

Theory of High-Order Harmonic of Traction Power Supply for 10 kV Power System, Power Quality and Analysis of the Influence of the Research

Yongpeng Fu

Urumqi Power Supply Company, Urumqi Railway Administration, Urumqi
Email: 282923552@qq.com

Received: Mar. 6th, 2014; revised: Apr. 2nd, 2014; accepted: Apr. 14th, 2014

Copyright © 2014 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Jingyihuo Electrification Railway was put into operation at the end of 2010, marking that Xinjiang Railway entered the era of electrification; especially the rapid advance of passenger-dedicated line indicates that a new chapter in the high-speed railway will be opened in Xinjiang. Although the electrification in Xinjiang starts late, Urumqi Power Supply Company has done a lot of beneficial attempts in the new equipment, new technology, power dynamic monitoring and so on, to solve the problem of the signal power supply of single remote station, and to guarantee the power quality. At the same time, the influence of the high-order harmonic of traction power supply to the power quality of 10 kV power system, and the analysis of the research questions are analyzed and thought.

Keywords

Traction Power Supply, High-Order Harmonic, The Power Quality

牵引供电高次谐波对10 kV电力系统电能质量的影响及分析研究

付永鹏

乌鲁木齐铁路局乌鲁木齐供电段，乌鲁木齐
Email: 282923552@qq.com

收稿日期：2014年3月6日；修回日期：2014年4月2日；录用日期：2014年4月14日

摘要

2010年底精伊霍电气化铁路的投入运营标志着新疆铁路迈入了电气化时代，尤其是兰新客专线的快速推进预示着新疆即将揭开高铁时代新篇章。虽然新疆电气化起步晚，但在解决偏远站区信号电源单一，保证信号电源电能质量方面，乌鲁木齐供电段从新设备、新技术运用和电能动态监控等方面做了大量有益的尝试。同时，就牵引供电高次谐波对10 kV电力系统电能质量的影响及分析研究问题进行了分析和思考。

关键词

牵引供电，高次谐波，电能质量

1. 引言

精伊霍铁路是新疆的第一条电气化铁路，在 2010 年投入运行。沿线有 12 个车站(精河、精河南、敖包、阿恰尔、苏古尔、苏布台、尼勒克、布列开、伊宁东、伊宁、水定、霍尔果斯)；精河 - 伊宁区段设立了 7 个变电所[精河南牵引变电所、阿恰尔变配电所(牵引所和配电所合建)、苏古尔变配电所(牵引所和配电所合建)、苏布台变配电所(牵引所和配电所合建)、布列开变配电所(牵引所和配电所合建)、伊宁东牵引变电所、伊宁牵引变电所]，2 个配电所(精河配电所、伊宁 35 kV 配电所)。其供电示意图如图 1。

由于新疆特殊的地理环境和经济水平，精伊霍铁路有部分站区地处偏远的山区戈壁，附近缺少供电电源，无法满足铁路行车调度集中、自动闭塞等一级负荷需两路可靠电源供电的要求。为解决这一问题，乌鲁木齐铁路局在电源匮乏区段采用一路信号电源由地方变电站馈出，同时由牵引变电所设置动力变将 27.5 kV 变为 10 kV 作为信号二路电源的供电方式。但随着精伊霍铁路运力的逐步增加，电力机车牵引电

