

新白广城际轨道接入对广东电网电能质量的影响

林培润

广东珠三角城际轨道交通有限公司 广东 广州 518000

【摘要】：通过分析新白广城际轨道负荷特点，计算各牵引变电所注入供电系统公共连接点的谐波电流，应用 ETAP 软件仿真计算新白广城际轨道接入引起的公共连接点电压畸变及三相不平衡，对新白广城际轨道接入对电网电能质量的影响作出评估。

【关键词】：城际轨道；ETAP；电能质量评估

引言

随着超大城市的集聚效应日趋显著，城市外围区人口、经济增长迅速，中心区与外围区甚至周边城市交往愈发密切^[1]。珠三角城际轨道为三大区域（京津冀、长三角、粤港澳大湾区）城际铁路之一，是为解决粤港澳大湾区城市群间中长途通勤出行需求而生。

城际铁路供电制式为工频单相交流制，由电力系统提供两路 110kV 以上电源，经由牵引变压器降压为 27.5kV，再由供电线及接触网等向电力机车提供工频单相交流电，经电力机车降压和整流变换成直流，再由直流中间环节和逆变器变换成频率和电压可调的三相交流电后，向交流电动机供电，从而驱动动车组列车运行。因此，牵引负荷为单相交流负荷，是一种呈随机特性、不对称的非线性负荷，其产生的不对称的谐波电流，经牵引变压器的变换后，高压侧注入电力系统的谐波电流为三相不平衡谐波，且有基波负序电流注入系统^[2]，对电力系统其它用户及发电机产生危害。

1 新白广城际轨道工程概况

新白广城际铁路（新塘经白云机场至广州北段）位于广州市的东北部，起自穗莞深城际新塘站，经增城开发区、永龙、中新知识城、竹料，在竹料站与广佛环线接轨，共线引入白云机场，之后经花山接入广清城际铁路广州北站，线路长度 79.048 公里。全线设置天贵路、花山、机场 T2、T1、T3、竹料、健康产业城、马头庄、佛朗村、平岗、镇龙、荔湖城、增城开发区站，在镇龙站与地铁 14 号支线、21 号线和有轨电车实现换乘。

本项目新建花山分区所、中纲牵引变电所、马头庄分区所、永龙牵引变电所，利用广清城际的金都牵引变电所为本线供电至花山，利用新塘分区所实现末端并联。其中，中纲牵引变电所接引 220kV 汉田站、110kV 茶汉丙线两路 110kV 电源；永龙牵引变电所接引 220kV 翟洞站、110kV 麦庙乙线提供两路 110kV 电源，两路电源互为热备用。牵引变压器采

用单相结线，固定备用，一主一备，互为备用。

表 1 新白广城际轨道主要技术标准

项目	指标
铁路等级	城际铁路
正线数目	双线
最大坡度	30‰
速度目标值	160 公里/小时
最小曲线半径	一般地段 1500m，困难地段 1300m
牵引种类	电力
到发线有效长度	400m
机车类型	CRH6 型动车组

表 2 永龙牵引变电所基本情况

牵引变电所	永龙站	
分区所	马头庄	新塘
供电臂长度 (km)	17.2	13.4
供电臂有效电流 (A)	230	189
95%供电臂最大电流 (A)	462	388
主变容量 (MVA)	20	

表 3 CRH6 主要技术参数

项目	指标
营运最高速度	160km/h
轴重	17t
供电制式	交流 25kV (50Hz)
传动方式	交-直-交
电动机功率	345kW

项目	指标
牵引功率	5520kW

2 ETAP 建模及仿真分析

Electrical Transient Analyzer Program 简称 ETAP，是功能全面的综合型电力及电气分析计算软件。根据国标和供电方案，永龙牵引变电所负荷对电能质量干扰的考核点设定为与其与电网的公共连接点（PCC），即庙岭接入点的具体考核点为庙岭站 110kV 母线（PCC1）；翟洞接入点的具体考核点为 220kV 翟洞站 110kV 母线（PCC2）。

