

中压配电网络低电压补偿调控技术及实现

杨伟奇^{1,2}, 高晓阳^{1*}, 朴在林²

(1. 甘肃农业大学工学院, 兰州 730070; 2. 沈阳农业大学信息与电气工程学院, 沈阳 110866)

摘要: 电压是电能质量考核的一个重要指标。处于系统末端的农村中、低压配电网络在用电高峰期“低电压”现象频繁出现, 严重影响了农民正常生产生活用电。该文结合辽宁西丰地区中压配电网络, 基于线路调压器调压和无功补偿的基本原理, 研究了线路调压器以线路末端远程监测电压为依据和无功补偿以线路首端无功潮流为依据的上位机远程控制的低电压协调控制治理方法。通过远程调控技术实现了在最大潮流下线路的功率因数由补偿前 0.97 提高到 0.99, 10 kV 线路损耗率比协调控制前下降了 6%, 配电变压器原边电压合格率由原有的 22% 达到了 100%。该文集成应用无线通信技术和自动化综合补偿和调压技术, 有效地改善了中、低压配电网络的电压合格率和电能损失率。

关键词: 农村地区; 电; 远程控制; 低电压; 无功补偿; 线路调压; 协调控制

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.z1.028

中图分类号: TM727.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-Supp.1-0198-05

杨伟奇, 高晓阳, 朴在林. 中压配电网络低电压补偿调控技术及实现[J]. 农业工程学报, 2016, 32(Supp.1): 198—202.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.z1.028 <http://www.tcsae.org>

Yang Weiqi, Gao Xiaoyang, Piao Zailin. Implementation of low voltage compensation control in medium voltage distribution network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(Supp.1): 198—202. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.z1.028 <http://www.tcsae.org>

0 引言

近年来“低电压”现象的频繁出现, 已经引起国家电网等有关部门的高度重视。据统计有关数据显示, 全国平均线损率 8.48%, 线损电量高达 367.75 亿 kW/h, 而同期美国的平均线损率为 6.1%, 日本的平均线损率为 6.0%, 西德的平均线损率为 3.7%。若将中国配电网平均线损率下降两个百分点, 每年就可以少损电量 86.73 亿 kW/h^[1]。有些资料显示, 某省农村电网在低电压治理前涉及“低电压”问题的 10 kV 线路有 159 条, 台区共 7 143 个, 涉及用户 525 131 户。此数据表明低电压现象主要体现在配电变压器原边电压不足所为, 也是本论文研究的意义所在。

低电压现象依考核点标准主要体现在 2 点: 一是 10 kV 线路末端, 二是 0.38 kV 配电线路末端。引起 10 kV 线路末端电压低现象主要原因是系统电压不稳定、主变有载调压未启动、线路无功潮流过大、供电半径过长、导线截面不足等, 引起 0.38 kV 配电线路末端电压低现象主要原因是高压侧电压过低、供电半径过长、导线截面不足等^[2-3]。

10 kV 配电线路的电压动态调节应依赖主变压器的有载调压, 但是由于主变的有载调压装置分解开关频繁调节引起容器内的绝缘油加速碳化而受到限制, 尽管要

求新上主变压器必须是有载调压功能, 而实际运行中有载调压变压器有其功能无其实现的现象非常普遍。即便是实现有载调压变压器依变电站的母线为基准进行动态调压, 针对不同的供电半径、负荷大小、导线截面, 也不能保证所有线路的末端电压都满足要求^[4-5]。众所周知, 在相同的供电半径和截面下线路损耗与电压的平方成反比, 电压每提升 2%, 线损下降 4%^[6]。无功补偿可以改善电压质量和电能损耗^[7-12], 但是对导线截面不足、供电半径过长的 10 kV 配电线路而言改善电压质量是有限的^[13]。针对中低压配电网络个别低电压现象采取分布式电源介入, 同样获得良好的治理效果^[14-17]。

