

电气化铁路接入电力系统 220kV 和 110kV 供电电压等级的研究

张晓薇, 李振国

(西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 讨论了电气化铁路牵引变电所采用 220 kV 和 110 kV 两种不同供电方案下的优缺点。先从理论上分析比较两种供电电压等级下电气化铁路注入系统的谐波和负序引起的电能质量, 其中主要计算比较注入公共连接点母线谐波电流、电压总畸变率、三相电压不平衡度和电压波动等几个重要的电能质量指标。再结合工程实例, 通过技术经济的综合分析和比较, 选择性价比高的方案。为今后电气化铁路的建设提供借鉴经验的同时推动相关工程的工程化发展。

关键词: 电气化铁路; 供电电压; 谐波; 负序; 三相电压不平衡度; 电压波动; 电能质量

Research on power supply with 220 kV and 110 kV in traction substations of electric railways

ZHANG Xiao-wei, LI Zhen-guo

(School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Advantage and disadvantage of power supply scheme with 220kV and 110kV for traction substations of electric railways are discussed in the paper. At first, electrical energy quality is calculated and analyzed theoretically from two aspects of harmonic and negative-sequence, including harmonic current injected to point of common coupling(PCC), total harmonic distortion of voltage (THD_U) of PCC, three-phase voltage unbalance factor of PCC and voltage fluctuation of PCC, etc. And then, combined with the project case, superior scheme with low cost and high reliability is suggested by technical analysis and economic comparison. This may offer useful experience and promote the development of relevant projects.

Key words: electric railways; supply voltage; harmonics; negative-sequence; three-phase voltage unbalance factor; voltage fluctuation; power quality

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)17-0013-03

0 引言

电气化铁路(简称电铁)供电系统由电力供电系统与牵引供电系统两部分组成,其中由电力供电系统中心变电站向牵引所供电的线路电压称为供电电压等级。国内现有电气化铁路的供电电压等级大多数为 110 kV,但随着电力事业的不断发展,国内 500 kV 线路骨架、省间 220 kV 线路的输变电网络基本形成,牵引变电所供电电压等级开始向 220 kV 发展。

显然 220 kV 电网相对于 110 kV 电网其系统阻抗小、短路容量大,当电气化铁路采用 220 kV 的供电电压等级时,同样的谐波和负序电流所引起的电压畸变和三相不平衡水平大大降低,用时还减少了牵引供电系统的电压偏差。但由于 220 kV 属于主网,加上电铁覆盖面广、地区差异性的特点,电铁负荷直接接入 220 kV 系统,一旦其产生的谐波和负序在局部地区造成电力系统故障,其影响面会波及更大的范围,造成更大的损失。同时电铁负荷对接

入系统的换流设备和发电机的影响加大,严重时可能会造成电铁沿线的小发电厂不能正常工作。因此,电铁负荷直接接入 220 kV 系统也存在较大的风险。另外,220 kV 供电方案的投资成本将大大增加。

因此,牵引变电所到底采用何种电压等级较为合理,我们需要针对实际情况,通过经济技术等方面的综合比较来决定。本文结合实际工程,针对电气化铁路采用 110 kV 和 220 kV 两种不同的供电电压等级进行的技术经济比较,得出较为合理的、经济的和可行的供电方案,为今后的电气化铁路的建设提供借鉴经验。

1 电铁负荷引起的电能质量

电力机车牵引负荷功率大,速度及负载状况变化频繁,对于三相对称的电力系统供电来说,该单相整流负荷具有非线性、不对称和冲击性等特点,将产生谐波电流和三相不平衡的基波负序电流注入系统,造成继电保护误动、电网电压波动以及系统功率因素降低等问题。对于不同的电压等级,不同

的电力供电系统, 电力机车产生的谐波、负序电流等对供电系统的影响有所不同。

1.1 谐波

根据文献[1]可得, 牵引变电所高压侧的 h 次谐波电流 $I_h \propto \frac{1}{K}$, 其中 K 为牵引变的变比。国内牵引变的低压侧电压一般为 27.5 kV, U_N 为电网的标称电压 (kV), 故 $K = \frac{U_N}{27.5}$ 。综合知 $I_h \propto \frac{1}{U_N}$, 即谐波电流 I_h 和电压 U_N 呈现反比关系。

