

# 电气化铁路接入末端电网的三相不平衡影响因素分析

段玉<sup>1,2</sup>, 侯冰<sup>3</sup>, 张媛<sup>1,2</sup>, 南东亮<sup>1,2</sup>, 董雪涛<sup>1,2</sup>, 宋鹏飞<sup>3</sup>, 刘震<sup>1,2</sup>, 段青熙<sup>1,2</sup>, 王小云<sup>1,2</sup>

(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011;

2. 新疆电力系统全过程仿真重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011;

3. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:**近年来,伴随着电气化铁路接入新疆电网,致使新疆电网末端弱联系地区电能质量问题突显出来,文中针对格库铁路接入新疆巴州地区电网带来的三相不平衡问题开展影响因素分析。首先,根据三相电压不平衡的概念及表达式开展电气化铁路负序三相不平衡的分析计算,得出三相不平衡的影响因素;然后,基于电力电气以及电能管理的综合分析软件(简称ETAP)搭建格库铁路接入新疆电网的典型仿真模型,仿真分析格库铁路接入末端弱联系电网带来的三相不平衡问题的影响因素;最后,分析基于实测数据的负序电流及电压产生的三相不平衡对电力系统及用户的影响,并利用ETAP软件分别从电铁侧和电网侧验证改善三相电压不平衡措施的有效性。

**关键词:**电气化铁路;三相不平衡;负序电流;影响因素;改善措施

**中图分类号:**TM 771 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)06-0044-08

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220607

## Analysis of Influencing Factors of Three-phase Unbalance for Electrified Railway Connected to Terminal Power Grid

DUAN Yu<sup>1,2</sup>, HOU Bing<sup>3</sup>, ZHANG Yuan<sup>1,2</sup>, NAN Dongliang<sup>1,2</sup>, DONG Xuetao<sup>1,2</sup>, SONG Pengfei<sup>3</sup>,  
LIU Zhen<sup>1,2</sup>, DUAN Qinxi<sup>1,2</sup>, WANG Xiaoyun<sup>1,2</sup>

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Whole Process Simulation for Power System, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

3. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, Xinjiang, China)

**Abstract:** In recent years, a large number of electrified railways have been connected to Xinjiang power grid, resulting in prominent power quality problems in weak connection areas of Xinjiang power grid. The influencing factors of three-phase unbalance caused by the connection of Geermu-Kuerle Railway to Xinjiang Bazhou regional power grid is analyzed. Firstly, according to the concept and expression of three-phase voltage unbalance, the negative sequence three-phase unbalance of electrified railway is analyzed and calculated, and the influencing factors of three-phase unbalance are obtained. Secondly, based on the comprehensive analysis software system of electric power analysis and electric power management (hereinafter abbreviated as ETAP), a typical simulation model of the connection of Geermu-Kuerle Railway to Xinjiang power grid is built to verify the influencing factors of three-phase unbalance of the connection of electrified railway to the power grid. Finally, the influence of three-phase unbalance caused by negative sequence current and negative sequence voltage based on the measured data on the power system and users is analyzed, and ETAP software is used to verify the effectiveness of improvement measures for three-phase voltage unbalance from the railway side and the grid side.

**Key words:** electrified railway; three-phase unbalance; negative sequence current; influencing factors; improvement measures

## 0 引言

新疆电网目前已全覆盖新疆 14 个地州,但由于新疆地域辽阔,部分地区在塔克拉玛干沙漠边缘,网架结构相对薄弱。新疆巴州若羌地区电网位于新疆电网末端,短路容量较小,电气联系相对薄弱。2020 年格库铁路建成通车后接入若羌电网,由于电气化铁路负荷具有单相、时变、冲击性等特点<sup>[1]</sup>,接入电力系统时产生大量的负序电流、谐波,如果处理不善,将严重危害公共电网的安全和可靠性<sup>[2-5]</sup>。故格库铁路接入新疆电网后造成若羌地区电能质量问题突出,三相不平衡问题已严重影响到该地区用户、新能源场站及系统的正常运行<sup>[6-8]</sup>。

电气化铁路作为单相非线性负荷,接入电网后产生电能质量问题<sup>[9-11]</sup>。文献[12]分析了高速电气化铁路产生的负序电流和谐波在电力系统中的渗透情况,但仅分析了负序在电网常用元件中的传递特性,未考虑对元件的影响。文献[13]应用 ETAP 软件仿真了电气化铁路对电网的影响,分析发现交直交电力机车的各相电能质量指标均满足国家标准要求,但未考虑其他类型电力机车带来的电能质量问题。文献[14]基于某地区电网分析电气化铁路产生的三相不平衡以及负序对该地区电网的影响,验证了 ETAP 仿真模型的准确性。但未考虑电气化铁路对网架薄弱地区弱联系电网电能质量的影响。文献[15]分析了电气化铁路接入对新疆薄弱地区电网电能质量的影响,主要分析了三相不平衡的传递规律,未考虑三相不平衡的影响因素,也未提出有效的改善措施。