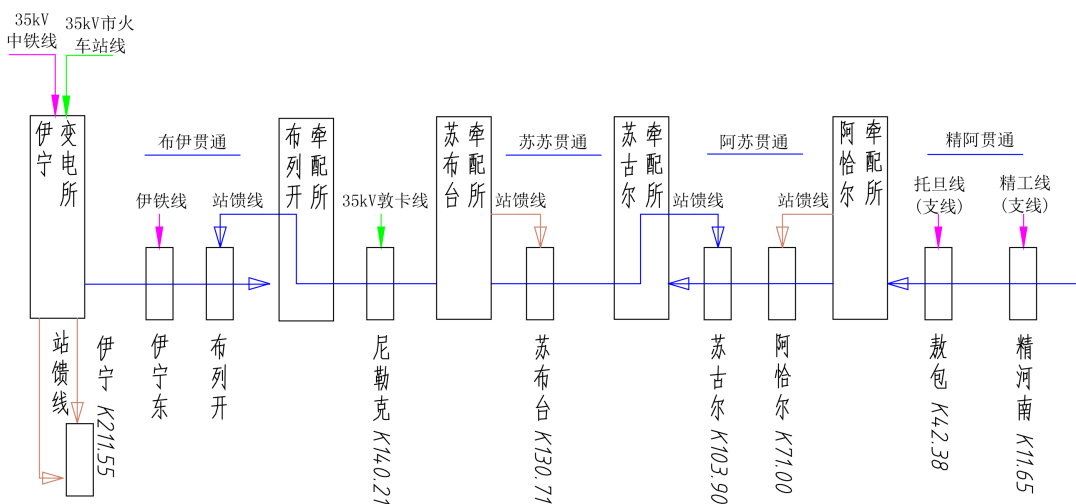


Figure 1. Jingyihuo Railway signal power supply diagram
图 1. 精伊霍铁路信号供电示意图

流对 10 kV 电力系统电能质量有很大影响。2011 年以来，精伊霍铁路敖包站、阿恰尔、尼勒克等站均出现了因牵引网对 10 kV 电源质量影响造成车站信号设备不能正常使用的故障。为了找出由牵引系统转变的信号电源质量不稳定问题的原因，我们对精伊霍铁路尼勒克站由牵引变电所动力变作为信号二路电源出现的故障现象进行了研究。

2. 精伊霍电气化铁路牵引所动力变作为信号二路电源存在的主要问题

精伊霍铁路尼勒克车站的信号主用电源接自 35 kV 墩卡线。信号二路电源由尼勒克站越级变经交直交系统提供，是从苏布台变电所(110/27.5)引出单相至接触网上，经过单相隔离开关，到单相变压器，经过交直交装置转变成三相电供尼勒克车站信号备用电源。通过调取相关资料(图 2)获知：当苏布台动力变供电至尼勒克综合变，尼勒克车站综合变的电压在不通车时电压正常，如有电力机车通过尼勒克站或经过隧道时，尼勒克站综合变内部响声增大，电压波动剧烈，所带用电设备出现烧损，车站信号设备不能正常使用。

3. 故障状况下的现场测试

尼勒克站位于苏布台牵引所伊宁方向供电臂的最末端，尼勒克站区供电示意图(见图 3)。精河至伊宁方向电力机车运行接近尼勒克站时会进入一段 20‰的爬坡坡道。由于以上原因，当电力机车从精河方向接近尼勒克站进入苏布台牵引所供电臂时，接触网牵引电流将达到最大。由苏布台动力变作为尼勒克综合变的电源，在满载电力机车通过尼勒克站，苏布台牵引所伊宁方向供电臂牵引电流达到最大时，利用电能质量分析仪对尼勒克综合变低压侧的电压、电流及谐波含量等参数进行测试。以此分析满载电力机车通过接触网，对尼勒克站 10 kV 电力系统的影响。同时，为了对比运力变化对 10 kV 电力系统电能质量的影响情况，我们还测试了电力单机通过尼勒克站时，尼勒克综合变低压侧的电压、电流及谐波含量等参数。