根据国标 GB/T 14549-93 电能质量 公用电网谐波附录 C 中牵引变电所高压侧的 h 次谐波的电压含有率 (%) 近似计算公式为:

$$HRU_h = \frac{\sqrt{3}U_N h I_h}{10S_k} (\%)$$

电压总谐波畸变率 (%) 计算公式为:

$$THD_u = \sqrt{\sum_2^{\infty} HRU_h^2} (\%)$$

由上知 $I_h \propto \frac{1}{U_N}$, 则可得 $HRU_h \propto \frac{1}{S_k}$,

$THD_u \propto \frac{1}{S_k}$ 。其中, h 为谐波次数; I_h 为牵引变高压侧第 h 次谐波电流 (A); S_k 为公共连接点的三相短路容量 (MVA)。

可见牵引变高压侧的 h 次谐波的电压含有率和总谐波畸变率近似与短路容量成反比。而国内电铁负荷和系统的典型参数: 220 kV 供电系统的短路容量一般取 2000 MVA, 110 kV 供电系统的短路容量一般取 750 MVA, 显然当牵引变采用 220 kV 供电电压等级时, 电气化铁路牵引负荷引起的电压总畸变率大大降低。

1.2 三相不平衡

同上可得: $I_h \propto \frac{1}{U_N}$, 显然有 $I_h \propto \frac{1}{U_L}$, 其中

U_L 为线电压, kV。即谐波电流 I_h 和线电压 U_L 亦呈现反比关系。根据国标 GB/T 14549-93 电能质量三相电压允许不平衡度 附录 B 可知, 电力机车产生的负序电流在高压侧引起的三相电压不平衡度 (%) 近似计算公式为:

$$\mathcal{E}_U = \frac{\sqrt{3}U_L I_2}{10S_k} (\%)$$

式中: I_2 为负序电流 (A)。显然, 可得 $\mathcal{E}_U \propto \frac{1}{S_k}$,

即电力机车产生的负序电流引起的三相电压不平衡度近似与短路容量成反比。同理, 当牵引变采用 220 kV 供电电压等级时, 电气化铁路产生的负序电流引起的三相电压不平衡度较之 110 kV 系统大大降低。

1.3 电压波动

国内牵引变的低压侧电压一般为 27.5 kV, 以单相牵引变为例, 则牵引变高压侧电压波动计算公式为:

$$\Delta U \% = \frac{\sqrt{3} \times 2.75 \times I}{S_k} (\%)$$

其中: I 为牵引供电臂冲击电流值 (A)。可见, 电压波动近似地与牵引负荷接入点的系统短路容量成反比。

2 投资成本

显然, 220 kV 变电站的高压电器、系统的继电保护、线路、变电站的占地等综合投资成本要远高于 110 kV 变电站, 即 220 kV 供电方案的投资成本较之 110 kV 供电方案成本将有大幅度增加。

同时, 由于电气化铁路如采用 110 kV 供电方案时, 电能质量往往达不到国家标准的要求, 一般需要进行无功补偿和滤波等电能质量问题的治理。故需要追加一笔电能质量治理的费用, 因此比较两种方案的投资成本时需要考虑电能质量治理需要投资的成本部分。

3 结合实际工程分析

工程背景资料介绍: 某电气化铁路主要客运为主, 其中某牵引变 M (如图 1), 可采用两种供电方案, 即由 110 kV 变电站 P1 (母线三相最小短路容量 613 MVA) 出 2×25 km 110 kV 电缆供电 (图中虚线所示); 或由 220 kV 变电站 P2 (母线三相最小短路容量 2562 MVA) 出 2×60 km 220 kV 线路供电 (图 1 中实线所示)。牵引主变容量为 31.5 MVA, 阻抗电压 10.5%, 采用三相 V-v 接线方式。电铁负荷最大冲击电流 727 A。

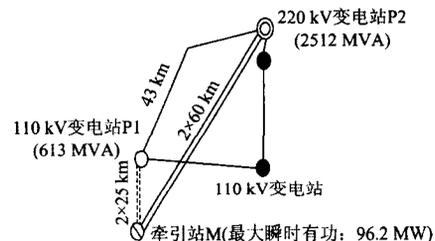


图 1 牵引变供电系统简图

Fig.1 Sketch of traction substation supply

3.1 不同电压等级下电能质量问题比较

谐波引起的电压畸变率:根据实际工程的资料,采用从加拿大 CYME 公司引进的电力系统谐波分析程序 CHP 建立系统模型,进行仿真计算和分析,得到:

表 1 公共连接点母线电压总谐波畸变率

母线名称	畸变率/(%)	
	110kV方案	220 kV方案
牵引变M母线	3.48	1.21
P1 变电站110kV 母线	2.72	0.84
P2 变电站220kV 母线	0.66	0.67

根据表 1 结果可知,当牵引站 M 采用 110 kV 供电方案时,计算得牵引站 M 110 kV 母线电压总谐波畸变率为 3.48%,不能达到 2%的国标要求。同时变电站 P1 110 kV 母线电压总谐波畸变率分别为 2.72%,亦不能达到国标要求。但当牵引站 M 采用 220 kV 供电方案时,计算得各公共连接点 220 kV (110 kV) 母线电压总谐波畸变率均达到 2%的国标要求。

负序电流引起的三相不平衡:根据文献[1]及铁路部门的资料可计算出该电气化铁路注入电力系统的负序电流。根据计算结果建模仿真,可得由负序电流引起的公共连接点母线的三相电压不平衡度如表 2 所示。

表 2 公共连接点母线三相电压不平衡度

母线名称	三相电压不平衡度/(%)	
	110 kV方案	220 kV方案
牵引站M 母线	3.56	1.33
P1 变电站110kV 母线	2.72	0.98
P2 变电站220 kV 母线	0.91	0.87

从表 2 结果可以看出,当采用 220 kV 供电方案时,各公共连接点母线电压不平衡度低于国标限值。但当采用 110 kV 供电方案时,牵引站 M、变电站 P1 母线电压不平衡度分别为 3.6%、2.72%,均超出国标限值 2%。

电压波动:已知电铁负荷牵引臂最大冲击电流为 727 A。计算得 110 kV 供电方案下 110 kV 侧电压波动约为 8.51%,220 kV 供电方案下 220 kV 侧电压波动约为 3.07%。可见,110 kV 供电方案不能满足电压波动 4%的国标限值。

根据以上分析知该牵引站如采用 220 kV 供电方案,其谐波、负序电流基本满足国家标准的要求。如采用 110 kV 供电方案,则必须要加装电能质量治

理装置。

3.2 投资成本比较

由于本工程中,变电站 P2 距离牵引站距离较远,且沿途施工难度比较大。扩建变电站 P2 及相关设备和线路等投资成本比扩建变电站 P1 及相关设备和线路等要高出 3670 万。而 110 kV 供电方案需要加装电能质量治理装置,拟采用三相 TCR 型 SVC 装置接入电力系统侧进行动态无功补偿、电压控制、谐波和负序治理。使得治理后的谐波、负序及电压波动等均能满足国标的要求,且做到无功不反送。预算知该 TCR 型 SVC 装置及其配套装置的投资成本约为 1800 万。综合比较知该牵引变 M 采用 110 kV 供电并配套 SVC 的方案较之 220 kV 供电方案可节约成本约为 1870 万。

另外,由于该地区处于无人居住的山区,电力事业发展的需求小,地理环境差,而 220 kV 输电走廊距离较远,施工极其困难。

综合比较可知该牵引变采用 110 kV 供电电压等级配套 SVC 装置的方案较为合理可行,且节省投资。

4 结语

总之,电铁负荷接入 220 kV 系统存在着显著的优越性,大大缓解了电铁负荷谐波和负序的影响,提高了供电系统的稳定性。同时相对于 110 kV 供电系统亦存在较大的风险。且其投资成本亦将大大增加。

因此,对于电气化铁路负荷,我们要根据实际情况来具体对待。对于一般电铁负荷可以考虑 110 kV 接入电网方案。尤其是对于一些位于少人或无人居住的山区,地理位置差,且没有特别重要的负荷时,220 kV 变电站资源得不到充分的利用的情况下,优先考虑采用 110 kV 供电方案。这样不但节省投资,也给施工带来便利,相对的性价比较高。而对于一些对电铁供电电源质量要求较高的高速铁路,或地区发展前景可观,以及电铁 110 kV 系统接入点的系统短路容量较小,不能满足电铁负荷的供电能力和电能质量的要求时,建议采用 220 kV 供电电压等级。

最终采用的方案必须满足电气化铁路供电可靠性和电源质量,保证供电系统的电能质量满足国标要求,同时结合各地区电力事业的发展规划、电铁负荷的发展需要、地区的地理情况和投资等因素,综合分析比较,优先选择合理、可行和经济的方案。

(下转第 31 页 continued on page 31)