本文基于线路无功补偿和调压器调压的基本原理, 集成计算机技术、通信技术、自动化技术, 提出了线路无功补偿及调压器调压智能协调控制方案。以线路末端电压和线路首端无功潮流作为考核依据, 通过上位机远程通信系统, 针对线路无功补偿装置和线路调压器进行实时遥控, 探索一条改善中、低压配电网络的电压合格率和电能损失率的有效途径。

1 系统集成技术

10 kV 馈线自动调压器具有后台监控软件, 安装在局域网上位机系统。上位机通过通用分组无线服务 (general packet radio service, GPRS) 技术时刻采集线路调压器的运行数据和线路末端电压采集器的电压数据进行判断通过 GPRS 通信遥控指令线路调压器调压, 实现自动调压的目的, 与以往不同的是以线路末端采集的电压为调压依据。

无功补偿装置 (含下位机智能终端) 全天候采集各

收稿日期: 2015-04-22 修订日期: 2015-10-21

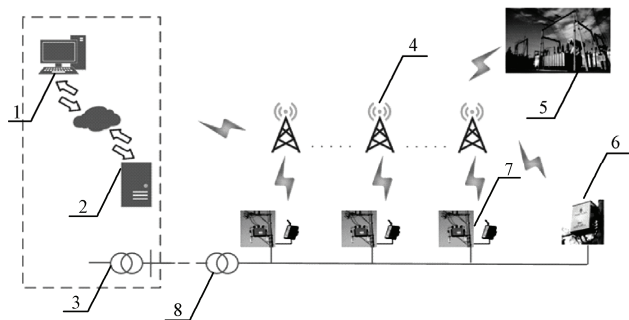
基金项目: 国家科技支撑计划子课题 (2006baj04b06-002)

作者简介: 杨伟奇, 男, 汉族, 内蒙赤峰人, 主要从事低电压综合治理研究。兰州 甘肃农业大学工学院, 730070。Email: yangweiqi@163.com

*通信作者: 高晓阳, 男, 汉族, 甘肃兰州人, 教授, 主要从事农业工程检测与智能控制技术及系统研究。兰州 甘肃农业大学工学院, 730070。

Email: gaoyao1081@sina.com。农业工程学会会员 (E042700001M)

补偿节点的电压运行参数, 电压过高或故障引起的过低都自动退出运行, 另一方面只是接收上位机的投切指令进行合闸或分闸。与以往补偿装置不同的是投切装置不采集无功或功率因数, 因此不需要电流互感器。电压互感器采集电压的同时为真空接触器提供操作电源, 使本装置具有体积小、重量轻、造价低等特点。上位机系统通过 TCP/IP 网络与调度自动化系统相连, 获得变电站馈线出口的首端无功负荷, 根据无功负荷的大小, 上位机系统进行逻辑判断再通过 GPRS 模块以无线通信的方式将指令线路上相应的补偿容量进行投切, 实现整条线路的无功平衡。系统拓扑结构如图 1 所示。



1. 上位机 2. 通信服务器 3. 变压器 4. 通用分组无线服务 5. 变电站
6. 馈线终端数据采集器 7. 无功补偿智能终端 8. 线路调压器
1.Upper computer 2.Communications server 3.Transformer 4.General
packet radio service (GPRS) 5.Transformer substation 6.Feeder terminal unit
(FTU) 7. Reactive power compensation intelligent terminal 8.Voltage
regulator

图 1 系统拓扑结构

Fig.1 System Topology

2 工程实例

2.1 实施点自然状况及分析

本文以铁岭西丰铜台线为例。线路全长 78 km, 电杆 1161 基, 干线长 33 km (1#-498#大岭沟) 干线导线型号 1-468 号 LGJ-70, 469-498 号 LGJ-50; 有线路真空开关 4 组; 线路固定补偿电容器 4 组 288 kvar; 配电变压器 63 台, 总容量为 1760 kVA。2012 年运行数据表明最大负荷时首端电压为 10.4 kV, 末端电压为 8.22 kV, 配电变压器首端相电压 189 V。铜台线 2012 年月典型日有功和无功功率基本情况如表 1 所示。

