

# 10 kV 配电网无功优化自动化控制系统设计

周云成, 朴在林, 付立思, 罗岩

(沈阳农业大学信息与电气工程学院, 辽宁 沈阳 110161)

**摘要:** 设计开发了一套基于功率因数和电压双控的、分布式的配电网无功优化自动化控制系统, 作为控制参数的功率因数通过 TCP/IP 协议从调度自动化系统开放的服务端口获得, 电压参数由下位控制机从现场的电压互感器获得。为保证 10 kV 干线出口功率因数和下位控制机现场电压合格, 提出了补偿器投切的控制策略。详细介绍了上位机控制软件的架构和设计方法, 采用多线程技术实现了该软件。上位机和下位控制机之间采用 GPRS 进行通信, 制定了相应的控制协议。实践证明, 所设计的 10 kV 配电网无功优化自动化控制系统使 10 kV 干线首端功率因数稳定在整定范围之内 (0.95 ~ 1.00), 且系统运行可靠。  
**关键词:** 无功优化; 配电网; 自动控制; 控制策略; GPRS

## Design of reactive power optimization automatic control system for 10 kV distribution systems

ZHOU Yun-cheng, PIAO Zai-lin, FU Li-si, LUO Yan

(College of Information and Electrical Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

**Abstract:** A set of reactive power optimization automatic control system based on the power factor and voltage is designed for distribution systems. As control parameter, the power factor is obtained from the service port which is provided by dispatching automation system through the TCP / IP protocol. The voltage parameter is gotten from potential transformer through the on-site lower level computer. The switching control strategy of compensator is proposed to increase rate of qualified voltage and meet the power factor standard of 10 kV circuit. This paper introduces the schema and design methods of upper computer control software in detail. In the meantime, the software is implemented to adopt the multithreading technology. This paper establishes the control protocol for the communication between upper computer and lower level computer, which is achieved by GPRS. Practice has proved that the head end power factor of 10 kV circuit is stabilized within a given range (0.95 - 1.00) through applying the foregoing control system, and the system runs reliably.

**Key words:** reactive power optimization; distribution network; automatic control; control strategy; GPRS

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)02-0125-06

## 0 引言

对配电网进行无功优化是改善电能质量、提高电压合格率、降低线损, 减少碳排放和提高供电企业利润的重要技术手段之一<sup>[1-2]</sup>。配电网无功补偿是利用静电电容器提供的容性无功抵偿电网中流动的感性无功, 从而提高功率因数, 达到无功优化的目的。无功优化研究比较成熟的是针对某一负荷断面而进行的静态无功优化方法研究, 国内外学者在补偿容量计算、补偿位置确定方面都开展了大量的研究<sup>[3-10]</sup>。由于配电网测量仪表有限, 利用统计学方法, 根据配电线路负荷分布、年无功负荷曲线和日负荷曲线确定无功补偿容量和补偿位置仍是目前普遍采用的方法。由于配电线路的负荷是随时间和季节变化的, 对配电网运行的补偿电容器完全采用静态补偿的策略, 可能存在着某一时间段无功

过补, 而另一时间段无功欠补的状况, 达不到无功优化, 提高功率因数的要求。针对这一状况, 国内有学者提出了基于统计的多时段无功优化方法, 分时段对补偿电容进行投切<sup>[1]</sup>, 这种方法在线路增容, 突发负荷变化方面的适应性较差。目前国内变电站调度自动化 (SCADA) 系统应用已十分普遍, 可利用 SCADA 系统提供的有限的线路运行参数和补偿电容器运行现场的电压来自动控制电容器的投切, 实现动态补偿<sup>[2]</sup>。本文重点在配电网无功优化自动化控制系统架构和软件设计方法上开展研究, 给出了系统设计框架。实践表明, 本文设计的自动控制系统可以达到无功优化的目的。