因此,首先从理论分析的角度研究三相不平衡的影响因素;随后基于 ETAP 搭建格库铁路的典型仿真模型仿真分析短路容量、电压、负荷对三相不平衡的影响;接着分析了三相不平衡超标给新能源场站、用户和电力系统带来的影响;再基于仿真结果提出相应的改善措施;最后对基于 ETAP 的格库铁路典型仿真模型进行仿真验证。

## 1 三相不平衡的计算及影响因素分析

理想的三相交流系统是 A、B、C 三相幅值相同,

相位互成 120°角,是完全平衡的。然而,实际三相电力系统并不是完全平衡的,电力系统中发生事故或不平衡的设备接入都会导致三相不平衡,下面主要分析不平衡的设备接入系统导致的三相不平衡问题。

### 1.1 三相不平衡的基本概念及其表达式

电力系统是由发电设备、输电设备、变电设备和配电设备及用电负荷组成,当发输变配用任一设备不对称时,就会引起三相电压不平衡。三相不平衡的评价指标通常由三相电压不平衡度表示。三相电压不平衡度用负序分量比正序分量的百分数表示,正序分量和负序分量通过对称分量法计算得到。依据国家标准 GB/T 15543—2008《电能质量 三相电压不平衡》<sup>[16]</sup>,三相电压不平衡度的表达式为:

$$\varepsilon_{U_2} = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$\varepsilon_{U_0} = \frac{U_0}{U_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_{U_2}$ 为电压的负序不平衡度; $\varepsilon_{U_0}$ 为电压的零序不平衡度; $U_2$ 为三相电压的负序分量方均根值,kV; $U_1$ 为三相电压的正序分量方均根值,kV; $U_0$ 为三相电压的零序分量方均根值,kV。

式(1)可作为负序电压不平衡度的准确计算公式。通过测量三相电力系统中 A、B、C 三相的相位及幅值后,利用对称分量法求出正序分量和负序分量,借助式(1)求得负序电压不平衡度。据此可知三相电压不平衡度与正序和负序分量有关。

下面介绍几种不平衡度的近似估算式:

$$\varepsilon_U = \frac{\Delta_{\max}}{U_{\text{avg}}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\Delta_{\max} = \frac{\Delta P_{\max} R + \Delta Q_{\max} X}{U_N^2} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_U$ 为三相电压的不平衡度; $\Delta_{\max}$ 为三相中对平均电压的最大偏差值,kV; $U_{\text{avg}}$ 为三相线电压的平均值,kV; $\Delta P_{\max}$ 为公共连接点处单相有功功率的变化量最大值,MW; $\Delta Q_{\max}$ 为公共连接点(point of common coupling,PCC)处单相无功功率的变化量最大值,Mvar; $R$ 为等效电阻, $\Omega$ ; $X$ 为等效电抗, $\Omega$ ; $U_N$ 为额定电压,kV。

根据式(3)、式(4)可知,三相电压不平衡度与电压偏差有关,电压偏差由系统初始电压、有功功

率、无功功率变化量及系统等效电阻、电抗决定。

工程上用式(5)来估计不平衡负荷在 PCC 处带来的不平衡度。

$$\varepsilon_U = \frac{\sqrt{2}I_2 U_L}{S_k} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $I_2$  为负荷电流的负序分量, kA;  $U_L$  为线电压, kV;  $S_k$  为 PCC 处的短路容量, MVA。

根据式(5)可知,三相电压不平衡度与电流的负序分量及系统 PCC 处的短路容量有关。

对于接于相间的单相负荷,所引起的不平衡度可用更为简单的公式为

$$\varepsilon_U = \frac{S_L}{S_k} \times 100\% \quad (6)$$

式中,  $S_L$  为单相负荷的容量, MVA。

根据式(6)可知,三相电压不平衡度与单相负荷的容量及系统 PCC 处的短路容量有关。

综上所述三相不平衡度与序分量、电压偏差、系统 PCC 处的短路容量及不平衡负荷的容量有关。

## 1.2 基于电气化铁路的三相不平衡影响因素分析

格库铁路是由 110 kV 交流电经牵引变压器(V/v 接线)降压为 27.5 kV 后向牵引网及电力机车单相供电的电气化铁路。由于该供电方式为单相供电,将在电力系统中产生负序分量。这里主要基于 V/v 接线不平衡牵引变压器开展三相不平衡的影响因素分析。