表 1 月典型日有功和无功潮流

Table 1 Active and reactive power flow of the typical day of each month

时间 Time	有功功率 Active power/kW		无功功率 Reactive power/kvar	
	最大值 Maximum	最小值 Minimum	最大值 Maximum	最小值 Minimum
2012 年 11 月	769	143	1	-236
2012 年 9 月	806	162	64	-195
2012 年 8 月	1 200	189	344	-155
2012 年 7 月	1 505	197	368	-101

实施点低电压产生的主要原因是 10 kV 线路过长、导线截面严重不足, 供电主干线线路不足 7 km 其电压损失率超过 5%, 配电线路电压损失率达到 11.6%, 63 台配电变压器中有 49 台原边电压不合格, 达到 78%。无功补偿不

合理, 4 组补偿点均处在首端附近, 并没有改善补偿点以后的电压质量, 同时均为固定补偿, 即便是功率因数达到 0.97, 但是低负荷时无功倒送现象十分严重, 反而不经济。

2.2 实施点的实施方案研究

通过表 1 首先选择月最大有功负荷线路没有无功补偿条件下进行潮流计算, 重新确定无功优化方案, 在此基础上确定线路调压器的容量和安装位置, 并进行校验。

2.2.1 无功优化方案

通过铜台线的自然状况和表 1 可知, 线路固定补偿容量为 288 kvar, 而线路最小有功功率对应的最小无功功率为 -236 kvar, 因此可得线路实际最小无功功率为 288-236=52 kvar, 故线路固定补偿容量选择为单台 50 kvar。若没有运行资料时线路固定补偿容量可由下式确定

$$Q_c = 0.9 \sum_{i=1}^{i=n} \Delta Q_{0i} \quad (1)$$

式中 ΔQ_{0i} 为线路中每台配电变压器的空载无功损耗 (不含高压用户高压补偿配电变压器), kvar。

由表 1 和原有安装无功补偿容量可推算出铜台线最大无功需求量为 656 kvar, 在原有安装容量 288 kvar 下最大负荷时功率因数为 0.97。根据表 1 线路的最大有功功率和最大无功功率的需求, 设计补偿总容量为 440 kvar, 其中 50 kvar 为固定补偿, 390 kvar 为动态补偿。设计补偿点为 3 处, 其中 237 号杆, 补偿 90 kvar (动态 90 kvar); 353 分支 21 号杆, 补偿 180 kvar (动态 60 kvar+动态 120 kvar); 426 号杆, 补偿 170 kvar (动态 120 kvar+固定 50 kvar)。上位机系统根据变电站出口的无功潮流将 4 组动态加 1 组固定补偿运行方式可以组成 17 种排列组合, 上位机系统本着无功功率平衡的原则进行优化组合, 再指令安装点下位机进行远程控制, 实现整条线路的无功动态平衡。图 2 所示为无功补偿前整条线路无功潮流分布, 图 3 为补偿后无功潮流的变化分布。

10 kV 线路无功优化系统已在内蒙赤峰地区农电系统 10 kV 线路上进行了实施研究, 收到了良好的效果, 为本课题的研究积累了实践经验。图 4 为线路 2 组动态补偿安装实例, 电容器分体安装, 与以往常用的 H 台无功补偿箱相比体积小、重量轻、占地面积小等优势。图 5 为上位机管理系统补偿以后的功率因数日运行曲线图, 运行曲线显示功率因数是接近于 1 的一条直线。

2.2.2 线路调压器安装位置和容量的确定

首先无功优化的基础上, 按首端最大负荷情况进行潮流计算, 线路调压器必须满足电压损失率不超过 5% 的范围内确定安装位置。线路调压器安装位置可由下式确定

$$L \leq \frac{\Delta u \% U^2}{P_{\max} r_0 + Q_{\max} x_0} \times 10^3 \quad (2)$$

式中 $P_{\max}$ 为最大有功负荷功率, kW; $Q_{\max}$ 为最大无功负荷功率, kvar; U 为额定电压, kV; $\Delta u \%$ 为电压损失率 5%; L 为线路调压器安装点距离, km; r_0 、 x_0 为单位线路长度电阻、电抗, Ω 。

