

佛山地铁2号线牵引系统对区域电网电能质量的影响

介绍了佛山地铁2号线24脉波整流的基本原理，并使用PSCAD/EMTDC软件搭建了整流机组以及某牵引站的模型，定量计算出佛山地铁2号线牵引供电系统对该区域电网电能质量的影响，最后提出了相应措施，以确保地铁牵引供电系统安全稳定运行。

史建省 于 群/山东科技大学电气与自动化工程学院 董建森/清华大学信息科学技术学院 李 峰/湖南大学电气与信息工程学院



史建省/硕士研究生

佛山地铁2号线一期工程起于禅城区南庄站，止于广州南站，经佛山禅城区、顺德区、南海区和广州番禺区，联系中心组团，主要经由男装、石湾、魁奇路、佛陈路、文登路、林岳大道至广州南站，为连接中心组团与广州南站铁路枢纽的东西主干线，联系佛山与广州番禺的快轨交通线。

早期的地铁牵引系统12脉波整流应用比较广泛，但会产生大量11次、13次谐波，而同时11次、13次谐波经电缆放大的程度较大，是造成谐波超标的主要因素^[1-2]。随着科技的进步，近年来，24脉波整流以其优良的特性应用日渐广泛。佛山地铁2号线采用等效24脉波牵引整流机组。每座牵引变电所设置两套12脉波牵引整流机组，分别通过断路器接于同一段35 kV母线，并联运行构成等效24脉波整流^[3]。

由于地铁牵引采用24脉波整流供电方式，从电网吸收工频功率的同时向电网注入谐波电流；另外，地铁机车还具有牵引功率大，负荷变化快和沿线分布的特点^[4]。随着地铁机车负荷的逐年增大，地铁牵引供电系统对区域电网电能

质量造成的影响日益突出，威胁电网的稳定运行。因此有必要对地铁牵引站接入后的电能质量问题进行分析和评估，以保证其电能质量符合国家相关标准。本文针对佛山地铁2号线整流机组以及负荷特性，根据某实际牵引站24脉波整流方式及负荷特性搭建仿真模型。分析负荷峰值与负荷低谷情况下地铁牵引供电系统对区域电网产生电能质量问题的原因，仿真计算该牵引站负荷峰值时刻的谐波、电压波动和负荷低谷时刻的功率因数。

地铁牵引供电系统

地铁牵引供电系统是将主变压器的35 kV三相交流电降压后整流成牵引电力机车所需要的1 500 V直流电，送至牵引接触网，为地铁机车供电。地铁机车牵引供电系统结构如图1所示。

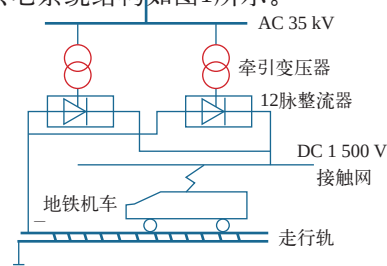


图1 地铁机车牵引供电系统结构图

牵引网是将馈线送来的电能供给地铁牵引的中间设备，地铁机车的接触网为牵引网的正极，直接对机车供电；列车走行轨为牵引网的负极。

24脉波整流机工作原理

关键词/Keywords

佛山地铁2号线·

24脉波整流·

牵引站·

供电系统·

电能质量·

24脉波整流机是由两台12脉波整流器并联组成, 每台12脉波整流器由两台三相桥式整流电路组成。12脉波整流采用的整流变压器为轴向双分裂式牵引整流变压器, 由两个三相6脉波全波整流桥组成, 其中一个整流桥接至整流变压器二次Y形绕组, 另一个整流桥接至整流变压器二次D形绕组, 从而使两台6脉波的三相桥式整流电路网侧相位互差30°, 两个三相整流桥并联构成6相12脉波的整流变压器电力系统。

两台12脉波整流器网侧绕组分别需要移相-7.5°和+7.5°, 这样才可以构成等效24脉波整流, 为实现这种移相, 整流变压器一次侧采用延边三角形接法, 延边三角形相量图如图2所示。

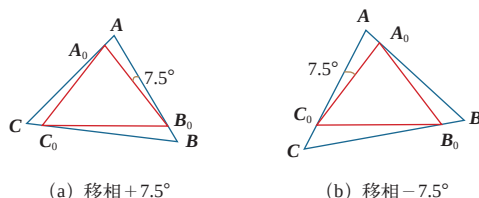


图2 网侧移相±7.5°相量图

对于6脉波整流输出直流电流可表示为 $i_d(\omega t) = I_m \cos \omega t$, 而分别移相±7.5°的两台变压器漏抗参数相同, 这两台变压器网侧的合成电流可按式计算^[5]。