V/v 接线的牵引变压器组成的一个变电所供电系统见图 1。

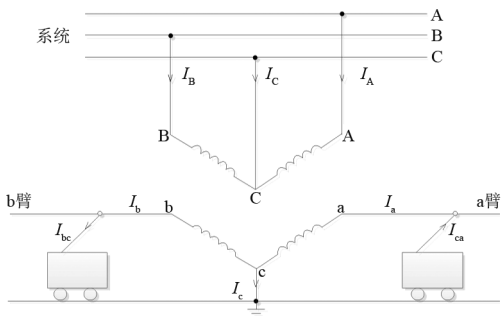


图 1 V/v 接线的牵引变压器

根据图 1 所示结构图可推出系统正负序电流与电铁路侧 a、b 臂电流的关系为

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}k} \begin{bmatrix} e^{j30} & j \\ e^{-j30} & -j \end{bmatrix} [I_a I_b] \quad (7)$$

系统侧 A、B、C 三相电流与铁路侧 a、b 臂的电流的关系如下:

$$I_A = \frac{1}{\sqrt{3}k} \sqrt{4I_a^2 + 2I_a I_b + I_b^2} \quad (8)$$

$$I_B = \frac{1}{\sqrt{3}k} \sqrt{I_a^2 - I_a I_b + I_b^2} \quad (9)$$

$$I_C = \frac{1}{\sqrt{3}k} \sqrt{I_a^2 + 2I_a I_b + 4I_b^2} \quad (10)$$

下面依据式(7)分析两供电臂在不同负荷时对电流不平衡度的影响。

设  $I_a$  为最大值,即  $I_a = I_{\max}$ ,  $I_b$  在  $0 \sim I_{\max}$  之间变化,令  $\frac{I_b}{I_{\max}} = x$ ,则式(7)改写为式(11)。

$$\begin{cases} I_1 = \frac{1}{\sqrt{3}k} I_{\max} (1+x) \\ I_2 = \frac{1}{\sqrt{3}k} I_{\max} \sqrt{x^2 + 1 - x} \end{cases} \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (11)$$

表 1 列出了 V/v 接线变压器在 3 种典型工况下电流不平衡度。

表 1 3 种典型工况下电流不平衡度

$x$	$I_2$	$I_1$	$I_2/I_1$
0.5	$\frac{1}{2k} I_{\max}$	$\frac{\sqrt{3}}{2k} I_{\max}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}$
0	$\frac{\sqrt{3}}{3k} I_{\max}$	$\frac{\sqrt{3}}{3k} I_{\max}$	1
1	$\frac{\sqrt{3}}{3k} I_{\max}$	$\frac{2\sqrt{3}}{3k} I_{\max}$	$\frac{1}{2}$

综上所述电气化铁路的电流三相不平衡度与两供电臂负荷及所接相序有关,其中一臂电流最大、一臂电流为 0 时的三相不平衡度最大。

## 2 基于 ETAP 的三相不平衡仿真计算分析

ETAP 是一款全图形化的电力系统仿真软件,主要利用该软件的不平衡潮流模块开展基于电气化铁路的三相不平衡影响因素研究。

### 2.1 基于电气化铁路的典型仿真模型搭建

下面以格库铁路沿线为典型应用场景,选取新疆电网末端 3 座变电站及所接牵引站负荷搭建典型仿真模型。该地区的网架结构见图 2;依据网架结构图及用户提供的相应负荷侧参数,利用 ETAP 搭建的仿真模型见图 3。