## 1 补偿电容器投切控制参量选择

馈线首端功率因数和电压合格率是 10 kV 配电网运行状况的重要考核指标, 馈线首端的功率因数

与线路有功负荷以及感性无功的大小、分布有关。根据文献[3]所述方法，计算无功补偿地点和补偿容量，并在相应位置安装选定容量的能实现自动投切的补偿电容器。根据线路运行状况——馈线首端功率因数和现场电压，动态控制补偿电容器的投切，以达到无功优化的目的。作为线路运行的重要参数，功率因数可通过从变电站 SCADA 系统中获取的有功功率和无功功率计算得来。为给控制电容器自动投切的控制器和执行机构供电，现场通过电压互感器从 10 kV 线路取得电压，再通过控制器运算可识别出电容器运行的现场电压。反映线路无功缺额或过补的线路首端无功功率是决定电容器投切的直接控制参量，但考虑到设备成本和线路上的电容器配置组合的限制，无功欠补或过补就立即进行电容器投切是不现实的，还应考虑有功功率的大小，即通过无功功率和功率因数共同控制电容器的投切。在无法取得线路首端参数或通信不畅的情况下，补偿设备也应当能良好地运行，此时控制器转入现场电压控制状态，由设定的电压整定上下限控制电容器的投切。因此本文选择 10 kV 线路首端无功功率、功率因数和现场电压作为控制电容器投切的参量。

## 2 无功优化自动化系统框架

处于无功优化自动化系统核心地位的是运行于

调度中心上位机起到补偿器综合协调远程投切控制的无功优化自动化控制系统。由于变电站每条馈线可能同时运行多台补偿器，这些补偿器之间相互独立，无信息交换，因此上位机无功优化自动化控制系统应根据线路运行状况，协调各补偿器的运行。

变电站调度自动化系统 (SCADA) 的应用已很普遍，可实时对变电站运行和变电站馈线出口参数进行监控。为了能与其他系统交互，为其他系统提供配网运行参数，各厂家的 SCADA 系统一般都会通过网络服务或 Web 服务的形式向外提供配网运行数据。无功优化自动化控制系统可通过遵从 SCADA 系统的应用协议通过 TCP/IP 网络获取到任意馈线的线路首端参数，结合各补偿器的运行状态综合控制补偿器的运行。

补偿器沿馈线分布，与上位机之间通信的通信系统采用通用无线分组业务 (General Packet Radio Service, GPRS)。GPRS 是通过在现有 GSM (全球移动通信) 网络中增加 GGSN (网关支持节点) 和 SGSN (服务支持节点) 来实现的<sup>[11]</sup>。通过 GPRS 数据终端单元 (DTU) 使补偿器无线接入 Internet，只要运行于上位机的无功优化自动化控制系统也同时接入 Internet，即可实现补偿器和上位机之间的无线通信<sup>[12]</sup>。

无功优化自动化系统框架如图 1 示。

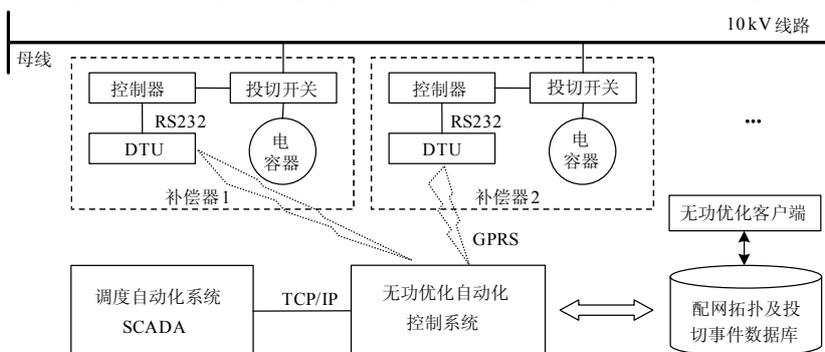


图 1 无功优化自动化系统框架

Fig. 1 Schema of reactive power optimization automation system

10 kV 配电网结构变化频繁，线路上的补偿器也会随着网络变化做出容量、位置和个数的合理调整，因此无功优化自动化控制系统应当是可配置、随变化做出动态调整的灵活系统。将配网拓扑结构信息、控制器信息、电容器信息、开关投切状态信息等记录于数据库中。系统启动时连接数据库，读取数据库中的相关信息，建立起控制逻辑。同时系统运行过程中，将补偿器实时上报的电容器投切状态记录于数据库中。无功优化客户端实时查询数据库，获取配网无功补偿状况和补偿容量，监控无功

优化自动化系统的运行。

## 3 投切控制策略

无功优化自动化控制系统与 SCADA 系统实时交互，获取各补偿线路首端参数 (有功功率  $P$ ，无功功率  $Q$ ) 并计算功率因数  $K$ 。然后分别对各线路  $P$ ， $Q$ ， $K$  进行检测，当检测到参数与所检线路制定的投切控制参量不符时，由上位机无功优化自动化控制系统向该线路上的补偿器发送投入或切除控制命令。