动的分段开关, 程序对三个方案进行局部校正, 得出如表 2 所示的三个方案。选择方案 1 作为新的最优恢复方案。

4 结论

本文将基于免疫原理的蚁群算法应用于配电网的故障恢复中, 以附加网损最小和开关操作次数最少为目标函数, 建立了相应的求解算法, 并通过算例验证结果表明, 基于免疫原理的蚁群算法应用于组合优化问题, 可以以更大的概率和更快的速度得到全局最优解; 由于抗体的多样性使系统有较强的自我调节能力, 从而使算法的搜索空间尽可能大; 算法对目标函数没有特定要求, 因而适用范围较广。

参考文献

- [1] Toune S, Fudo H, Genji T, et al. Comparative Study of Modern Heuristic Algorithms to Service Restoration in Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(1):173-181.
- [2] Nahman J, Strbac G. A New Algorithm for Service Restoration in Large-scale Urban Distribution System[J]. Electric Power System Research, 1994, 29:181-192.
- [3] Ciric R M, Popovic D S. Multi-objective Distribution Network Restoration Using Heuristic Approach and Mix Integer Programming Method[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2000, 22:497-505.
- [4] 葛朝强, 唐国庆, 王磊. 综合职能式的故障恢复专家系统[J]. 电力系统自动化, 2000, 25:17-21.
GE Zhao-qiang, TANG Guo-qing, WANG Lei. Integrated Intelligent Service Restoration System for Distribution Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 25:17-21.
- [5] Hsiao Ying-Tung, Chien Ching-Yang. Enhancement of Restoration Service in Distribution Systems Using a Combination Fuzzy-GA Method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4):1394-1400.
- [6] Hsu Y Y, Huang H M. Distribution System Service Restoration Using the Artificial Neural Network Approach and Pattern Recognition Method[M]. IEE Proc Gener, Transm and Distrib, 1995, 142(3):251-256.
- [7] 张雅, 杨丽徙, 刘冬, 等. 基于蚁群算法的配电网故障后恢复重构[J]. 电气应用, 2007, 26(9):41-44.
ZHANG Ya, YANG Li-xi, LIU Dong, et al. Ant Colony Algorithm for Service Reconfiguration in Distribution Restoration Networks[J]. Electro Technical Application, 2007, 6(9): 41-44.
- [8] 郭恒, 罗可, 唐贤璞. 基于蚂蚁算法的配电网无功优化[J]. 电力电容器, 2005, (4):21-24.
GUO Heng, LUO Ke, TANG Xian-ying. Improved ant Colony Algorithm for Distribution Reactive Power Optimization[J]. Power Capacitors, 2005, (4) :21-24.
- [9] 赵强, 敬东, 李正. 蚁群算法在配电网规划中的应用[J]. 电力自动化设备, 2003, 23 (2): 52-54.
ZHAO Qiang, JING Dong, LI Zheng. Application of Ant Colony Algorithm for Distribution System Planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(2): 52-54.
- [10] Song Y h. Combined Beat and Power Economic Dispatch by Improved ant Colony Search Algorithm[J]. Journal of Electrical Engineering, 2004, 55:57-63.
- [11] 胡小兵, 胡小平, 黄席樾, 等. 基于免疫原理的蚁群系统及其应用[J]. 数学的实践与认识, 2006, 36(6):146-153.
HU Xiao-bing, HU Xiao-ping, HUANG Xi-yue, et al. Ant Colony System Based on Immune Principle with Application[J]. Mathematics Practice and Theory, 2006, 36(6): 146-153.

收稿日期: 2008-04-13

作者简介:

郁嘉嘉 (1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统保护、控制与自动化; E-mail: huan.jiajia@mail.scut.edu.cn

黄少先 (1954-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为自动化仪表及计算机检测控制等。

(上接第 15 页 continued from page 15)

参考文献

- [1] 吕润餘. 电力系统高次谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [2] 林海雪. 电力系统的三相不平衡[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [3] 中国国家标准 GB/T 14549-93: 中华人民共和国国家标准——电能质量 公用电网谐波[M]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [4] 中国国家标准 GB/T 15543-1995: 中华人民共和国国家标准——电能质量 三相电压允许不平衡度[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.

收稿日期: 2007-11-26; 修回日期: 2008-02-27

作者简介:

张晓薇 (1981-), 硕士研究生, 主要从事电力电子技术、SVC 系统设计等研究; E-mail: xw-xiaow@yahoo.com.cn

李振国 (1946-), 男, 副教授, 主要从事电力电子技术及系统的智能控制等研究。