S_N/(kV \cdot A)$	空载损耗/kW	负荷损耗/kW	空载电流 分数/%	阻抗电压 分数/%
31 500	35	156	0.84	10.5
一次侧直流电阻/ $\Omega$		二次侧直流电阻/ $\Omega$		
1.05×3		0.194×3		

整流变压器选用户内干式变压器,额定电压分别为 33.00, 1.22, 1.22 kV, 一次侧调压范围为  $\pm 2 \times 2.5\%$ , 额定容量为 4.44 MV·A, 三绕组容量比为 2:1:1, 阻抗电压分数 8%,  $\Delta/Y-5$  与  $\Delta/\Delta-0$  接线, 2 组电压相位相差  $30^\circ$ 。由于  $\Delta$  联接的二次绕组相电压是星形联接二次绕组相电压的  $\sqrt{3}$  倍, 因此 2

组交流电源线电压相等. 整流变压器次级线圈接整流器, 2 组三相桥式整流器互联, 组成 12 脉波整流电路<sup>[12]</sup>, 如图 1 所示.

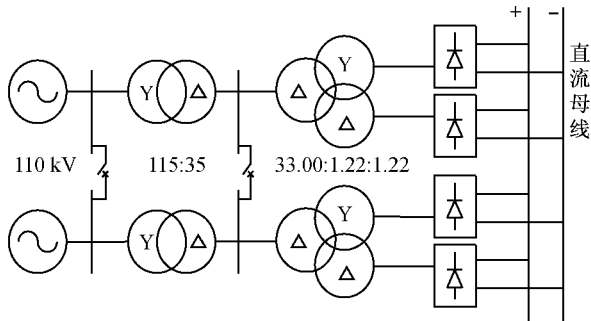


图 1 12 脉波整流方式供电系统模型

Fig.1 Power system model with 12-pulse rectifier

24 脉波整流时每个波头所占电角度为  $15^\circ$ , 因此需要 2 台变压器分别移相  $7.5^\circ$  和  $-7.5^\circ$ , 整流器次边输出端并联, 即为 24 脉波直流电源, 如图 2 所示.

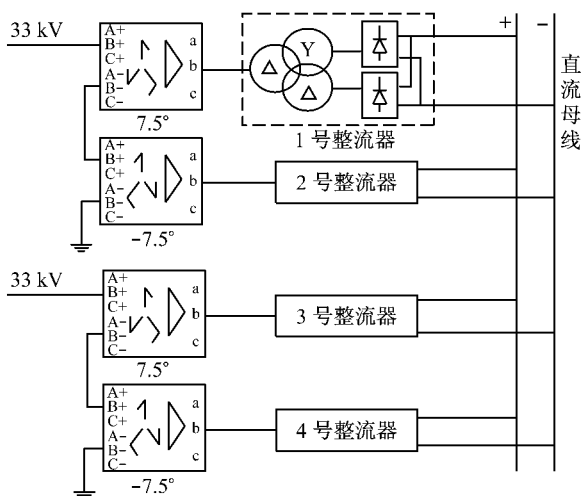


图 2 24 脉波整流方式供电系统模型

Fig.2 Power system model with 24-pulse rectifier

## 3.2 牵引负载模型

### 3.2.1 直流牵引方式

早期的上海地铁 1 号线采用直流牵引, 6 节编组, 动拖比为 2:1, 即由 4 节动车和 2 节拖车组成. 如图 3 所示, 每节动车包含 4 台串激直流电机, 单台功率 207 kW, 额定电压 750 V, 连接方式为两串两并. 削磁电阻  $R_1$  与电机 M1, M2 的励磁绕组并联后经平波电抗器 L2, GTO(门极关断晶闸管)斩波器至电源负端, 电机 M3, M4 同理. V1, V2 开关频率为 500 Hz, 相差  $180^\circ$  交替工作. 为了克服浪涌电压及网压波动, 线路输入处有一滤波装置, 即由滤波电容电感组成的滤波器<sup>[7]</sup>.