### 3.1 投入控制策略

当  $Q > 0$  时, 需要投入电容器抵偿无功。由于线路上电容器容量配置的限制, 无法做到  $Q > 0$  时立即投入电容器运行。因此, 还应判断  $K$  的取值, 当  $K$  小于当前线路设定的补偿下限 (如 0.95) 时, 选择当前线路上的特定电容器投入运行。电容器的选择策略是, 选择电容器容量  $C \leq Q$  且与  $Q$  值最接近的未投入电容器投入运行, 如有容量相同的电容器, 则选择靠近线路末端的电容器投入运行。

根据线路与电容器的拓扑关系, 对当前线路上的所有未投入的电容器按容量递减, 容量相同时按位置序号递减的顺序排序, 然后从表首开始查找, 找到第一个容量  $C \leq Q$  的电容器, 则选定该电容器投入运行。根据电容器和控制器的逻辑关系, 由上位机控制系统向远程控制器发送投入控制命令。由于  $C \leq Q$ , 当电容器投入后, 线路仍可能处于无功欠补的状态, 则无功优化自动化控制系统会在下一个检测周期里检测到该状态, 选取新的电容器投入运行。经过多个周期的检测和控制, 将使线路上的无功处于优化状态。

### 3.2 切除控制策略

当  $Q < 0$  时, 说明当前线路无功过补偿, 发生了无功倒送的情况, 需要选择已投入运行的电容器进行切除。电容器的选择策略是, 选择容量  $C \geq Q$  且与  $Q$  值最接近的已投入电容器进行切除。

对当前线路上的所有已投入电容器按容量递增, 容量相同时按位置序号递增的顺序排序, 然后从表首开始查找, 找到第一个容量  $C \geq Q$  的电容器, 则选定该电容器切除, 如因  $C > Q$ , 电容器切除后线路欠补, 则会在下一个检测周期内投入容量较小的电容器进行补偿。在查表的过程中如未找到  $C \geq Q$  的电容器, 则选择该表中容量最大的电容器予以切除。如电容器切除后线路仍然过补, 在下一个检测周期内, 控制系统会选择新的电容器切除。经过多个周期的检测和控制, 将使线路的功率因数达标且处于非过补状态。

### 3.3 控制器投切控制方式

为控制器设置电压整定上下限值, 上下限差值称为整定窗口, 当控制器检测到的现场电压高于整定上限时, 则切除电容器; 当现场电压低于整定下限时, 则将电容器投入。当上位机发来投入命令时, 将整定窗口向上平移, 使整定下限高于现场电压, 电容器投入; 当上位机发来切除命令时, 将整定窗口向下平移, 使整定上限低于现场电压, 电容器切除。反复多次将使整定窗口处于较为理想的状态。

控制器定期通过 GPRS 向位于上位机的控制系

统发送连接确认包, 如连续 3 次收不到上位机回复的确认包, 则认为通信异常, 控制器转为独立工作状态, 依赖最终的整定窗口独立控制电容器的投切, 直到上位机主动召唤控制器才转为受控状态。从而保证通信异常情况下, 补偿器仍能正常工作。如上下位机通信正常, 则控制器只有收到上位机的控制命令时才会控制电容器投切。

## 4 通信规约制定

位于调度中心上位机的无功优化自动化控制系统与远程控制器之间的通信需要遵循共同的规约。为降低系统运行成本 (GPRS 资费), 在保证系统良好运行的基础上, 数据包的大小和传递次数应选择合理。数据包应含义明确, 每个数据包的功能应该是自包含的, 即每个被正确传递的数据包能够完成独立的事件描述, 不需要请求新的数据包, 且每个数据包都应该是容易解析的。考虑系统的可扩展性, 通信规约也应支持系统的功能扩展。

根据系统的功能和远程控制的要求, 上、下位机之间需要传递的数据包类型应包括:

#### (1) 上、下位机通信连接确认

DTU 上电后, 上位机控制系统检测到各 DTU 登录, 为确定远程控制器是否工作良好, 上位机向远程控制器发送通信连接确认请求, 如收到控制器的通信连接确认, 说明上、下位机通信正常。同时, 下位机也定时向上位机发送通信连接确认请求, 如收到上位机的确认包, 说明通信正常。当下位机连续发 3 次连接确认均得不到上位机确认时, 则控制器视该状况为通信异常, 控制器将转为独立工作状态, 直至收到上位机连接确认。