电阻性负荷为

$$i(\omega t) = \frac{5I_m}{\pi} \left[\left(1 + \frac{2\pi}{3\sqrt{3}}\right) \cos \omega t - \frac{1}{11} \cos 23\omega t + \frac{1}{13} \cos 25\omega t - \dots \right] \quad (1)$$

电感性负荷为

$$i(\omega t) = \frac{8\sqrt{3}I_m}{\pi} \left[\cos \omega t - \frac{1}{23} \cos 23\omega t + \frac{1}{25} \cos 25\omega t - \dots \right] \quad (2)$$

由以上两式可以看出, 无论是电阻性负荷还是电感性负荷, 理论上24脉波整流机组在网侧仅会产生 $24n \pm 1$ 次谐波, 不存在低次谐波, 因而能够极大地改善电能质量。

地铁牵引站引起的电能质量问题

1. 谐波

电力系统中的谐波主要由于铁磁饱和电力设备、电子开关设备等非线性设备引起, 对于地铁牵引供电系统而言, 谐波电流的主要来源是整流机中的电力电子元件。这些谐波电流经过电缆还会产生放大, 对供电系统产生诸多危害: ①增加输电线路、变压器等各种电力设备的损耗; ②降低设备的使用效率, 影响设备寿命; ③易导致保护装置误动, 引起跳闸; ④引发电网谐振, 威胁电网安全稳定运行; ⑤对人体健康以及各类通信设备产生影响。

2. 电压波动

电压波动为一系列电压变动或连续的电压偏差。电压波动值为电压方均根值 $U_{\max}$ 和 $U_{\min}$ 的差值 ΔU , 常以标称电压 U_N 的百分比来表示其相对百分数^[6]

$$\Delta V = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \times 100\% = \frac{\Delta U}{U_N} \times 100\% \quad (3)$$

牵引站馈线电压波动的根本原因是机车负荷急剧变化引起的, 如机车起动、加速、减速和停止等操作, 牵引变压器接入电网示意图如图3所示。

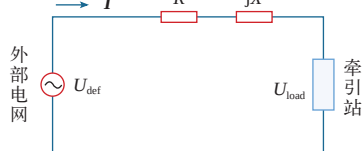


图3 牵引变接入电网示意图

设牵引变压器的输入有功和无功功率分别为 P 和 Q , 则

$$U_{\text{ref}} = U_{\text{load}} + \frac{PR + QX}{U_{\text{load}}} + j \frac{PR - QX}{U_{\text{load}}} \quad (4)$$

由式(4)可知, 牵引站输入功率的波动将会导致电网电压波动。

3. 功率因数

地铁牵引系统里的电缆产生大量的充电无功, 在夜间地铁停运以后, 没有足够的负荷吸收这些容性无功, 必然会产生无功倒送, 导致功率因数极低。电缆正常工作时电容分布电路图如图4所示。

设电缆长度为 l , 电源频率为 f , 则图4中相间

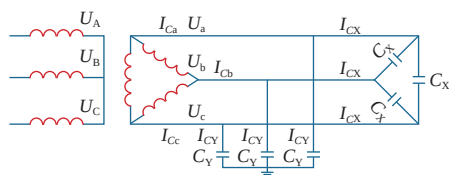


图4 电缆正常工作时电容分布电路图

电容电流为^[7]

$$I_{CX} = 3\omega C_X U l = 6\pi f C_X U l \quad (5)$$

电缆对地电容电流为

$$I_{CY} = \omega C_Y U l = 2\pi f C_Y U l \quad (6)$$

设 C_0 为每公里电缆的等效工作电容，则长度为 l 的电缆中总的电容电流为

$$I_C = I_{CX} + I_{CY} = \omega U l (3C_X + C_Y) = \omega U C_0 \quad (7)$$

因而，长度为 l 的电缆所产生的容性无功功率为

$$Q_C = U I_C = \omega C_0 U^2 l \quad (8)$$

由此可见，电缆的容性无功功率与电缆长度以及电压等级有关，电压等级越高，一定长度的电缆产生的容性无功越多，与负载无关。所以，地铁供电系统一旦建成，电缆的容性无功功率就确定下来了，无论是在负荷高峰时段还是低谷时段，产生的容性无功相同。所以夜间休车时段，没有足够多的负荷吸收电缆产生的容性无功，导致无功倒送，考核点功率因数偏低。