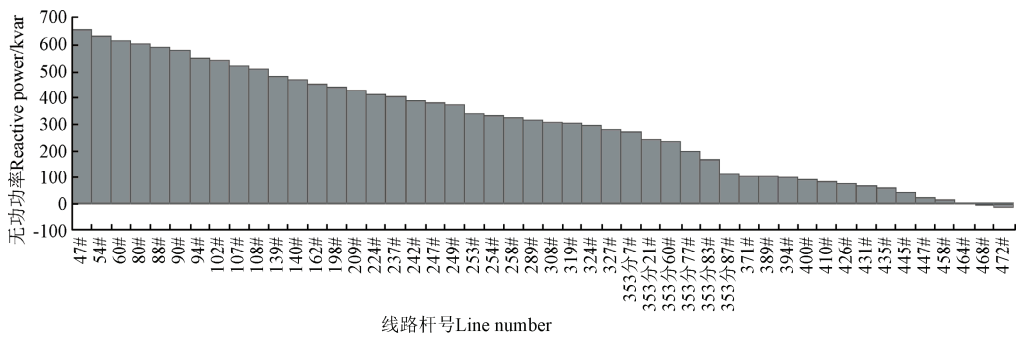


图 2 补偿前无功潮流

Fig.2 Reactive current situation Before the compensating

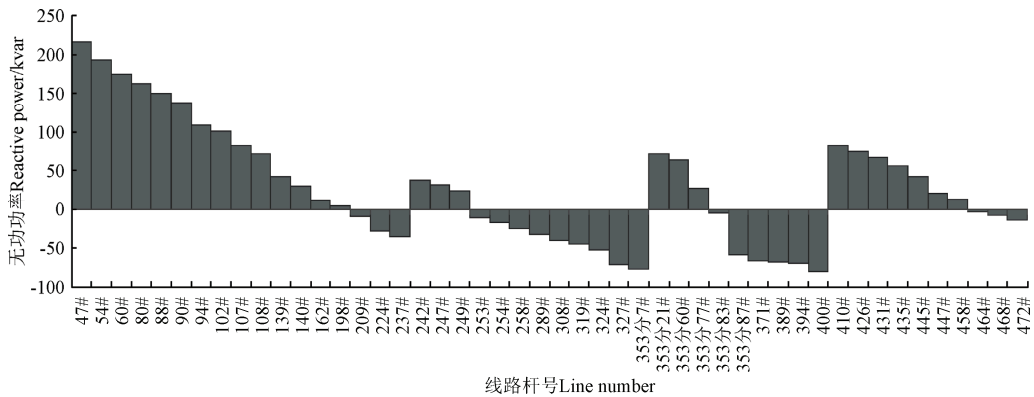


图 3 补偿后无功潮流

Fig.3 Reactive current situation after compensating



图 4 线路两组动态补偿安装实例

Fig.4 Instance of two groups of dynamic compensation installation on line

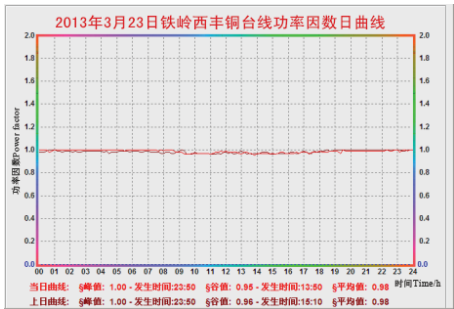


图 5 补偿后功率因数日曲线图

Fig.5 Power factor curve after compensation

经无功优化后电压降计算可知，线路调压器安装位置只要选在距离首端小于 7.76 km 就能满足条件，固安装

位置选在 107 号杆位。线路调压器的容量应满足安装点以后最大潮流的要求，按线路首端最大有功功率与配电变压器容量比例统计，安装点以后的线路最大潮流为 1 230 kVA，考虑后期发展线路调压器的容量选为 1 600 kVA。线路调压器参数如表 2 所示。