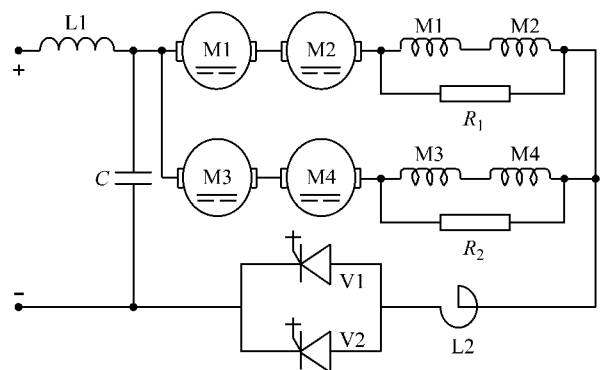


图 3 单节动车直流传动负载模型

Fig.3 DC load model of single vehicle

### 3.2.2 交流牵引方式

上海地铁 2 号线采用交流牵引方式, 牵引负载主要考虑逆变器和交流牵引电机, 控制方式采用异步电机磁场定向矢量控制, 如图 4, 图中,  $\omega$  为转子角速度实测值;  $\omega^*$  为转子角速度参考值;  $\Psi^*$  为磁链参考值;  $T_e^*$  为电磁转矩参考值;  $i_d^*$ ,  $i_q^*$  分别为定子电流的励磁分量、转矩分量参考值;  $i_a^*$ ,  $i_b^*$ ,  $i_c^*$  为定子电流参考值;  $U_{dc}$  为逆变器直流侧电压;  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  为异步电机定子电流实测值;  $\theta$  为转子磁链角;  $i_d$ ,  $i_q$  分别为实测定子电流的励磁分量、转矩分量;  $\Psi_r$  为转子磁链.

在交流牵引模型中, 整流器直流侧(接触网侧)和逆变器直流侧(负载部分)均并有支撑电容, 作用是滤平输入电路的电压纹波及限制负载突变时的直流电压波动<sup>[13-14]</sup>.

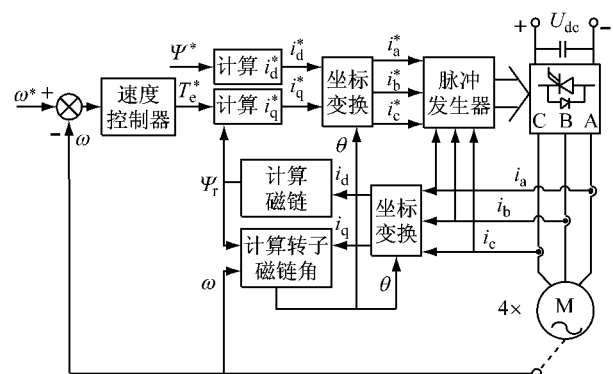


图 4 单节动车交流传动负载模型

Fig.4 AC load model of single vehicle

早期上海地铁 2 号线采用动拖比 2:1 的 6 节编组列车, 但随着客流量的增加, 2 号线现已基本采用动拖比 3:1 的 8 节编组列车, 运载能力得到了提升. 为研究负载功率对于主变降容率的影响, 分别对 6 节和 8 节编组列车进行仿真, 驱动方式均为 1C4M, 即 1 台逆变器同时驱动 4 台电机. 所用电机为三相 4 极异步电机, 参数如表 2<sup>[15]</sup>.

表 2 地铁 2 号线牵引电机主要参数  
Tab.2 Parameters of the traction motor in  
Metro Line No.2

额定功率/kW		功率因数	额定电压/V
190		0.85	1 050
额定电 流/A	额定频 率/Hz	额定转矩/ (N·m)	额定转速/ (r·min <sup>-1</sup> )
132	61	1 008	1 800