#### (2) 投入或切除控制命令

当上位机做出投切控制决策后, 向指定的远程控制器发送投切控制命令数据包。上位机控制系统的用户也可根据网络运行状态手动向指定控制器发送投切命令。上位机发出控制命令后, 由于系统采用多线程异步执行模式, 且无法确定同一时间段内发出的多个控制命令会以何种顺序得到各控制器的反馈, 因此要求下位机的反馈数据包是带有状态的, 即包中含有被投切的电容器的新状态。

#### (3) 电容器运行状态参数请求与回复

上位机控制系统需获取各电容器运行状态、现场电压和控制器电压整定上下限等。当上位机发出运行状态参数请求后, 控制器会根据请求参数类型的不同, 将运行参数封装在数据包中发送给上位机。

根据以上分析, 且考虑数据包的完整性, 在包中增加校验码, 制定报文格式如图 2 (a)。

同步头防止系统处理非系统报文；包类型表示数据包的含义，如采用 0x80 表示通信连接确认，0x81 表示投切控制命令，0x82 表示上报电容器状态等；包长度表示整个数据包的长度；包内容是实际数据包装载的内容，可能是 0 长度，如图 2 (b) 中的连接确认数据包，也可能是多个字节。当一个控制器控制多个电容器时，包内容的第一个字节表示电容器编号，后续字节表示命令类型或参数值，如图 2 (c) 表示将控制器控制的第一个电容器投入，图 2 (d) 表示控制器控制的第一个电容器处于切除状态。校验码是为了验证数据包的完整性，可通过将校验码之外的所有字节求和并对 0xFF 求模得到。

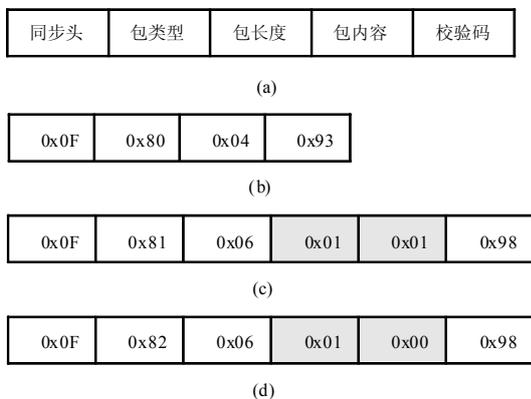


图 2 通信规约报文格式

Fig.2 Message format of communication protocol

## 5 自动控制软件设计

### 5.1 软件架构

控制系统对 SCADA 系统的数据请求与获取，以及与远程控制器之间的数据包交换均是异步发生的，因此系统采用模块化与多线程技术进行软件的架构。线程之间采用消息通信和共享缓冲区的方式进行同步。DTU 数据中心模块负责接收远程控制器

通过 DTU 传送到上位机的数据包，并向控制器发送各种控制报文。控制器代理模块根据报文的解析结果修改各控制器代理对象（模拟远程控制器）和电容器代理对象（模拟电容器）的运行状态，并将投切事件通过数据库读写代理写入数据库。线程 1 周期性（时间长度可通过系统调节）的通过 SCADA 数据请求与解析模块获取并解析各线路首端参数，并通过控制决策模块制定投切策略。控制决策模块做出投切决策后，通过向主线程发送消息的方式通知主线程进行投切动作，主线程通过分析消息参数判断要进行投切控制的控制器，然后选择相应的控制器代理将投切控制命令发送给报文组装模块。

自动控制系统软件架构如图 3 示。

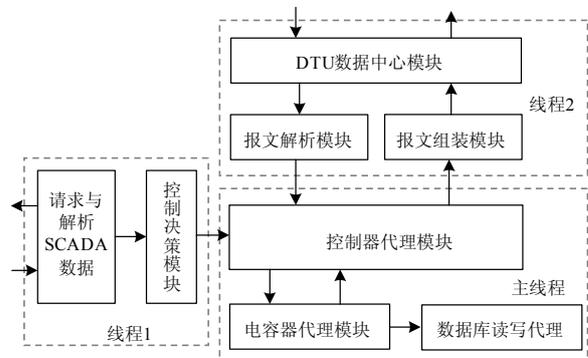


图 3 自动控制系统软件架构

Fig.3 Software architecture of automatic control system

### 5.2 控制实体及状态识别

控制器代理和电容器代理是实现系统控制逻辑的核心，是各种信息周转的中心。作为远程控制器和电容器在系统中的抽象，其模拟了下位机硬件的功能和运行状态。控制决策模块也需要根据各控制器代理和电容器代理来制定控制决策。控制实体及状态迁移如图 4 示。