电气化铁路模型的搭建主要为线路、选相器、单相变压器以及等效单相负荷,线路在实际运行中为

一主一备方式,模型搭建时仅考虑运行线路,相位根据收资给定,变压器容量及参数与实际运行设备一致,负荷大小根据实测给定。

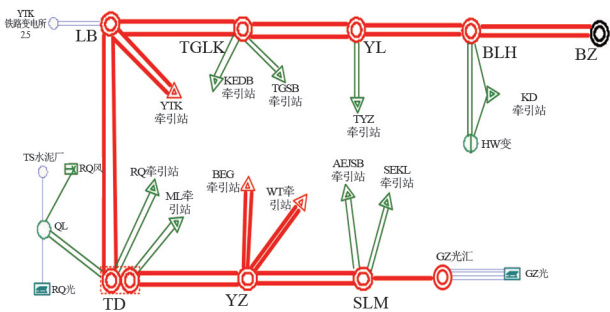


图 2 网架结构

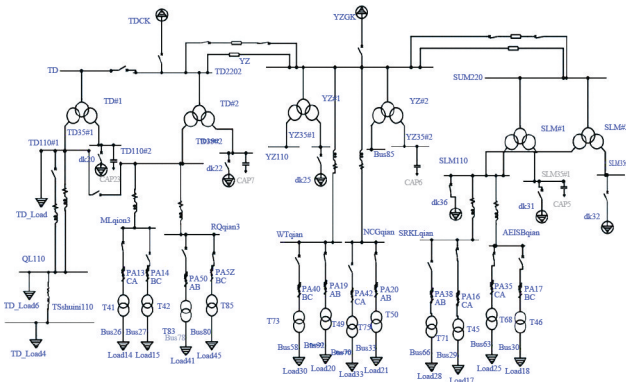


图 3 ETAP 仿真模型

本次仿真仅研究电气化铁路的三相不平衡问题,不考虑电气化铁路向系统注入的谐波,故图 3 仿真模型搭建时考虑的边界情况为:

1) 电源情况: 新能源光伏及风电不出力,所有电源均来自等效系统,平衡节点接入 TD 变电站母线。

2) 负荷情况: 电气化铁路负荷等效为轮转换相的单相负荷,负荷大小为实际最大负荷;TD 变电站正常用电负荷均等效为最大静态负荷,功率因数按 0.9 考虑。

3) 无功补偿装置: TD 和 YZ 变电站无功补偿装置及线路高压电抗器均按实际配置,投切情况根据电压变化调整。

4) 运行方式: YZ、SLM 变电站均并列运行,TD 变电站分列运行,TD 一回线与 TD 一台变压器接带常规用户负荷;TD 另一回线与 TD 另一台变压器接带牵引站负荷,并且通过双回线接入 YZ 变压器。

## 2.2 电气化铁路接入电网的三相不平衡影响因素仿真分析

基于图 3 所示的仿真模型开展电气化铁路接入

弱联系电网的三相不平衡影响因素分析,为仿真验证第 1 章中理论分析的结论,本节仿真仅考虑最末端 SLM 变电站及其负荷,电源来自系统侧等效电网,SLM 等效仿真模型如图 4 所示。

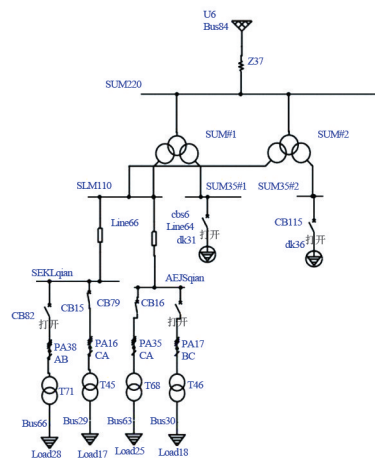


图 4 SLM 变电站仿真模型

图 4 中初始参数: 等效电网的三相短路容量为 644 MVA, 负荷容量为 21 MVA。下面仿真分析各参数对三相不平衡的影响程度。

1) 电压的正序和负序分量: 不改变仿真模型中其他变量, 仅通过修改系统侧等效阻抗的序分量, 来分析 SLM 各电压等级正序和负序分量不同所对应的负序三相电压不平衡度, 序分量修改前如表 2 所示, 修改后如表 3 所示。

表 2 序分量修改前各电压等级对应的不平衡度

母线名称	A 相/kV	B 相/kV	C 相/kV	不平衡度 /%
SLM220	123.9∠0.5°	138.1∠-117.6°	135.3∠116.3°	6.50
SLM110	63.0∠-0.4°	72.8∠-117.6°	71.2∠114.3°	8.68
SLM35	19.9∠-35.5°	20.4∠-146.5°	22.9∠88°	8.80

表 3 序分量修改后各电压等级对应的不平衡度

母线名称	A 相/kV	B 相/kV	C 相/kV	不平衡度 /%
SLM220	123.7∠0.5°	138.4∠-117.8°	135.7∠117.3°	5.96
SLM110	63.2∠-0.4°	72.7∠-117.6°	71.3∠114.3°	8.18
SLM35	20.0∠-35.2°	20.5∠-146.5°	22.8∠88.5°	8.33

对比表 2 和表 3 可知, 系统负序分量越大, 所对应的负序电压三相不平衡度越大, 与理论分析相符。

2) 电压偏差: 保持仿真模型中其他变量不变, 仅通过修改系统阻抗中电阻值来改变 SLM 变电站相关母线电压偏差。通过仿真分析得到负序电压三相不平衡度, 如表 4 所示, 其中电压偏差取三相电压偏差的最大值。