4 仿真计算

4.1 直流牵引 12 脉波整流

以搭建的 12 脉波整流模型进行直流牵引仿真,得到接触网电压和单节动车负载电流(图 5)以及主变二次侧 b 相电流及频谱(图 6)。

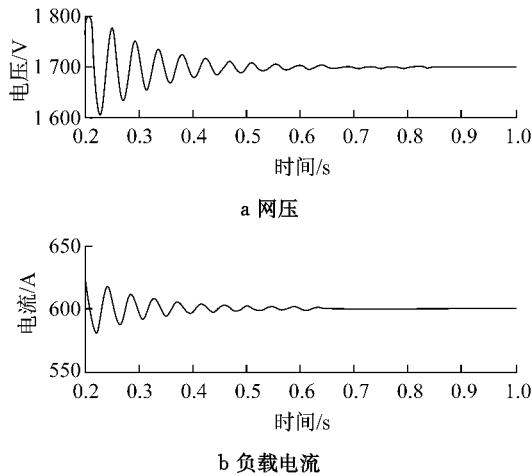


图 5 直流牵引下 12 脉波整流网压及单节动车负载电流  
Fig.5 Network voltage and single vehicle load current  
in DC traction with 12-pulse rectifier

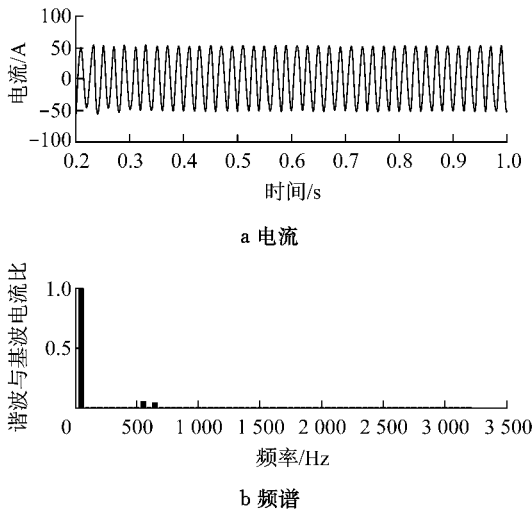


图 6 直流牵引 12 脉波整流下主变二次侧 b 相电流及其频谱  
Fig.6 Secondary side phase b current of the main  
transformer and its spectrum in DC traction  
with 12-pulse rectifier

图 5 中,由于直流传动负载中滤波器的影响,网压及负载电流在仿真开始阶段存在震荡,约 0.7 s 后趋于稳定。

取采样频率 6 400 Hz 对主变二次侧稳态电流进行快速傅里叶变换(FFT),得到各次谐波电流如表 3。

表 3 直流牵引 12 脉波整流下主变二次侧谐波电流峰值  
Tab.3 Secondary side harmonic currents peak value of  
the main transformer in DC traction with 12-  
pulse rectifier

$h$		$I_h$		$h$		$I_h$		$h$		$I_h$	
1	50.738 1	21	0.030 8	45	0.049 7						
2	0.011 1	23	0.488 5	47	0.140 2						
3	0.040 3	25	0.431 5	49	0.130 2						
4	0.018 1	27	0.022 5	51	0.019 2						
5	0.019 7	29	0.022 3	53	0.018 7						
7	0.025 1	31	0.033 6	55	0.060 0						
9	0.027 7	33	0.035 6	57	0.064 9						
11	3.051 0	35	0.248 3	59	0.085 1						
13	2.146 3	37	0.212 8	61	0.080 2						
15	0.019 3	39	0.019 9	63	0.017 2						
17	0.020 0	41	0.019 8								
19	0.028 9	43	0.047 6								

主变压器二次侧电流总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD<sub>1</sub>)为 7.51%。由式(2)、式(3)得  $F_{HL}=1.944\ 9$ ,  $F_{HL-STR}=1.036\ 1$ 。

计算得变压器一次侧、二次侧额定电流分别为 158.14,519.62 A,其直流电阻分别为 2.100,0.129 Ω,直流电阻损耗为 131.02 kW。

直流电阻损耗约占变压器容量的 0.416%。根据式(6)和式(7)计算变压器各部分损耗为  $P_{TSL-R}=24.98\ kW$ ,  $P_{EC-R}=8.24\ kW$ ,  $P_{OSL-R}=16.74\ kW$ 。以直流电阻损耗为基准,  $P_{LL-R}^*=1.190\ 0$ ,  $P_{EC-R}^*=0.062\ 9$ ,  $P_{OSL-R}^*=0.127\ 7$ 。