表 2 线路调压器参数					
Table2 Voltage regulator parameters					
型号 Type	额定容量 Rated capacity/ kVA	短路损耗 Short circuit loss/w	空载电流 No-load current /%	阻抗电压 Impedance voltage/%	空载损耗 No-load loss/w
SVR-1600	1600	3700	0.8	0.75	600

该调压器为 SVR 型线路自动调压器，具有遥测、遥信、遥调和遥控功能，同时调压范围在 0~+20%。

通过计算整个配电线路台区的潮流分布，得到节点电压对台区变化的灵敏度及线路每个节点的压降。在线路末端安装馈线终端装置（feeder terminal unit, FTU），对线路末端电压进行实时监控，并且由 GPRS 通讯技术将线路末端电压实时数据传递给上位机，上位机再根据末端电压和线路调压器的档位实际情况，指令线路调压器进行档位调整，实现远程调压的目的。

2.2.3 实施方案校验分析

针对铁岭西丰铜台配电线路进行无功补偿优化和线路调压器调压协调治理，在最大潮流下线路的功率因数由补偿前 0.97 提高到 0.99，10 kV 线路线损率比协调控制前下降了 6%。协调治理前后电压变化曲线如图 6 所示。

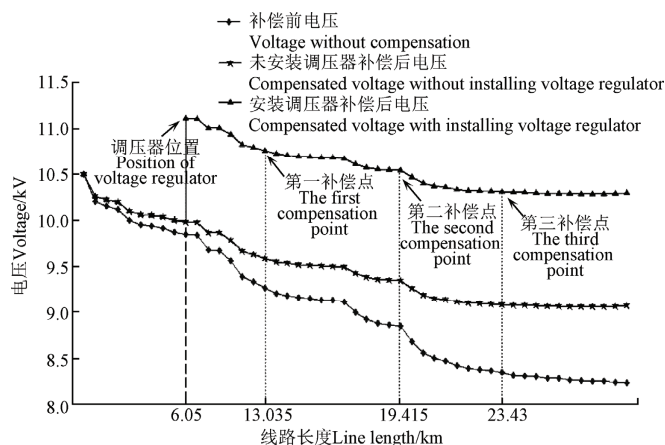


图 6 综合补偿前后电压变化图

Fig.6 Voltage curve before and after compensation

从电压变化曲线可以看出, 尽管无功优化使末端电压比补偿前提升 10.2%, 但是末端电压仍然不能满足要求。无功补偿优化和线路调压器调压综合治理使配电变压器原边电压合格率由原有的 22%达到了 100%。在计算机、通讯、自动化技术的集成下有效的治理低电压现象, 并实现了上位机远程管理的智能系统, 为智能配电网的逐步实现奠定了基础。

3 结 论

1) 中压配电网低电压治理优先考虑无功优化, 在此基础上合理选择调压器的安装位置、容量和控制方式。使配电变压器原边电压合格率由原有的 22%达到了 100%。

2) 线路无功补偿控制方式以往都是安装点就地采样就地控制方式, 而且多数是功率因数控制型, 安装点的无功负荷只有大于安装容量时才能投入运行。因此, 补偿电容器的投运率受安装点的无功潮流限制。论文研究的无功优化智能系统特点在于线路首端采集无功功率的大小, 整条线路由上位机管理模式, 与无功补偿安装点的无功潮流没有关系, 补偿点宜选在从末端统计无功潮流补偿容量的一半处, 实际运行时补偿点向末端和首端双向无功输送, 使线路无功潮流为最小, 有效的减少了无功潮流引起的线路有功损耗和电压损耗。

3) 线路调压器调压低电压治理, 从线路末端采集电压数据, 由上位机以此数据为依据远程控制调压方式还是首次尝试, 不同于以往就地采样就地控制方式。在最大潮流下线路的功率因数由补偿前 0.97 提高到 0.99, 10 kV 线路线损率比协调控制前下降了 6%。

线路调压器的自动调压装置目前的产品性能还不能满足频繁的操作, 抑制了所需求的功能, 有待于进一步研究。

【参 考 文 献】

[1] 王建学, 王锡凡, 陈皓勇. 基于协同进化法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 124—129. Wang Jianxue, Wang Xifan, Chen Haoyong. Reactive power optimization based on corproative co-evolutionary approach[J].

Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 124—129. (in Chinese with English abstract)

[2] 谭东明, 朴在林, 郑维刚. 配电线路无功优化就地控制与系统控制效果比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 235—240. Tan Dongming, Piao Zailin, Zheng Weigang. Comparison of reactive power optimization between local and system on distribution lines[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(4): 235—240. (in Chinese with English abstract)

[3] 刘传铨, 张焰. 电力系统无功补偿点及其补偿容量的确定[D]. 电网技术, 2007(12): 78—81. Liu Chuanquan, Zhang Yan. Confirmation of reactive Power Compensation Node and Its optimal Compensation Capacity[D]. Power system Technology, 2007(12): 78—81. (in Chinese with English abstract)

[4] 李隆先. 农网低电压分析及治理[J]. 新疆电力技术, 2011(2): 27—30. Li Longxian. Analysis and treatment of low voltage in rural power network[J]. Xinjiang Electric Power Technology, 2011(2): 27—30. (in Chinese with English abstract)

[5] 陈芳, 李儒, 吴珊珊. 浅谈有载调压变压器在电力系统中的应用[J]. 广东电力, 1999, 12(4): 62—63. Chen Fang, Li Ru, Wu Shanshan. Application of on-load voltage regulating transformers in electric power system[J]. Guangdong Electric Power, 1999, 12(4): 62—63. (in Chinese with English abstract)

[6] 刘家军, 刘栋, 姚李孝, 等. 农网低电压治理的三级联调方式研究[J]. 西安理工大学学报, 2011, 1(27): 423—429. Liu Jiajun, Liu Dong, Yao Lixiao, et al. Research on Three Order Voltage Regulation of Rural Power Grid Low-Voltage Controlling[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 1(27): 423—429. (in Chinese with English abstract)

[7] 朴在林, 祁贺, 张志霞, 等. 单相配电变压器三线集束导线两火一零供电模式的实施与展望[J]. 中国电力, 2003, 36(10): 61—64. Piao Zailin, Qi He, Zhang Zhixia, et al. Implementation and prospects of a new low-voltage power supply mode based on single-phase distribution transformer connected to the loads by Bundle Insulation Conductors consisted of two lines and one neutral[J]. Electric Power, 2003, 36(10): 61—64. (in Chinese with English abstract)

[8] 施玉祥, 陶晓农. 中低压变电站无功调节的研究[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(9): 54—57. Shi Yuxiang, Tao Xiaonong. Automatic voltage controller and its application to substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(9): 54—57. (in Chinese with English abstract)

[9] 黄娟娟, 康义, 陈凌云. 南方电网无功补偿配置原则与标准探讨[J]. 中国电力, 2013, 46(3): 43—46. Huang Juanjuan, Kang Yi, Chen Lingyun. Discussion on technical principles and standard for configuring reactive power compensation equipment of china southern power grid[J]. Electric Power, 2013, 46(3): 43—46. (in Chinese with English abstract)

[10] 国家电网公司. 农网“十一五”电压质量和无功电力规划刚要[R]. 北京: 国家电网公司, 2006. State Grid Corporation of China. “Eleven, five” voltage quality and reactive power planning outline of rural power network[R]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2006. (in Chinese with English abstract)

[11] 朴在林, 谭东明, 郭丹. 农村配电网 10 kV 线路无功优化智能系统的研究与实施[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 206—210. Piao Zailin, Tan Dongming, Guo Dan. Research and implementation on reactive power optimization intelligent