表 4 电压偏差不同时各电压等级对应不平衡度

母线名称	电压偏差小		电压偏差大	
	电压偏差/kV	不平衡度/%	电压偏差/kV	不平衡度/%
SLM220	8.9	6.5	14.1	9.5
SLM110	6.9	8.7	9.5	11
SLM35	1.5	8.8	3.6	11.1

由表 4 可知,母线电压偏差越大,所对应的不平衡度越大。

3) 系统 PCC 的短路容量:保持仿真模型中其他变量不变,仅通过改变 SLM 变电站 PCC 处的短路容量,仿真计算得到不同短路容量所对应的负序三相电压不平衡度,如表 5 所示。

表 5 短路容量不同时各电压等级对应不平衡度

短路容量/MVA	不平衡度/%		
	SLM220	SLM110	SLM35
644	6.5	8.7	8.8
1000	4.5	6.7	6.8

由表 5 可知,PCC 处短路容量越大,所对应的不平衡度越小。

4) 不平衡负荷的容量:保持仿真模型中其他变量不变,仅通过改变 SLM 变电站所带电气化铁路单相负荷的容量,仿真计算得到不同单相负荷容量所对应的负序三相电压不平衡度,如表 6 所示。

表 6 负荷容量不同时供电臂各电压等级对应不平衡度

负荷容量/MVA	不平衡度/%		
	SLM220	SLM110	SLM35
10	4.9	6.5	6.6
21	6.5	8.7	8.8
50	10.2	13.7	13.9

由表 6 可知,不平衡负荷容量越大,所对应的不平衡度越大。

5) 电铁供电臂:保持仿真模型中其他变量不变,仅通过改变 SLM 变电站所带电气化铁路单相负荷供电臂的接入系统的相序,仿真计算得到不同接入相所对应的负序三相电压不平衡度,如表 7 所示。

表 7 负荷接入相不同时各电压等级对应不平衡度

供电臂	负荷接入相	不平衡度/%		
		SLM220	SLM110	SLM35
AEJSq1an	CA	6.5	8.7	8.8
SEKLq1an	CA			
AEJSq1an	CA	3.3	4.4	4.5
SEKLq1an	AB			
AEJSq1an	BC	2.8	3.6	3.7
SEKLq1an	CA			
AEJSq1an	BC	3.3	4.4	4.5
SEKLq1an	AB			

由表 7 可知,当两个牵引站供电臂接入相相同时,所产生的不平衡度最大,当供电臂接入相不同时,会对负序电流有一定的中和作用,故不平衡度会减小。

综上所述,仿真得到系统负序分量越大、母线电压偏差越大、PCC 处短路容量越小、不平衡负荷容量越大、供电臂接入相相同,所对应的不平衡度越大。

### 3 基于实测数据的格库铁路对电力系统及用户的影响分析

为分析格库铁路接入新疆电网对接入地区电能质量的影响,对 SLM 变电站及附近的新能源场站开展了电能质量测试,下面基于实测数据开展分析。

#### 3.1 对新能源场站的影响分析

实测新能源场站 35 kV 三相电压不平衡度如图 5 所示。

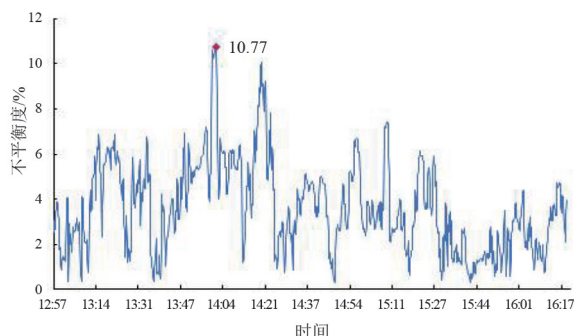


图 5 35 kV 母线三相电压不平衡度

由图 5 可知该新能源场站母线电压不平衡度最大达到 10.77%,已严重超出国标规定的短时不超过 4%的要求,造成新能源场站的逆变器以及无功补偿装置不能正常工作:在无列车经过时不平衡度小于 4%,设备可正常工作;有列车经过且影响较大时不平衡度将大于 4%造成设备频繁跳闸。根据图 5 测试曲线可以看出,不平衡度基本是时刻都在变化的,设备频繁跳闸将影响使用寿命。且由于无功补偿装置不能正常投运,将造成新能源场站出力限制,严重影响到场站的经济效益。