谐波影响下  $P_{EC}^*=F_{HL}P_{EC-R}^*=0.122\ 3$ ,  $P_{OSL}^*=F_{HL-STR}P_{OSL-R}^*=0.132\ 3$ 。

由式(4)得主变压器最大允许电流降为

$$I_{\max}^* = \sqrt{\frac{P_{LL-R}^*}{1 + F_{HL}P_{EC-R}^* + F_{HL-STR}P_{OSL-R}^*}} = 97.39\%$$

则降容率为

$$R_{APR} = 1 - \frac{V_{rms}}{V_{rms-R}} \cdot I_{\max}^* = 1 - \frac{33\ 474.18}{35\ 000} \times 97.39\% = 6.86\%$$

4.2 直流牵引 24 脉波整流

直流牵引方式不变,采用 24 脉波整流进行仿真,计算方法相同,得到结果如图 7、图 8、表 4。

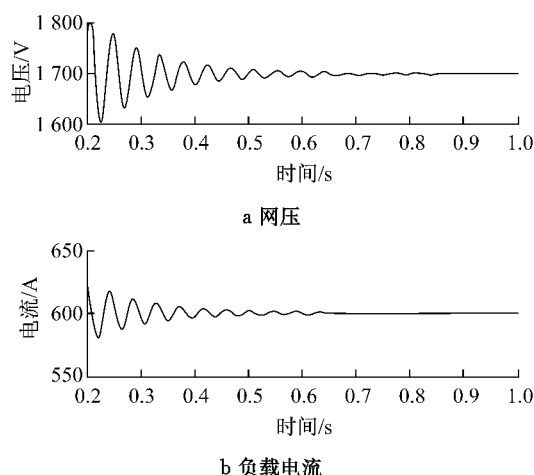


图 7 直流牵引下 24 脉波整流网压及单节动车负载电流

Fig.7 Network voltage and single vehicle load current in DC traction with 24-pulse rectifier

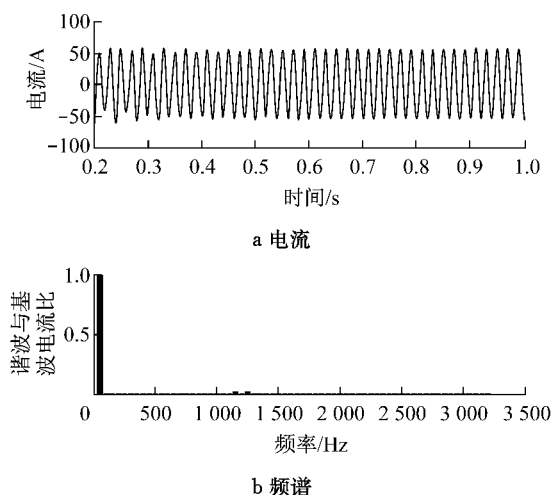


图 8 直流牵引 24 脉波整流下主变二次侧 b 相电流及其频谱

Fig.8 Secondary side phase b current of the main transformer and its spectrum in DC traction with 24-pulse rectifier

表 4 直流牵引下 24 脉波整流主变降容率计算参数

Tab.4 Derating of transformer parameter in DC traction with 24 pulse rectifier

THD <sub>i</sub>	$V_{rms}/V$	$F_{HL}$	$F_{HL-STR}$
3.21%	33 461.97	1.656 2	1.012 3
$P_{EC}$	$P_{OSL}$	$P_{LL-R}$	$I_{max}^*$
0.104 2	0.129 3	1.19	98.22%
			$R_{APR}$
			6.10%

#### 4.3 交流牵引 12 脉波整流

对交流牵引 12 脉波整流方式下的 1 列 4M2T, 即 4 动 2 拖编组的列车进行 1 s 仿真. 0.5 s 时牵引电机额定负载突加至  $1\ 008\ N \cdot m$ , 得到电机线电压、三相定子电流(图 9)、转速、转矩(图 10)、接触网电压波形(图 11). 对稳态主变二次侧 b 相电流(图 12)进行 FFT 分析得到表 5. 主变降容率计算结果见

表 6.