4. 测试数据初步分析

当电力单机由伊宁至精河方向进入苏布台牵引所伊宁方向供电臂，开始时，尼勒克综合变低压侧电

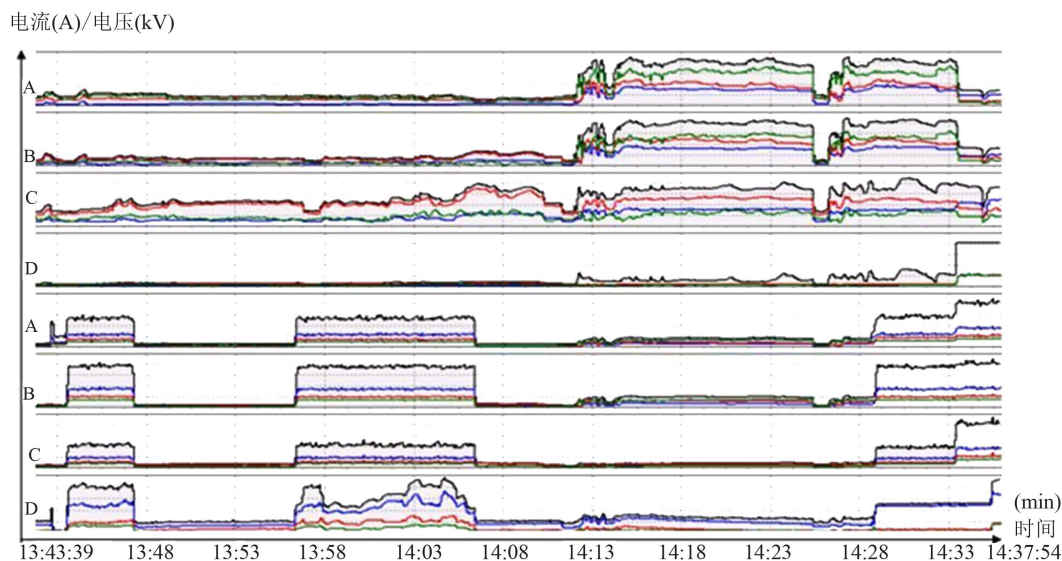


Figure 2. Power quality monitoring parameters

图 2. 电能质量监测参数

能质量参数在正常范围波动，但当电力单机接近尼勒克站时，综合变压器低压侧 3、5、7 次电压谐波分量增加，电压总的畸变率达到 6.31%(国标限值 $\leq 5\%$ ，见表 1)。而在 14 点 15 分重载电力机车由精河至伊宁方向进入尼勒克站，14 点 25 分通过尼勒克站时。在电压电能质量统计报表(见表 2)中可以看出 3、5、

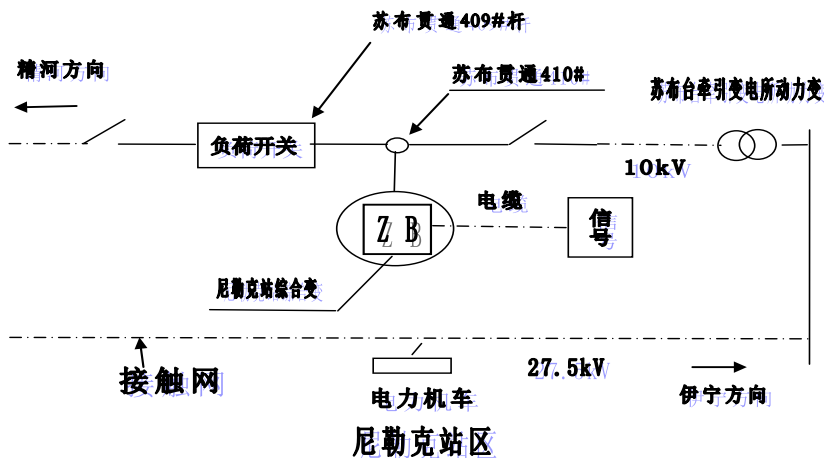


Figure 3. NiLeKe station power supply diagram
图 3. 尼勒克站区供电示意图

Table 1. The utility grid harmonic voltage and current value
表 1. 公用电网谐波电压，电流允许值

公用电网谐波电压(相电压)				
电网标称电压/kV	电压总谐波畸变形/%	各次谐波电压含有率/%		
		奇次	偶次	
0.38	5.0	4.0	2.0	
6	4.0	3.2	1.2	
10				
35	3.0	2.4	1.6	
66				
110	2.0	1.6	0.8	