实测新能源场站 35 kV 母线电压偏差如图 6 所示。

由图 6 可知该新能源场站母线电压下偏差最大值为 12.967%,此时电压最低将低于 0.9 pu,按照光伏逆变器低电压穿越阈值,将可能存在进入低穿现

象,对新能源场站的逆变器产生影响。

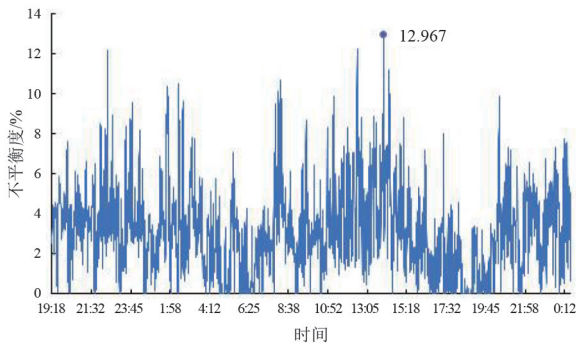


图6 35 kV 母线电压偏差

### 3.2 对电力用户的影响分析

实测 SLM220 母线三相电压不平衡度如图 7 所示。

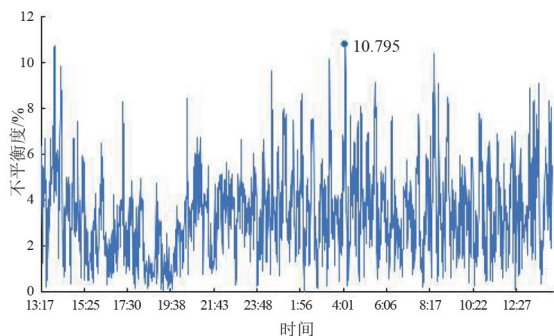


图7 SLM220 母线三相电压不平衡度

由图 7 可知 SLM220 母线三相电压不平衡度最大值为 10.795%。

电力用户通常由 110 kV 电压等级接入,主变压器将电能从 220 kV 变换到 110 kV 后供给用户使用,该地区的主要用户接入在 TD 变电站,通过实测数据将 SLM220 母线三相电压不平衡度传递到 TD 变电站后,依然超出国标要求。

三相电压不平衡度超标将增加电动机的定、转子铜损,降低电动机的最大转矩和过载能力,还有可能引起电动机振动。由于格库铁路造成的负序电压三相不平衡度超标致使用户 TS 水泥厂电动机不能正常工作,造成一定的经济损失。

### 3.3 对电力系统的影响分析

通过实测数据得到 SLM220 母线三相电压不平衡度和 SLM35 母线三相电压不平衡度对比曲线如图 8 所示。

由图 8 可知 SLM220 母线电压和 SLM35 母线电压三相不平衡度不考虑采样精度的条件下基本保持一致,最大值均为 10.7%。

故通过实测数据可以看出三相不平衡度将完全通过变压器传递,不会发生衰减,负序三相电压不平衡度较大将影响变压器的寿命,产生附加损耗;将引起以负序分量为起动元件的保护发生误动;引起电网损耗的增加。

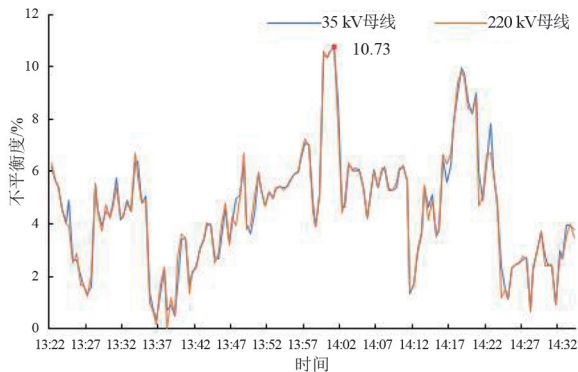


图8 SLM220 和 SLM35 母线三相电压不平衡度

## 4 改善三相不平衡的措施分析

基于格库铁路接入新疆电网带来的电能质量问题,考虑利用三相平衡化的机理分别从铁路侧和电网侧两方面开展分析验证。

### 4.1 三相平衡化的机理分析

不平衡的三相系统的总功率是在平均值的基础上上下脉动。要将不平衡系统变换为三相平衡系统时,在变换设备中应设有能够暂时储积能量的电感和电容元件。举例说明,一个不平衡单向负荷  $R$  (如图 9 所示),为将其转化为平衡系统,在其他两相分别增加  $j\omega L = j\sqrt{3}R$  的电感和  $1/j\omega C = -j\sqrt{3}R$  的电容后,二者产生谐振,则可将单相系统构造成三相平衡系统,如图 10 所示。