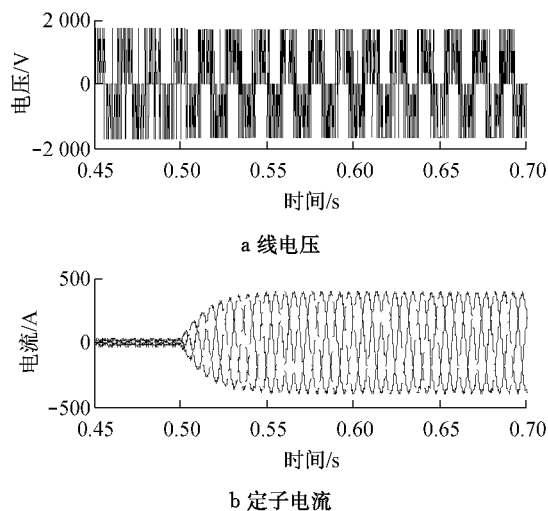


图 9 电机线电压与三相定子电流的变化

Fig.9 Motor line voltage and three-phase stator current

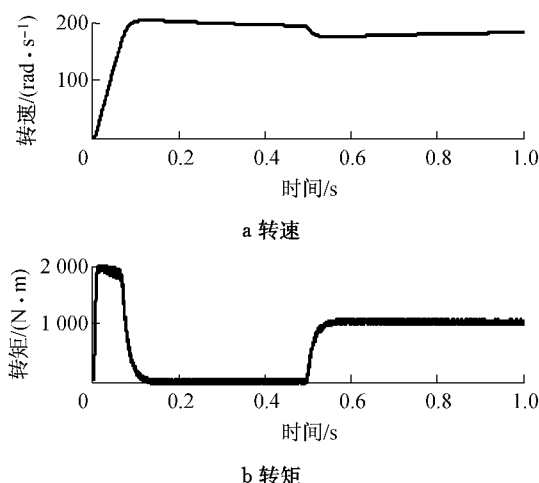


图 10 电机转速与转矩的变化

Fig.10 Motor speed and torque

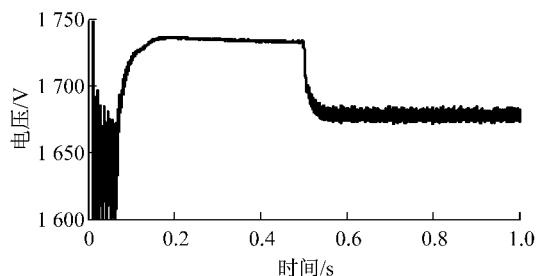


图 11 接触网电压的变化

Fig.11 Contact voltage

#### 4.4 交流牵引 24 脉波整流

同样,对交流牵引 24 脉波整流方式下的 1 列 4M2T 编组列车仿真. 接触网电压、主变二次侧相电流及频谱见图 13 和图 14, 电流 FFT 分析和主变降容率计算结果见表 7 和表 8.

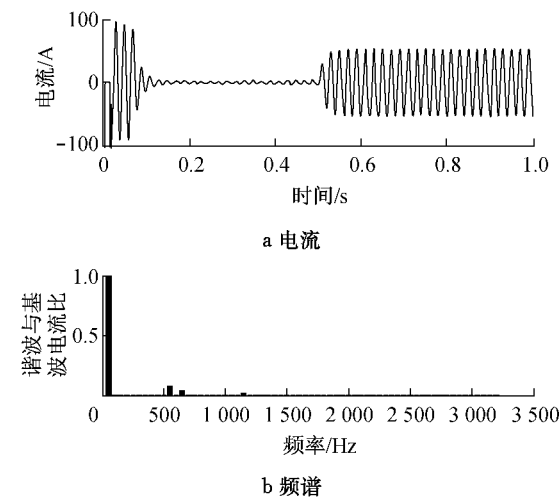


图 12 交流牵引 12 脉波整流下主变二次侧 b 相电流及其频谱

Fig. 12 Secondary side phase b current of the main transformer and its spectrum in DC traction with 12-pulse rectifier

表 5 交流牵引 12 脉波整流下主变二次侧电流谐波峰值

Tab.5 Secondary side harmonic currents peak value of the main transformer in AC traction with 12-pulse rectifier