谐波电流允许值																				
标准电压 /kV	基准短路容量/mvA	谐波次数																		
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.38	10	78	62	39	62	26	44	19	21	16	28	13	24	11	12	97	18	86	16	7.8
6	100	43	34	21	34	14	24	11	11	8.5	16	7.1	13	6.1	6.8	5.3	10	4.7	16	4.3
10	100	26	20	13	20	8.5	15	6.4	6.8	5.1	9.3	4.3	7.9	3.7	4.1	3.2	6	2.8	5.4	2.6
35	250	15	12	7.7	12	5.1	8.8	3.8	4.1	3.1	5.6	2.6	4.7	2.2	2.5	1.9	3.6	1.7	3.2	1.5
66	500	16	13	8.1	13	5.4	9.3	4.1	4.3	3.3	5.9	2.7	5	2.3	2.6	2	3.8	1.8	3.4	1.6
110	750	12	9.6	6	9.6	4	6.8	3	3.2	2.4	4.3	2	3.7	1.7	1.9	1.5	2.6	1.3	2.5	1.2

注：220 kV 基准短路容量取 2000 M VA。

Table 2. Voltage power quality statistics
表 2. 电压电能质量统计报表

监测位置:													监测时间:	2.12/03/02 13:43:39~2012/03/02 14:37:54	
监测线路:													PT 变化:	1.000	
电压等级:	0.38 kV												CT 变化:	1.000	
参数	A 相				B 相				C 相				限值		
	最大值	平均值	最小值	结论	最大值	平均值	最小值	结论	最大值	平均值	最小值	结论			
基波电压(kV)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
2	0.42	0.07403	0.03	合格	1.09	0.06011	0.02	合格	0.89	0.06564	0.03	合格	2.00		
3	5.64	1.91355	0.06	不合格	7.28	3.04420	0.35	不合格	3.98	1.62017	0.60	合格	4.00		
4	0.31	0.04893	0.02	合格	0.33	0.02681	0.01	合格	0.20	0.03308	0.01	合格	2.00		
5	7.19	3.05141	0.65	不合格	10.15	4.79583	0.84	不合格	5.61	3.40225	1.19	不合格	4.00		
6	0.64	0.15465	0.10	合格	0.86	0.17987	0.10	合格	0.51	0.16377	0.09	合格	2.00		
7	10.96	4.43753	0.36	不合格	12.81	4.51878	0.24	不合格	2.42	1.48859	0.53	合格	4.00		
8	0.23	0.05419	0.03	合格	0.27	0.05718	0.03	合格	0.13	0.04259	0.03	合格	2.00		
9	0.79	0.19247	0.01	合格	1.30	0.30479	0.01	合格	1.11	0.14276	0.01	合格	4.00		
10	0.24	0.02189	0.01	合格	0.20	0.01827	0.00	合格	0.13	0.01479	0.00	合格	2.00		
11	0.45	0.08518	0.01	合格	0.91	0.10440	0.01	合格	0.73	0.08902	0.01	合格	4.00		
总畸变率	14.73	5.95808	1.48	不合格	19.21	7.73417	1.48	不合格	7.20	4.47808	2.02	不合格	5.00		
短时间闪变	3.56	0.60749	0.00	-	0.61	0.19191	0.00	-	0.80	0.17350	0.00	-	-		
长时间闪变	0.00	0.00000	0.00	合格	0.00	0.00000	0.00	合格	0.00	0.00000	0.00	合格	1.00		

7 次电压谐波分量增加的更加明显, 电压总的畸变率最高时达到 19.21%, 超过标准限值近 4 倍。在电流电能质量统计报表(见表 3)中可以看出电流谐波分量无明显变化, 均在正常范围波动。

5. 测试数据分析

1) 电力机车通过接触网产生的 3、5、7 次电压谐波, 对尼勒克站 10 kV 电力系统电压质量影响大, 电压总畸变率最大时超过标准限值近 4 倍。

2) 通过电力单机和重载电力机车经过尼勒克站时电压谐波波形的对比, 反映出电力机车牵引电流的大小对尼勒克站 10 kV 电力系统电压质量影响较大。

3) 27.5/10 kV 电力系统中谐波产生的原因:

精伊霍电气化铁路采用了在 27.5 kV 接触网 T 接了 27.5 kV/10 kV 动力变压器作为铁路贯通线路电源; 在 10 kV 系统中产生丰富的 11 次、13 次谐波, 其 13 次谐波电压含量高达 76%, 通过调压变压器进行放大再加上目前铁路自闭或贯通回路都是轻负荷线路特别是自闭线路负荷最轻(仅 11%), 线路基本是接近空载, 因此整个线路呈容性, 在用户端本应为 220 V 电压, 可就会出现电压在 170~350 V 之间变化, 有时会在高电压 350 V 处持续近 1 min(上述数据是我们实测的结果), 造成铁路行车信号电源无法正常使用。

1) 电力机车的因素, 电力机车采用交流供电, 通过硅整流变为直流, 由于没有滤波装置, 因而会产生丰富的高次谐波, 并使功率因数降低。其中, 主要产生的是 3、5、7 次高次谐波, 这些谐波通过牵引网传输到 10 kV 电力系统, 致使用电设备不能正常运行, 对行车安全构成了隐患。

Table 3. Statistical reports on the current power quality
表 3. 电流电能质量统计报表

监测位置:				监测时间:	2012/03/02 13:43:39~2012/03/02 14:37:54									
监测线路:				PT 变化:	1.000									
电压等级(kV):	0.38			CT 变化:	1.000									
参数	A 相				B 相				C 相				限值	
	最大值	平均值	最小值	结论	最大值	平均值	最小值	结论	最大值	平均值	最小值	结论		
基波电流(A)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2 至 11 次谐波 电流含 量	2	0.51	0.02	0.0045	合格	0.0480	0.0148	0.0030	合格	0.0407	0.0138	0.0057	合格	78.00
	3	0.62	0.01	0.0035	合格	0.0415	0.0180	0.0041	合格	0.0261	0.0130	0.0038	合格	62.00
	4	0.21	0.005	0.0014	合格	0.0233	0.0058	0.0015	合格	0.0150	0.0058	0.0023	合格	39.00
	5	0.20	0.016	0.0015	合格	0.0642	0.0299	0.0023	合格	0.0459	0.0217	0.0023	合格	62.00
	6	0.10	0.003	0.0008	合格	0.0162	0.0036	0.0011	合格	0.0113	0.0036	0.0016	合格	26.00
	7	0.34	0.022	0.0013	合格	0.0650	0.0228	0.0016	合格	0.0222	0.0096	0.0016	合格	44.00
	8	0.06	0.003	0.0008	合格	0.0115	0.0026	0.0009	合格	0.0071	0.0020	0.0010	合格	19.00
	9	0.07	0.002	0.0005	合格	0.0110	0.0027	0.0012	合格	0.0064	0.0021	0.0010	合格	21.00
	10	0.05	0.002	0.0005	合格	0.0092	0.0019	0.0006	合格	0.0059	0.0017	0.0009	合格	16.00
	11	0.03	0.002	0.0004	合格	0.0083	0.0018	0.0008	合格	0.0052	0.0016	0.0008	合格	28.00

2) 电力线路的因素，贯通线的接地回路包括贯通母互，站场的三相变压器、避雷器及电缆线路的屏蔽层等。这样，母互、馈电电缆、架空线路在轻负荷时构成一个感性母互与架空线路对地电容的并联谐振电路。当牵引网受谐波影响波动时，通过动力变传输到 10 kV 系统，与并联谐振回路产生耦合，会使 10 kV 系统发生谐振。在线路侧的远端发生，反映为电压的波动，在线路的电源侧(馈出侧)则反映为电流波动。

6. 提高 27.5 kV 电源作为铁路信号设备供电质量的几点建议

- 1) 电力机车增加 3 次、5 次、7 次滤波装置改进传动电机设计，产生较高的效率，不增加谐波。
- 2) 牵引变电所在经过测量计算后，由固定并联电容补偿改为动态补偿，即采用并联无功补偿电容加磁阀式可控电抗器方案。
- 3) 采用交流电机牵引技术。
- 4) 主要是从变流装置本身出发，通过变流装置的结构设计和增加辅助控制策略来减少或消除谐波，目前采用的技术主要有以下几个方面。