以永龙站接入 220kV 翟洞站为例，仿真系统结构图见图 1。

模型主要内容如下：

等值电网：1 台（系统 110kV 电源侧，对应 2025 年系统小方式）

输电线路：1 回（牵引变电所至翟洞站 110kV 母线）

牵引变压器：单相变压器（110kV/25kV 牵引变压器，一主一备，互为冷备用）

等值负荷：按平均电流和 95%最大概率电流取值（平均负荷为工况一；95%最大概率负荷为工况二）

谐波干扰负荷：CRH6 型机车，对应 95%最大概率负荷

电压波动负荷：牵引变负荷波动（按单台 CRH6 型机车额定功率进出供电臂，追踪间隔 3min）

不平衡负荷：按平均和 95%最大概率负荷取值（平均负荷为工况一；95%最大概率负荷为工况二）

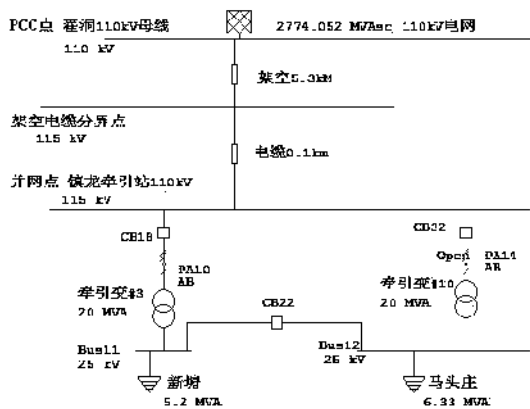


图 1 翟洞站 110 母线 PCC 点系统建模

表 4 PCC 电能质量限值计算供用电参数

考核点	最小短路容量 (MVA)	供电设备容量 (MVA)	负荷报装容量 (MVA)
庙岭站 110 母线	2387	720	20
翟洞站 110 母线	2774	480	20

3 谐波

根据电能质量国标 GB/T14549-93《电能质量公用电网谐波》^[4]，注入公共连接点的谐波电流及谐波电压计算如下：

总谐波电流允许值的换算：

$$I_h = \frac{S_{k1}}{S_{k2}} I_{hp} \quad (3-1)$$

式中，Sk1-公共连接点的最小短路容量，MVA；Sk2-为基准短路容量，MVA；Ihp-规定中第 h 次谐波电流允许值，A；Ih-短路容量为 Sk1 时的第 h 次谐波电流允许值，A。

对公共连接点处的单个干扰源的谐波电流允许值，还应按照式 4-2 进行分配。根据国标 GB/T14549-93《电能质量公用电网谐波》，单个干扰源注入公共连接点的谐波电流允许值按下式计算：

$$I_{hi} = I_h (S_i / S_t)^{1/\alpha} \quad (3-2)$$

式中，Ih—节点第 h 次谐波电流允许值，A；Si—干扰源的用电协议容量，MVA；St—公共连接点的供电设备容量，MVA；α—相位叠加系数。

按照系统小方式和对应牵引变电所 95%概率大值电流为最严重工况，谐波源取自 CRH6 型机车频谱特征，如图 2 所示。

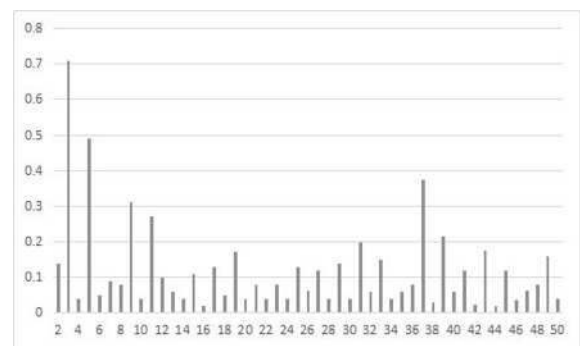


图 2 CRH6 机车谐波电流频谱图

根据以上及基础资料计算考核点谐波电流，得到各次谐

波结果如表 2。

表 5 考核点谐波电流

次数	T 接庙线方案		翟洞站专线方案	
	庙岭站 110 母线		翟洞站 110 母线	
	允许值 (A)	计算值 (A)	允许值 (A)	计算值 (A)
3	1.18	0.61	5.31	0.73
5	1.54	0.46	6.00	0.55
7	1.67	0.11	5.14	0.13
9	1.70	0.27	3.42	0.32

谐波电流主要表现在 3、5、7、9 次谐波，电压谐波畸变率最大为 0.03%。电压总谐波畸变率庙岭站及翟洞站 PCC 点分别为 0.239%、0.198%均小于 2%，各次谐波电压均在允许范围内（奇次<1.6%，偶次<0.8%）。