A					
$h$	$I_h$	$h$	$I_h$	$h$	$I_h$
1	48.038 5	17	0.029 4	41	0.025 6
2	0.014 8	19	0.033 5	43	0.064 0
3	0.074 4	21	0.031 6	45	0.068 8
4	0.042 3	23	0.733 8	47	0.184 4
5	0.038 4	25	0.575 0	49	0.155 7
6	0.036 0	27	0.027 3	51	0.026 0
7	0.024 8	29	0.026 3	53	0.024 7
8	0.015 1	31	0.058 0	55	0.081 3
9	0.029 6	33	0.046 0	57	0.081 2
11	3.634 5	35	0.290 8	59	0.112 2
13	2.266 9	37	0.299 7	61	0.107 8
15	0.028 7	39	0.023 9	63	0.029 7

表 6 交流牵引 12 脉波整流主变降容率计算参数

Tab.6 Derating of transformer parameters in AC traction with 12-pulse rectifier

THD <sub>i</sub>	V <sub>rms</sub> /V	F <sub>HL</sub>	F <sub>HL-STR</sub>	
9.21%	33 474.18	2.495 5	1.054 8	
P <sub>ΣC</sub>	P <sub>ΣSL</sub>	P <sub>ΣL-R</sub>	I <sub>max</sub> *	R <sub>APR</sub>
0.157 0	0.134 7	1.19	95.98%	8.20%

为了分析牵引负荷大小对主变降容率的影响,给出了交流牵引方式下 6M2T 编组的计算结果.具体仿真过程省略.直流牵引下 4M2T、交流牵引下 4M2T 和 6M2T 编组的动车牵引负载总功率分别为 3 312,3 040 和 4 560 kW.

表 9 给出了所有仿真工况下的主变降容率计算结果.

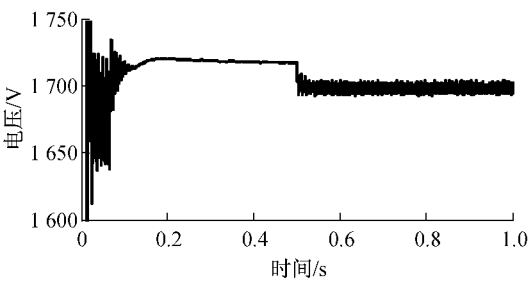


图 13 接触网电压  
Fig. 13 Contact voltage

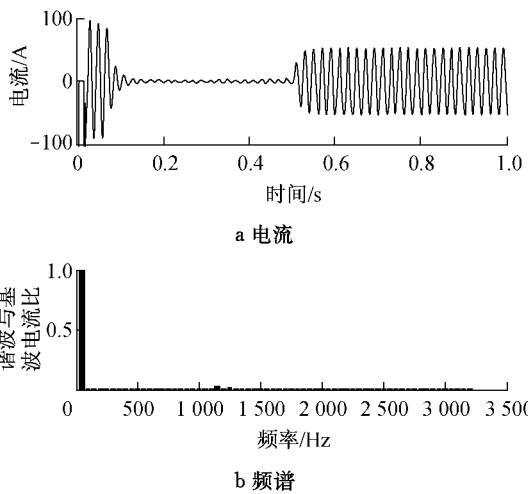


图 14 交流牵引 24 脉波整流下主变二次侧 b 相电流及其频谱

Fig. 14 Secondary side phase b current of the main transformer and its spectrum in DC traction with 24-pulse rectifier

表 7 交流牵引 24 脉波整流下主变二次侧电流谐波峰值

Tab.7 Secondary side harmonic currents peak value of the main transformer in AC traction with 24-pulse rectifier

A			
$h$	$I_h$	$h$	$I_h$
1	50.516 2	25	1.001 8
7	0.026 8	31	0.050 0
9	0.034 6	33	0.061 7
15	0.029 5	39	0.021 4
17	0.026 2	41	0.019 4
23	1.285 3	47	0.232 4

表 8 交流牵引下 24 脉波整流主变降容率计算参数

Tab. 8 Derating of transformer parameters in AC traction with 24-pulse rectifier

THD <sub>i</sub>	V <sub>rms</sub> /V	F <sub>HL</sub>	F <sub>HL-STR</sub>	
3.30%	33 461.97	1.690 5	1.013 1	
P <sub>ΣC</sub>	P <sub>ΣSL</sub>	P <sub>ΣL-R</sub>	I <sub>max</sub> *	R <sub>APR</sub>
0.106 3	0.129 4	1.19	98.13%	6.18%