①多脉波变流技术[1]: 大功率电力电子装置常将原来 6 脉波的变流器设计成 12 脉波或 24 脉波变流器以减少交流侧的谐波电流含量。理论上讲，脉波越多，对谐波的抑制效果越好但是脉波数越多整流变压器的结构越复杂，体积就大，变流器的控制和保护变得困难，成本增加。

②脉宽调制技术[2]: 脉宽调制技术的基本思想是控制 PWM 输出波形的各个转换时刻，保证 1/4 波形的对称性。根据输出波形的傅立叶级数展开式，使需要消除的谐波幅值为 0、基波幅值为给定量，达到消除指定谐波和控制基波幅值的目的。目前采用的 PWM 技术有最优脉宽调制、改进正弦脉宽调制、调制、跟踪型 PWM 调制和自适应 PWM 控制等。

③多电平变流技术[3]: 针对各种电力电子变流器(对于电压型的变流器必须用联接电感与交流电源相

连), 采用移相多重化、顺序控制和非对称控制多重化等方法, 将方波电流或电压叠加, 使得变流器在网侧产生的电流或电压为接近正弦的阶梯波, 且与电源电压保持一定的相位关系。

④功率因数预调整器[4]: 在电力电子装置中加入高功率因数预调整器, 在预调整器的直流侧通过 DC/DC 变换控制入端电流, 保证电力电子装置从电网中获取的电流为正弦电流并与电网电压同相。此方法控制简单, 可同时消除高次谐波和补偿无功电流, 使电力电子装置输入端的功率因数接近于 1。

⑤无源滤波器(PF)[5]: 无源滤波器通常采用电力电容器、电抗器和电阻器按功能要求适当组合, 在系统中为谐波提供并联低阻通路, 起到滤波作用。无源滤波器的优点是投资少、效率高、结构简单、运行可靠及维护方便, 因此无源滤波是目前广泛采用的抑制谐波及进行无功补偿的主要手段。无源滤波器的缺点在于其滤波特性是由系统和滤波器的阻抗比所决定, 只能消除特定的几次谐波, 而对其它次谐波会产生放大作用, 在特定情况下可能与系统发生谐振; 谐波电流增大时滤波器负担随之加重, 可能造成滤波器过载; 有效材料消耗多, 体积大。

⑥有源滤波器(APF)[6]: APF 通过检测电路检测出电网中的谐波电流, 然后控制逆变电路产生相应的补偿电流分量, 并注入到电网中, 以达到消谐的目的。APF 滤波特性不受系统阻抗影响, 可消除与系统阻抗发生谐振的危险。与无源滤波器相比, 具有高度可控性和快速响应性, 不仅能补偿各次谐波, 还可抑制电压闪变、补偿无功电流, 性价比较为合理。另外, APF 具有自适应功能, 可自动跟踪补偿变化着的谐波。APF 按与系统连接方分类, 可分为串联型、并联型、混合型 and 串-并联型。并联型 APF 可等效为一受控电流源, 主要适用于感性电流源负载的谐波补偿。它对谐波和无功电流进行动态补偿, 并且补偿特性不受电网阻抗影响。目前这类 APF 技术已相当成熟, 大多数工业运行的 APF 多属此类滤波器。串联型 APF 可等效为一受控电压源, 主要用于消除带电容滤波的二极管整流电路等电压型谐波源负载对系统的影响, 以及系统侧电压谐波与电压波动对敏感负载的影响。由于此类 APF 中流过的电流为非线性负载电流, 因此损耗较大; 此外串联 APF 的投切、故障后的退出等各种保护也较并联 APF 复杂所以目前单独使用此类 APF 的案例较少, 国内外的研究多集 PF 就是将常规 APF 上承受的基波电压移去使有源装置只承中在其与 LC 无源滤波器构成的混合型 APF 上。混合型 A 受谐波电压, 从而可显著降低有源装置的容量, 达到降低成本、提高效率的目的。其中 LC 滤波器用来消除高次谐波, APF 用来补偿低次谐波分量。其原理如图 4 所示。