### 4.2 铁路侧改进措施有效性验证

基于“谁污染,谁治理”的原则,新疆电网若羌地区的三相不平衡主要是由于格库铁路不平衡负荷接入引起的,以 SLM 变电站为研究对象,考虑在格库铁路 SLM 变电站的 SEKLqIan 供电臂 110 kV 母线处加装治理装置,以平衡负序电流。

基于文献[17]的分析机理,通过向系统中注入与负序电流方向相反的不平衡电流来中和系统中的负序电流,以不平衡度满足国标要求的 4% 开展仿真分析,在 ETAP 仿真软件中搭建无功电流的注入元件,仿真模型如图 11 所示,基于图 11 的仿真模型

得到如表 8 所示的仿真结果。

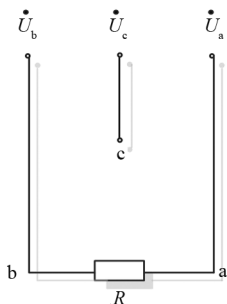


图 9 单相系统

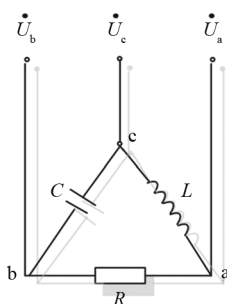


图 10 平衡后三相系统

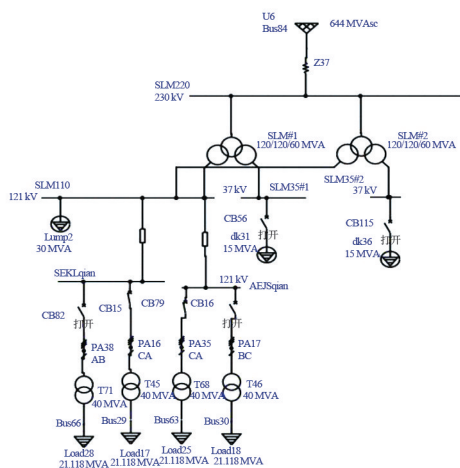


图 11 铁路侧改善措施仿真模型

表 8 铁路侧改善前后三相电压不平衡度 单位: %

母线	改善前	改善后
SLM220	6.5	0.38
SLM110	8.7	1.76
SLM35	8.8	1.86

通过在 SLM110 母线上搭建无功元件,向系统注入 BC 相无功电流 124 A 后,将 SLM 变电站各母线的负序三相电压不平衡度降低至 2% 以内,补偿效果较好,仿真验证了改善措施的有效性。

#### 4.3 电网侧改进措施有效性验证

该地区网架结构相对薄弱,考虑对电网侧改进

措施开展仿真分析,SLM 变电站 220 kV 母线电压三相不平衡度超过 10% 的电网侧原因是该站 220 kV 母线短路容量较小。为提升该地区的短路容量,考虑网架补强的改善措施,根据十四五规划,该地区网架补强后短路容量将提升至 1570 MVA。

根据实测 SLM220 的三相不平衡度最大为 10.7%,利用 ETAP 开展仿真验证,仿真初始不平衡度按 SLM 变电站电气化铁路带来的最大不平衡度给定 SLM220 为 6.5%,加入改进措施的仿真模型如图 11 所示,模型中是将等效电网的短路容量改为 1570 MVA 来开展仿真分析的,基于图 12 的仿真模型得到如表 9 所示的仿真结果。

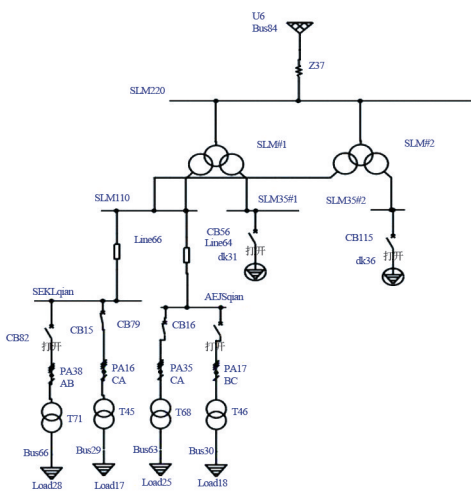


图 12 电网侧改善措施模型

表 9 电网侧改善前后三相电压各不平衡度 单位: %

母线	改善前	改善后
SLM220	6.5	3.1
SLM110	8.7	5.3
SLM35	8.8	5.4

根据上述仿真结果,网架结构补强后,SLM220 母线的负序三相电压不平衡度将小于 4%,满足国家标准短时不超过 4% 的要求。且该补强措施已开工建设,待建成后该地区三相电压不平衡将得到改善。