4.5 讨论

由计算方法和仿真过程可知,变压器的直流电阻损耗对降容率有重要影响,但是变压器直流电阻

损耗需根据出厂试验测得,并随变压器制造工艺、测量方法、测量环境等因素而变化,实际情况会在额定值附近波动。因此,本文在额定值 0.416% 左右研究直流电阻损耗对降容率的影响。

表 9 不同牵引方式下主变降容率对比

Tab.9 Comparison of transformer derating between two modes of traction

牵引方式	12 脉波	24 脉波
直流 4M2T	6.86%	6.10%
交流 4M2T	8.20%	6.18%
交流 6M2T	6.65%	5.65%

设直流电阻损耗占主变压器额定容量  $S_N$  的比值为  $a$ ,在其他参数已知情况下可得降容率与直流电阻损耗关系为

$$R_{APR} = 1 - \frac{V_{rms}}{V_{rms-R}} \sqrt{\frac{P_{LL-R}}{(1-F) \cdot a \cdot S_N + F \cdot P_{LL-R}}}$$

其中:  $F=0.33F_{HL}+0.67F_{HL-STR}$ . 由此得到各牵引整流方式下降容率与直流电阻损耗关系(图 15)。

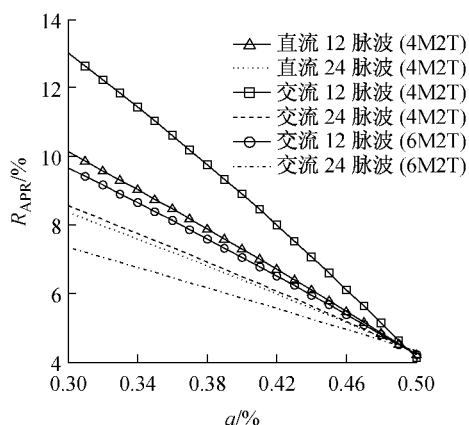


图 15 降容率与直流电阻损耗的关系

Fig.15 Relationship between transformer derating and DC resistance loss

综合分析,得到以下结论:

(1) 当牵引方式和整流方式不变时,降容率随直流电阻损耗增大而减小。

(2) 当牵引方式和直流电阻损耗不变时,24 脉波整流优于 12 脉波整流,对主变降容影响明显减小。

(3) 当直流电阻损耗和整流方式不变时,降容率随牵引负荷功率增大而减小。

## 5 结论

以上海地铁 1 号线、2 号线牵引供电系统实际参数为依据,建立了交、直流 2 种牵引方式下 12 脉波

和 24 脉波整流供电系统模型,仿真计算主变压器降容率,并对计算结果进行对比分析。研究表明,在城市轨道交通牵引供电系统中,谐波电流对主变压器实际出力产生了不可忽视的影响,采用 24 脉波整流是改善主变压器降容率的有效措施。车辆编组对主变降容率也有一定的影响,对于目前普遍应用的交流牵引 6M2T 编组列车,在 24 脉波整流时主变降容率为 5%~7%。另外,在考虑主变降容率时,应该考虑变压器直流损耗的变化。