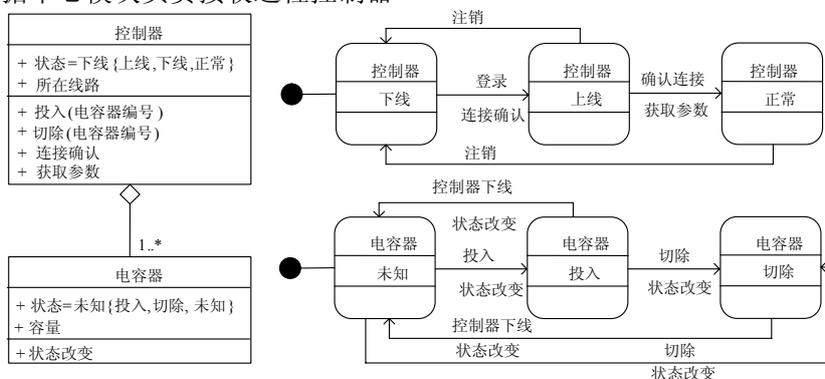


图 4 控制实体及状态迁移

Fig.4 Class diagram of core classes and state transition diagrams of control entities

### 5.3 软件实现

采用 Visual Studio 2008 作为开发工具,选择 C++ 作为程序设计语言,实现了无功优化自动化控制系统,如图 5 所示。经实验测试,系统能够按照设定周期从 SCADA 系统获取各补偿线路的首端运

行参数,并能根据设定的线路功率因数补偿下限制定补偿策略,控制补偿器运行。投切控制命令从发出到得到控制器响应时间较短,上、下位机通信正常,系统能够正确反映下位机各部件的运行状态。

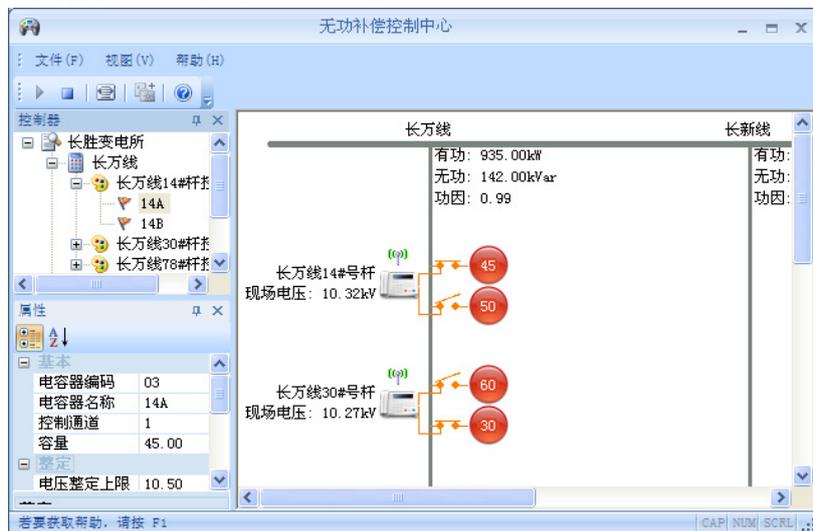


图 5 无功优化自动化控制系统运行截图

Fig.5 Running profile of reactive power optimization automatic control system

## 6 结束语

本文详细介绍了无功优化自动化系统的架构,提出了无功补偿的控制参量和控制策略,制定了上下位机通信的报文规约。通过采用模块化和多线程技术,给出了上位机无功优化自动化控制软件的整体架构,并采用面向对象的方法分析了核心控制对象的功能及其状态变化。采用 C++ 语言实现了无功优化自动化控制系统,系统运行稳定。2009 年 11 月 2 日至 2010 年 1 月 26 日,系统在赤峰市敖汉旗农电局的一个供电区进行了试运行。系统试运行期间,监测和控制正常,软件系统未发现报错和崩溃现象,硬件系统耐低温程度达到了设计要求。监测发现,被补偿线路的功率因数能够稳定在 0.95~1 之间,说明系统能够达到配电网无功优化的目的。不足之处是系统在辅助线路电容器容量优化配置上尚未开展工作,电容器综合投切控制策略上仍有改进空间,配电网无功优化效果仍可进一步提高。

### 参考文献

[1] 别朝红,周婷,王锡凡. 电力系统多时段无功优化研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(6): 698-702.  
BIE Zhao-hong, ZHOU Ting, WANG Xi-fan. Studies on reactive power optimization based on transition-optimized control strategy[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(6): 698-702.