仿真模型及结果

为评估采用24脉波整流机组的佛山地铁2号线对区域电网电能质量的影响，以2号线某牵引站为例使用PSCAD软件搭建了系统仿真模型，如图5所示（图5中地铁机车代表某一时刻接触网上若干辆机车的等效负荷）。电能质量考核点选在上一级

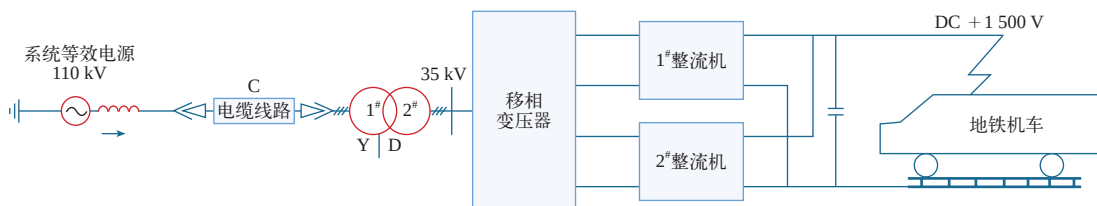


图5 佛山地铁2号线某牵引站仿真模型

变电站至该牵引站110 kV馈线出口处。

1. 系统仿真参数

该工程分为近期、远期和系统规模，不同时期仿真参数如下。

(1) 近期

降压变压器Yd11接线，容量40 MV·A，短路阻抗10.5%。高峰负荷： $P = 14.304\ 484\ \text{MW}$ ， $Q = 4.279\ \text{Mvar}$ ；低谷负荷： $P = 0.672\ \text{MW}$ ， $Q = -0.906\ \text{Mvar}$ ；最大短路电抗： $X_0 = 0.034\ \text{H}$ 。

(2) 远期

降压变压器Yd11接线，容量40 MV·A，短路阻抗10.5%。高峰负荷： $P = 16.519\ \text{MW}$ ， $Q = 5.341\ \text{Mvar}$ ；低谷负荷： $P = 0.78\ \text{MW}$ ， $Q = -0.825\ \text{Mvar}$ ；最大短路电抗： $X_0 = 0.028\ \text{H}$ 。

(3) 系统规模

降压变压器Yd11接线，容量63 MV·A，短路阻抗10.5%。高峰负荷： $P = 19.540\ \text{MW}$ ，

$Q = 6.711\ \text{Mvar}$ ；低谷负荷： $P = 0.96\ \text{MW}$ ， $Q = -0.69\ \text{Mvar}$ ；最大短路电抗： $X_0 = 0.022\ \text{H}$ 。

该模型中，地铁机车负荷模型采用地铁机车等效模型^[8]。系统等效电源根据上一级变电站至该牵引变压器馈线最小短路容量求得系统最大短路电抗。机车高峰负荷选取地铁运行密度最大的高峰时段（18：00~19：00）负荷，低谷负荷选取地铁凌晨停运后的负荷，支撑电容取2 000 μF 。由于24脉波整流导致其他电能质量问题较轻微，本文评估负荷高峰时段谐波含量、负荷急剧变化引起的电压波动以及负荷低谷时段考核点功率因数。

2. 仿真模型验证

按照该牵引变压器实际情况以及24脉波整流基本原理搭建了系统仿真模型，运行结果显示牵引站馈线电流波形呈现24脉波整流特点，满足该模型搭建的基本要求，也验证了模型的正确性。馈线谐波频谱、电流波形和整流机直流侧输出电

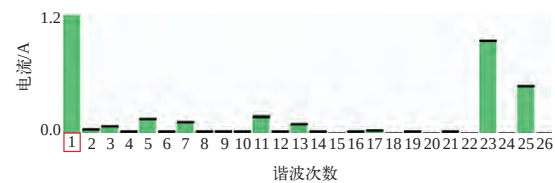


图6 牵引站110 kV侧电流谐波频谱

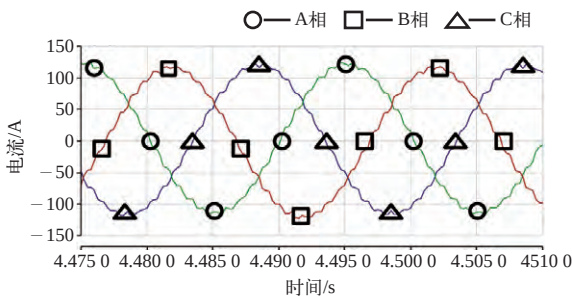


图7 牵引站110 kV侧电流波形

压波形图分别如图6、图7所示。

3. 谐波电流允许值

根据国标GB/T 14549—1993，公共连接点的全部用户向该点注入的谐波电流分量不应超过规定的允许值。当公共连接点的最小短路容量与基准容量不同时，谐波电流允许值应按照下式换算