## 5 结论

上面分析了电气化铁路接入弱联系电网的三相不平衡影响因素,得到以下结论:

1) 三相不平衡的评价指标是负序三相电压不平衡度,通过理论分析得出负序三相电压不平衡度与序分量、电压偏差、系统 PCC 的短路容量及不平

衡负荷的容量有关。

2) 基于格库铁路接入新疆电网的实际搭建模型,仿真分析验证了电力系统负序分量越大、母线电压偏差越大、PCC 处短路容量越小、单相负荷容量越大、电气化铁路供电臂接入相相同,所对应的不平衡度越大。

3) 通过对格库铁路实测数据的分析,得出负序三相电压不平衡度超标将影响新能源场站、电力用户的正常工作,影响电力系统中变压器的寿命,产生附加损耗;将引起以负序分量为起动元件的保护发生误动;引起电网损耗的增加。

4) 借助 ETAP 仿真软件分别从铁路侧和电网侧两方面仿真验证了改善措施的有效性,铁路侧治理效果将优于网架补强的改善效果。待若羌地区十四五网架补强后,将进一步改善格库铁路接入新疆电网带来的电能质量问题。

#### 参考文献

- [1] 李群湛,王帅,易东,等.电气化铁路贯通同相供电 AT 牵引网故障辨识与自愈技术研究[J].铁道学报,2022,44(7):46-54.
- [2] 宋平岗,林家通,李云丰,等.采用 MMC-RPC 治理牵引供电系统负序和谐波的 PIR 控制策略[J].电工技术学报,2017,32(12):108-116.
- [3] GHASSEMI A, MAGHSOUD I, Farshad S, et al. Power quality improvement in Y/ $\Delta$  electric traction system using a Railway Power Conditioner [C]//Proceedings of the 2013 12th International Conference on Environment and Electrical Engineering, IEEE, 2013.
- [4] 程鹏,刘文泉,陈冲,等.面向电气化铁路牵引供电的光伏发电分相电流控制策略[J].电力系统自动化,2022,46(19):145-153.
- [5] DE LA TORRE S, SÁNCHEZ-RACERO A J, AGUADO J A, et al. Optimal sizing of energy storage regenerative braking in electric railway systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3):149-150.
- [6] 胡斯佳,张志文,李勇,等.一种绕组补偿式电气化铁道电能质量控制策略[J].中国电机工程学报,2014,34(13):2140-2150.
- [7] KNESCHKE T A. Control of utility system unbalance

caused by single-phase electric traction [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1985, IA-21(6):1559-1570.

- [8] 王辉,李群湛,解绍锋,等.基于 Vv-SVG 的电气化铁路同相供电综合补偿方案及控制策略[J].铁道学报,2021,43(9):46-55.
- [9] DAI N Y, LAO K W, WONG M C. A hybrid railway power conditioner for traction power supply system [C]//Proceedings of the 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), IEEE, 2013:1326-1331.
- [10] LAO K W, WONG M C, DAI N Y, et al. Analysis of DC-link operation voltage of a hybrid railway power quality conditioner and its PQ compensation capability in high-speed cophase traction power supply [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2):1643-1645.
- [11] 刘诗慧.基于阻抗分析的电气化铁路车-网-车耦合作用及系统稳定性研究[D].北京:北京交通大学,2020.
- [12] 邹大云.电气化铁路对电网电能质量影响仿真技术研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- [13] 张一帆,邓昆玲,尹柏清.应用 ETAP 软件分析电气化铁路对电网的影响[J].内蒙古电力技术,2010,28(S2):20-22.
- [14] 邹大云.基于 ETAP 的电气化铁路对地区电网影响的分析研究[D].西安:西安工程大学,2016.
- [15] 王佩,朱辉,李骑,等.电气化铁路投入对南疆电网电能质量影响分析[J].电工技术,2021(23):57-61.
- [16] 全国电压电流等级和频率标准化委员会.电能质量三相电压不平衡:GB/T 15543-2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [17] 吴传平,罗安,徐先勇,等.采用 V/v 变压器的高速铁路牵引供电系统负序和谐波综合补偿方法[J].中国电机工程学报,2010,30(16):111-117.

#### 作者简介:

段玉(1993),女,硕士,工程师,研究方向为电能质量仿真分析、电力系统规划、多能源系统、电力系统运行;

侯冰(1987),男,硕士,工程师,研究方向为无线电专业管理、电能质量分析。

(收稿日期:2022-10-16)