4 电压波动和闪变

根据 GB/T12326-2008《电能质量电压波动和闪变》^[5]，任何一个波动干扰源在电力系统公共连接点产生的电压变动，其限值和电压变动频度和电压等级有关。对于电压变动频度较低（例如 $r \leq 1000$ 次/h）或规则的周期性电压波动，可通过测量电压方根值曲线 $U(t)$ 确定其电压变动频度和电压变动值。新白广城际设计时速为 160km，列车追踪间隔 3min，采用 CRH6 型电力机车，牵引功率 5520kW，功率因数 ≥ 0.98 ，以单台 CRH6 型机车按额定功率进出牵引供电臂供电区间作为牵引变负荷波动模型，忽略有功冲击对电压波动的影响，单台 CRH6 型机车按额定功率进出牵引供电臂供电区间时，由于无功变化引起的考核点电压波动理论值可由下式计算得到考核点 PCC 电压波动值，结果见表 6。

$$d = \frac{\Delta U}{U_N} \times 100$$

式中：

ΔU --电压方根值曲线上相邻两极值电压之差； U_N --系统标称电压。

表 6 考核点电压波动

考核点	庙岭麦村 T 接方案	翟洞方案
	庙岭站 110kV 母线	翟洞站 110kV 母线
波动次数 r (次/h)	20	20
最大冲击负荷 (MVA) /功	23.66/0.95	23.66/0.95

率因数

最大冲击无功 ΔQ (MVar)	7.388	7.388
短路容量 (MVA)	2650	2774
电压波动 d (%)	0.279	0.266

电力系统公共连接点，在系统正常运行的较小方式下，以一周（168 小时）为测量周期，所有长时间闪变值都应满足闪变限值要求。每个干扰源按其并网协议容量和总供电容量之比，考虑上一级对下一级闪变传递的影响（下一级对上一级的传递一般忽略）等因素后确定该干扰源的闪变限值。计算方法如下：

接于 PCC 点的全部负荷产生闪变的总值 G ：

$$G = \sqrt[3]{L_P^3 - T^3 L_H^3} \quad (4-1)$$

式中：

L_P ：PCC 点对应电压等级的长时间闪变值 P_{lt} 限值；

L_H ：上一电压等级的长时间闪变值 P_{lt} 限值；

T ：上一电压等级对下一电压等级的闪变传递系数，推荐为 0.8；不考虑超高压（EHV）系统对下一级电压系统的闪变传递。

单个用户的闪变限值 E_i 为：

$$E_i = G \sqrt[3]{\frac{S_i}{S_i} \cdot \frac{1}{F}} \quad (4-2)$$

式中：

F ：波动负荷的同时系数，其典型值 $F=0.2 \sim 0.3$ （但必须满足 $S_i/F \leq S_t$ ）

表 7 考核点闪变

考核点	庙岭站	翟洞站
	110kV 母线	110kV 母线
电压变动频度 r (次/min)	0.3	0.3
电压变动值 d_{lim} (%)	4	4

长时间闪变值 Pst	0.07	0.0665
长时间闪变限值	0.356	0.408

根据计算规则及基础资料, 可得镇龙牵引变电所在庙岭站 110kV 母线 PCC 引起的电压波动值为 0.279% 小于限值 1.5%, 闪变值 0.07 小于限值 0.356; 在翟洞站 110kV 母线 PCC 引起的电压波动值为 0.266% 小于限值 1.5%, 闪变 0.0665 小于限值 0.408。

5 三相电压不平衡

根据电能质量国标 GB/T15543-2008《电能质量三相电压不平衡》^[6], 电力系统公共连接点三相电压不平衡度允许值如下:

(1) 电网正常运行时, 负序电压不平衡度不超过 2%, 短时不得超过 4%。

(2) 接于公共连接点的每个用户引起该点负序电压不平衡度允许值一般为 1.3%, 短时不超过 2.6%。根据连接点的负荷状况以及邻近发电机、继电保护和自动装置安全运行要求, 该允许值可作适当变动, 但必须满足 (1) 的规定。