$$I_h = \frac{S_{k1}}{S_{k2}} I_{hp} \tag{9}$$

式中， S_{k1} 为公共连接点最小短路容量， $\text{MV}\cdot\text{A}$ ； S_{k2} 为基准短路容量， $\text{MV}\cdot\text{A}$ ； I_{hp} 为国标规定的第 h 次谐波电流允许值， A ； I_h 为短路容量为 S_{k1} 时的第 h 次谐波电流允许值， A 。

为尽量获得客观准确的谐波电流数据，分别按照近期、远期以及系统规模等不同阶段的各数据对该牵引站在馈线产生的谐波电流进行仿真计算，仅统计各阶段峰值时刻主要谐波如表1所示。

表1 不同时期峰值时段系统侧主要谐波电流及其允许值

谐波次数		5	7	11	13	23	25
近期	允许值/A	5.61	4.92	4.13	3.75	2.23	2.02
	谐波电流/A	0.14	0.09	0.18	0.1	1.54	0.88
远期	允许值/A	6.76	5.77	4.68	4.22	2.49	2.26
	谐波电流/A	0.15	0.11	0.2	0.12	1.72	0.98
系统规模	允许值/A	8.19	6.81	5.3	4.76	2.8	2.53
	谐波电流/A	0.19	0.16	0.25	0.15	2.97	1.16

由表1可知，24脉波整流机组主要产生23次、

25次谐波，但同时也会产生部分5次、7次、11次和13次谐波，且随着不同时期负荷的增大，各次谐波电流也在逐渐增大，在达到系统规模时，23次谐波电流会超出国标允许值，需要采取措施进行治理。

4. 电压波动

根据工程经验，本次研究分别使负荷瞬间波动不同时期最大负荷的30%，统计牵引站考核点电压波动情况。在1.5 s时负荷突减30%系统侧电压标么值变化曲线如图8所示。

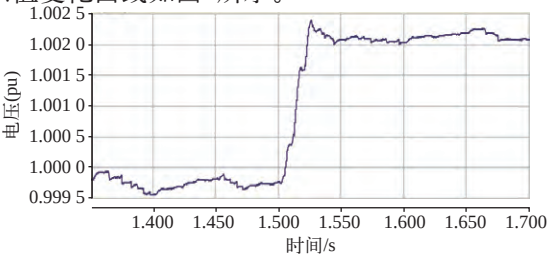


图8 系统侧电压波动曲线图

由图8可知，负荷未变化前，系统侧电压基本维持在额定电压，当负荷突然减小时，系统侧电压会突然增大。而不同时期负荷变动大小存在差异，电压波动大小也会有所不同。不同时期电压波动情况统计如表2所示。

表2 不同时期电压波动情况表 (单位：%)

近期	远期	系统规模
0.138	0.164	0.246

根据国家标准GB/T 12326—2008，该考核点电压波动限值为2.5%，显然，各时期电压波动与国家标准允许值相比裕度较大，对电网影响不大。

5. 功率因数

在负荷低谷时段，系统功率因数最低，因此选取低谷时段负荷使用PSCAD软件进行仿真计算，结果如表3所示。

表3 不同时期功率因数情况表

近期	远期	系统规模
0.43	0.55	0.74

结束语

1) 理论上，24脉波整流机的网侧只有 $24n \pm 1$

次特征谐波,但实际运行中交流系统三相阻抗,尤其是整流变压器三相阻抗不平衡以及触发角、移相角的误差等因素导致24脉波整流机还会产生5次、7次、11次和13次谐波。

2) 24脉波整流能够大幅度降低各低次谐波电流值,改善电能质量,减轻地铁对区域电网电能质量的影响。

3) 电缆的对地电容较大,在夜间休车时产生大量容性无功,导致无功倒送,功率因数偏低,因此建议采用SVG进行治理。

4) 随着不同时期负荷的增大,牵引变压器考核点的各次谐波电流、电压波动也在逐渐增大,在达到系统规模时,23次谐波电流将会不满足国标要求,建议采用SVG进行治理,确保区域电网电能质量的稳定以及佛山地铁2号线的正常运行。

参考文献

[1] 赵顺,曾志.地铁24脉波整流机组特性及谐波分

析[J].电子元器件应用,2012,14(5):38-41.