- system for 10 KV distribution[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(12): 206—210. (in Chinese with English abstract)
- [12] 胡采娥, 杨仁刚. 用电力系统分区方法确定无功源最佳配置地点[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 11(3): 46—49.
Hu Cai'e, Yang Rengang. Optimal allocation of reactive power sources using network partitioning[J]. Proceedings of Electric Power System and Automation, 2004, 11(3): 46—49. (in Chinese with English abstract)
- [13] 孟晓芳, 朴在林, 解东光. 分布式电源在农村电网中的优化配置方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 243—247.
Meng Xiaofang, Piao Zailin, Xie Dongguang. Distributed generation optimal placing approach in rural power network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(8): 243—247. (in Chinese with English abstract)
- [14] Gopalakrishnan V, Thirunavukkarasu P, Prasanna R. Reactive power planning using hybrid evolutionary programming method[M]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004.
- [15] 李亚男, 张粒子, 杨以涵. 考虑电压约束裕度的无功优化及其内点解法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 1—4.
Li Yanan, Zhang Lizi, Yang Yihan. Reactive power optimisation under voltage constraints margin[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张粒子, 舒隽, 林宪枢, 等. 基于遗传算法的无功规划优化[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 5—8.
Zhang Lizi, ShuJun, Lin Xianshu, et al. Reactive power planning based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 5—8. (in Chinese with English abstract)
- [17] 耿光飞, 杨仁刚. 基于定向变异遗传算法的地区电网无功功率优化[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 42—44.
Geng Guangfei, Yang Rengang. Reactive power optimization of regional power network by directed mutation based genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 42—44. (in Chinese with English abstract)

Implementation of low voltage compensation control in medium voltage distribution network

Yang Weiqi^{1,2}, Gao Xiaoyang^{1*}, Piao Zailin²

(1. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. College of Information and Electric Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Voltage is an important assessment criterion of power quality. The low voltage phenomena (LVP) frequently appeared in the power distribution network especially at the rural areas of China, which had been key technical problem to be solved by the local departments of State Grid Corporation of China (SGCC). However, LVP happened mostly at the end of the rural medium voltage distribution system in the peak season, by which the electric power consumption of farming and farmers were seriously affected, and also lay behind the development of agricultural economy. Insufficient primary voltage of the distribution transformer was the main cause of rural low voltage phenomena. Increasing rural substation sites or the conductor section could also improve the power quality, but the investment cycle was too long and the rate of return lower. It is not suitable for large-scale popularization and application in rural areas. The thesis presented a synthesized optimal dynamic compensation method for low voltage in the whole electric power line, which was adopted practically and led in Xifeng medium voltage distribution network of Liaoning. First, based on the line voltage-regulation theory with voltage regulator and the terminal voltage monitored by feeder terminal unit (FTU), the voltage level of the whole electric power line was up to the national criteria with the power on-load tapping voltage regulator controlled by the remote host computer. In the meantime, at the basis of reactive power flow of the head line, and with the constraint condition of voltage in the nodes of reactive power compensators installed, the reactive compensation commands were sent by the remote host computer. The total reactive power capacity was 440 kvar (kilovolt ampere reactive) in each node of compensators, in which 50 kvar was as static compensation and the other as dynamic separated into 4 groups. According to the output of reactive power tide at the transformer substation, 1 static and 4 set of dynamic capacitor banks were composed of 17 different combinations in every compensation node, which was optimized for grouping parallel capacitor switch by the remote host computer based on the principle of reactive balance. Finally the national supervision standards of reactive power dynamic balance were reached after above computerized dynamic adjusting measures taken in the whole experimental power grid. The experimental results showed that the line power factor increased to 0.99 from 0.97 under the maximum power flow after the synthesized compensation implementation, and 10KV line active power loss rate decreased by 6 percent compared with before, and distribution transformer primary qualified voltage rate rose to 100% from original 22%. In the paper, several theories and methods of wireless communication and computer control and line-automation were integrated into the practical application example of comprehensive voltage compensation, which effectively improved the voltage level and fluctuating range, the qualified voltage rate and the power loss rate in the rural low and medium voltage distribution network. It has good reference value of engineering. The proposed methods also come up with new solutions for the intelligent development of reactive power compensation of rural substation.

Keywords: rural areas; electricity; remote control; low voltage; reactive power compensation; line voltage regulation; integrated control