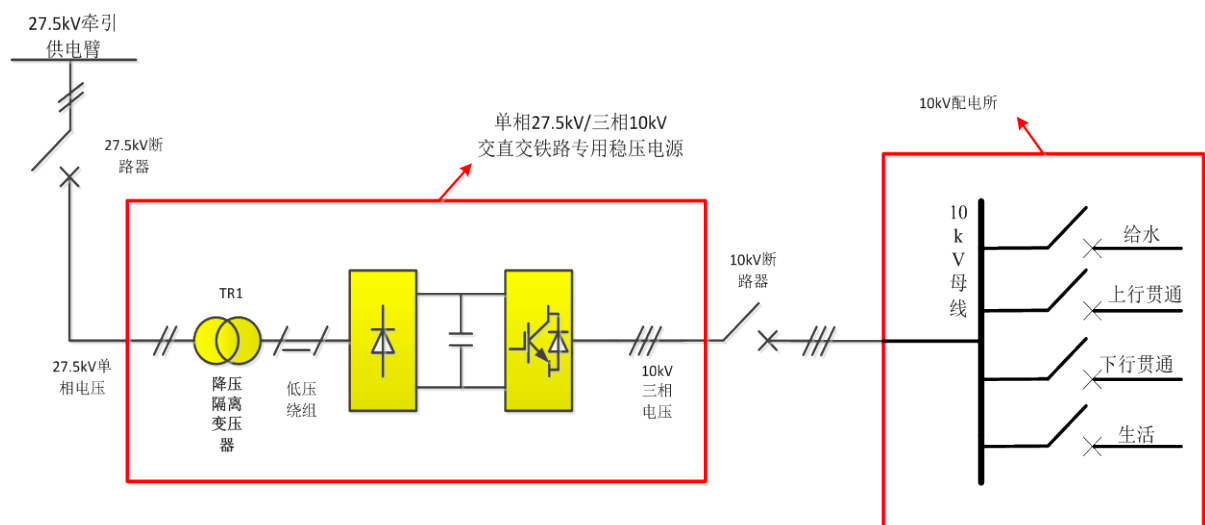


Figure 4. The principle diagram of the active filter
图 4. 有源滤波原理图

5) 加大电网容量, 增加供电网络间的联络支路, 以提高电网的抗波能力。

6) 由电力系统采用集中式补偿, 统一治理。

7) 牵引变电所 10 kV 动力变一次侧接到 110 kV 侧, 减少接触网谐波对 10 kV 系统的影响。

8) 今后设计电气化铁路时, 采用牵引变电所动力变作为 10 kV 配电所电源的, 应充分考虑谐波的影响及消除谐波的措施。

7. 结束语

目前, 我局的电气化铁路正处于发展阶段, 在新建电气化铁路和既有电气化改造的施工过程中, 10 kV 电力系统电源由牵引变电所动力变供给的电源质量不稳定问题, 必须引起充分重视。这一问题在建设初期的解决对铁路 10 kV 供电系统的建设具有重要意义, 可有效减小电力线路建设成本, 尤其是在西部电网密度较低的地区, 从根本上解决电源质量不稳定问题, 不断提高铁路供电可靠性。

参考文献 (References)

- [1] 孟凡刚, 杨世彦, 杨威 (2012) 多脉波整流技术综述. *电力自动化设备*, **2**, 9-22.
- [2] 李锡雄, 陈婉儿 (1996) 脉宽调制技术. 华中理工大学出版社, 武汉.
- [3] 梁小国, 危建, 阮新波 (2004) 一种新颖的交错并联正激三电平变换器. *中国电机工程学报*, **11**, 139-143.
- [4] Noon, J. (2010) UC3855A/B 高性能功率因数预调节器. Texas Instruments, Dallas.
- [5] 夏红, 徐自强, 王浩勤 (2008) LTCC 带通滤波器的设计. *电子科技大学学报*, **S1**, 47-49.
- [6] 姜齐荣, 赵东元, 陈建业 (2005) 有源电力滤波器. 科学出版社, 北京.