## 参考文献:

- [1] 刘成君,杨仁刚. 变压器谐波损耗的计算与分析[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(13):33.  
LIU Chengjun, YANG Rengang. Calculation and analysis of transformer's harmonic loss[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 33.
- [2] 汪彦良,岳智顺,王金全,等. 谐波附加损耗及其降损节能分析[J]. 电气技术,2009(2):15.  
WANG Yanliang, YUE Zhishun, WANG Jinqian, et al. Analyzing the addition loss of harmonic and how to reducing it for energy-saving[J]. Electrical Engineering, 2009(2): 15.
- [3] Makarov S N, Emanuel A E. Corrected harmonic loss factor for transformers supplying nonsinusoidal load currents[C]//Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power Proceeding. Orlando: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2000: 87-90.
- [4] 王瑞珍,文凯成,刘丰. 换流变压器谐波损耗确定方法的研究[J]. 湖北电力,2002,26(1):12.  
WANG Ruizhen, WEN Kaicheng, LIU Feng. Study on the methods for the determination of harmonic loss on HVDC converter transformer[J]. Hubei Electric Power, 2002, 26(1): 12.
- [5] Transformers Committee of the IEEE Power Engineering Society. IEEE Std C57.110—2008 IEEE Recommended practice for establishing liquid-filled and dry-type power and distribution transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents[S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2008.
- [6] 王葵,商莹. 谐波情况下变压器发热分析和出力下降计算[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(21):50.  
WANG Kui, SHANG Ying. Transformer overheating analysis and derating calculation under harmonic[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 50.
- [7] 上海市建设委员会科学技术委员会. 地铁一号线工程[M]. 上海:上海科学技术出版社,1998.  
Science and Technology Committee of Shanghai Municipal Construction Commission. METRO LINE No. 1[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1998.
- [8] 杜芳. 地铁机车建模及直流牵引供电系统故障分析[D]. 北京:北京交通大学,2010.  
DU Fang. Modeling for metro locomotive and analysis of fault condition of DC traction power supply system[D]. Beijing:

- Beijing Jiaotong University, 2010.
- [9] 李良威,李群湛,刘伟. 24 脉波整流器外特性仿真及其在城市轨道交通中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2007, 10(10): 52.  
LI Liangwei, LI Qunzhan, LIU Wei. Simulation and application of external characteristic curve of 24-pulse rectifier in urban rail transit [J]. Urban Mass Transit, 2007, 10(10): 52.
- [10] 陶顺,肖湘宁. 变压器降容率及谐波损耗因子  $F_{HL}$  与  $K$  的比较[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(1): 63.  
TAO Shun, XIAO Xiangning. Transformer derating and comparison of harmonic loss factor  $F_{HL}$  with  $K$ -factor [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2008, 27(1): 63.
- [11] Yildirim D, Fuchs E F. Measured transformer derating and comparison with harmonic loss factor ( $F_{HL}$ ) approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 186.
- [12] 张文斌,靳希. 12 脉波整流电路 MATLAB-Simulink 仿真及谐波分析[J]. 华东电力, 2008, 36(4): 70.  
ZHANG Wenbin, JIN Xi. MATLAB-Simulink based simulation and harmonic analysis for 12-pulse rectifiers[J]. East China Electric Power, 2008, 36(4): 70.
- [13] 杨显进. CRH5 牵引变流器的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.  
YANG Xianjin. Research of the traction converter used in CRH5 [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [14] 范昊,沈小军,韦莉,等. 城市轨道交通与牵引供电系统电气模型研究[J]. 机电一体化, 2010, 16(9): 32.  
FAN Hao, SHEN Xiaojun, WEI Li, et al. Study on the electric models of urban rail transit and power supply system [J]. Mechatronics, 2010, 16(9): 32.
- [15] 崔俊国,陶生桂. 上海地铁 2 号线车辆交流传动系统仿真分析[J]. 机车电传动, 2002(1): 29.  
CUI Junguo, TAO Shenggui. Simulation and analysis of AC drive system for Shanghai Metro Line No. 2 [J]. Electric Drive for Locomotives, 2002(1): 29.

~~~~~

(上接第 1595 页)

- [5] DU Q, TANG X. The Improvement of VTD-XML processing model[C]//IEEE International Conference on Computer Science and Service System. Nanjing: IEEE, 2011: 2-4.  
Proceedings of the 2009 WRI International Conference on Communications and Mobile Computing. Kunming: CMC, 2009: 142-146.
- [6] Tomokazu Fujino. SVG + Ajax + R: a new framework for WebGIS[J]. Computational Statistics, 2007, 22(4): 511.
- [7] YUAN Man, CHEN Xiuhong, YANG Chunling, et al. A practical and light integrated WebGIS based on SVG [C]//CMC'09  
[8] DONG Xuemin, LI Yan. Standardization of SVG in implementing WebGIS[J]. ESIAT'09 Proceedings of the 2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology. Wuhan: ESIAT, 2009: 534-537.