以翟洞站为例, 在牵引变电所负荷全日平均有效电流 (工况一) 和牵引变电所负荷 95% 最大概率电流 (工况二) 情况下, 计算公共连接点处正负序电压、负序电流, 根据下式:

$$\varepsilon_{u2} = \frac{u_2}{u_1} \times 100 \quad (5-1)$$

计算永龙牵引变电所翟洞方案的三相电压不平衡度见表 8; 根据 PCC 短路阻抗以及负序电压不平衡度限值要求, 计算允许注入 PCC 的负序电流见表 9。三相电压不平衡潮流见图 3 至 4。

表 8 考核点三相电压不平衡度

牵引负荷工况	数据项	计算值
工况一	U1 (%)	100
	U2 (%)	0.402
	ε_{u2} (%)	0.402
	限值 (%)	1.30
工况二	U1 (%)	100
	U2 (%)	0.801

牵引负荷工况	数据项	计算值
工况一	负序电流 (A)	58.5
	限值 (A)	189
工况二	负序电流 (A)	116.7
	限值 (A)	378

表 9 注入公共连接点负序电流

牵引负荷工况	数据项	计算值
工况一	负序电流 (A)	58.5
	限值 (A)	189
工况二	负序电流 (A)	116.7
	限值 (A)	378

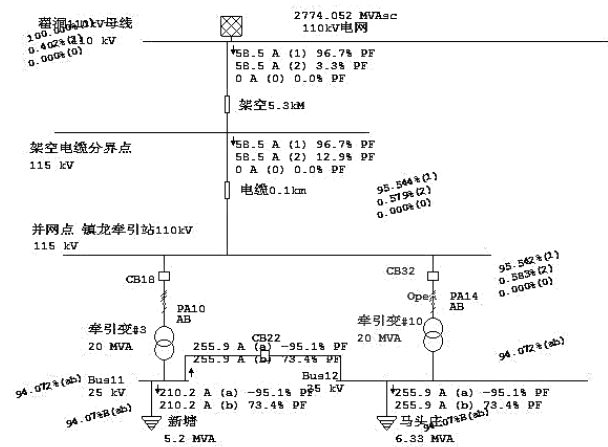


图 3 负荷不平衡潮流结果 (工况一)

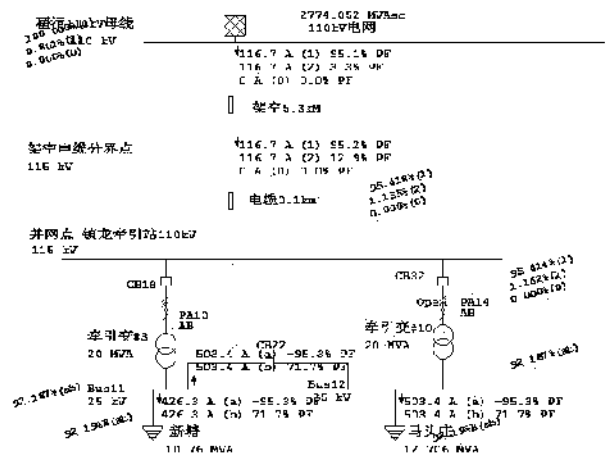


图 4 负荷不平衡潮流结果 (工况二)

由上, 镇龙牵引变电所日平均负荷在 PCC 点引起的三相电压不平衡度为 0.402%, 小于 1.3%; 短时负荷在 PCC 点引

起的三相电压不平衡度为 0.801%，小于 2.6%。

6 结束语

由上可见，永龙牵引变电所接入系统注入 PCC 点的谐波电流、电压波动及闪变均低于限值；日平均负荷、短时负荷

在 PCC 点引起的三相电压不平衡度和负序电流均低于限值。这一结论与城际铁路采用交-直-交电力机车、牵引负荷一般比较小、接入的广东电网为电网发达地区、轮相接入等因素有关。

参考文献：

- [1] 徐士伟,叶树峰,莫琼,马小毅.广州市域(郊)铁路规划建设的思考[J].城市轨道交通:1-12.
- [2] 卢志海,厉吉文,周剑.电气化铁路对电力系统的影响[J],继电器,2004,(11):33-36.
- [3] 国家质量总局.电能质量公用电网谐波[S].GB/T14549-93.
- [4] 国家质量总局.电能质量电压波动和闪变[S].GB/T12326-2008.
- [5] 国家质量总局.电能质量三相电压不平衡[S].GB/T15543-2008.