[2] 张永康.地铁供电系统外部电源供电方式的分析与比较[J].城市轨道交通,2011,15(6):80-83.

[3] 董海燕,田铭兴,杜斌祥,等.地铁24脉波整流机组的仿真及谐波电流分析[J].电源技术,2011,22(5):78-83.

[4] 贾善杰,赵义术,官兵,等.胶济线电气化铁路对山东电网电能质量的影响[J].电网技术,2006,30(9):11-16.

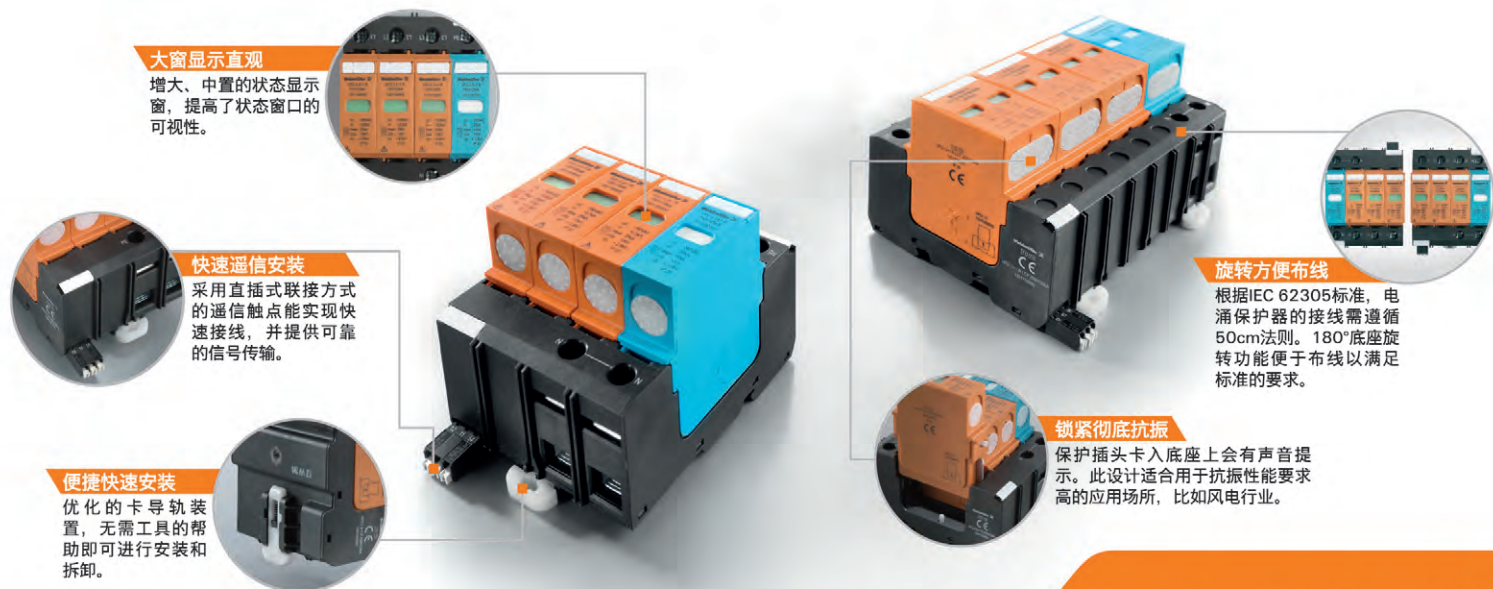
[5] 钱长生,齐嘉瞻,李国新,等.24脉波整流变压器电流的谐波计算分析[J].变压器,2007,4(12):1-7.

[6] 艾兵.地铁牵引供电系统建模及其对公共电网的影响[D].成都:西南交通大学,2010.

[7] 冷寒.地铁供电系统谐波电流无功功率综合治理方案[D].成都:西南交通大学,2012.

[8] 龚孟荣.电铁供电系统设计与仿真研究[D].成都:西南交通大学,2013.

(收稿日期:2014-06-16) EA



Weidmüller

魏德米勒VPU系列电涌保护器 — 低压供电系统的升级版电涌保护卫士

魏德米勒VPU系列电涌保护器用于低压供电系统,符合2012年IEC/EN 61643-11国际标准,为您提供持久、安全、前瞻性的雷电和浪涌保护解决方案,并简化维修。

魏德米勒电联接(上海)有限公司

电话: 86 21-22195008 网址: www.weidmueller.com.cn

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>