[2] 赵美莲,赖业宁,刘海涛,等. 实时无功优化研究及其在线实现[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 79-83.  
ZHAO Mei-lian, LAI Ye-ning, LIU Hai-tao, et al. Study on real-time reactive power optimization and its on-line application [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 79-83.

[3] 轧超. 配电网无功补偿计算方法的研究[J]. 天津城市建设学院学报, 2009, 15(2): 152-155.  
YA Chao. The calculation method of reactive compensation for the distribution network[J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 2009, 15(2): 152-155.

[4] 史燕焜,熊华强. 基于伪并行遗传算法的配电网电容器优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 57-60.  
SHI Yan-kun, XIONG Hua-qiang. Optimal capacitor arrangement based on pseudo parallel genetic algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 57-60.

[5] 丘文千. 电力系统无功配置的综合优化方法[J]. 中国电力, 2008, 41(10): 10-14.  
QIU Wen-qian. Comprehensive optimization method for rational configuration of reactive power compensation of electric power systems[J]. Electric Power, 2008, 41(10): 10-14.

[6] 赵娜,张伏生,魏平,等. 基于改进多粒子群算法的电力系统无功优化[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40

- (4): 463-467.  
ZHAO Na, ZHANG Fu-sheng, WEI Ping, et al. Reactive power optimization based on improved poly-particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40 (4): 463-467.
- [7] 范宏, 韦化. 改进遗传算法在无功优化中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17 (1): 6-9.  
FAN Hong, WEI Hua. Application of improved genetic algorithm in reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2005, 17 (1): 6-9.
- [8] 潘珂, 韩学山, 孟祥星. 无功优化内点法中非线性方程组求解规律研究[J]. 电网技术, 2006, 30 (19): 59-65.  
PAN Ke, HAN Xue-shan, MENG Xiang-xing. Solution principles study of nonlinear correction equations in primal-dual interior point method for reactive power optimization [J]. Power System Technology, 2006, 30 (19): 59-65.
- [9] Zhang Wen, Liu Yu-tian. Multi-objective reactive power and voltage control based on fuzzy optimization strategy and fuzzy adaptive particle swarm[J]. Electric Power and Energy Systems, 2008, 30: 525-532.
- [10] Rahideh Akbar, Gitizadeh M, Rahideh Abbas. Fuzzy logic in real time voltage/reactive power control in FARS regional electric network[J]. Electric Power Systems Research, 2006, 76: 996-1002.
- [11] 林添顺. 基于GPRS的新型配电网自动化通信系统设计及实用性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (19): 44-47.  
LIN Tian-shun. A new kind of communication system based on GPRS for power distribution and analysis of its practicability[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (19): 44-77.
- [12] 郑琰, 焦坡, 张晶莹. 基于无线专网的配变实时监测管理系统[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (16): 96-98.  
ZHENG Yan, JIAO Po, ZHANG Jing-ying. Real-time monitoring management system of the distribution transformer based on wireless private network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (16): 96-98.

收稿日期: 2010-01-28; 修回日期: 2010-05-03

作者简介:

周云成 (1979-), 男, 博士研究生, 助教, 从事电力系统信息化研究; E-mail: zhouyc2002@163.com

朴在林 (1955-), 男, 本科, 教授, 从事电力系统及其自动化科研;

付立思 (1964-), 男, 博士, 教授, 从事职能控制系统与检测技术研究。

(上接第 107 页 continued from page 107)

- [7] Katiraei F, Iravani M R. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (4): 1821-1831.
- [8] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (7): 98-103.  
WANG Cheng-shan, XIAO Zhao-xia, WANG Shou-xiang. Synthetical control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (7): 98-103.
- [9] Li Q M, Liu H S, Zou L, et al. Impact research of inductive FCL on the rate of rise of recovery voltage with circuit breakers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23 (4): 1978-1985.
- [10] 赵彩虹, 田立军, 邹贵斌, 等. FCL对电力系统暂态稳定性影响的机理分析与仿真[J]. 电力自动化设备, 2001, 21 (2): 14-17.  
ZHAO Cai-hong, TIAN Li-jun, ZOU Gui-bin, et al. Mechanism analysis and simulation of FCL's influence on power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 21 (2): 14-17.
- [11] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微电网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24 (2): 100-107.  
WANG Cheng-shan, XIAO Zhao-xia, WANG Shou-xiang. Multiple feedback loop control scheme for inverters of the microsource in microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24 (2): 100-107.
- [12] Piagi P, Lasseter R H. Autonomous control of microgrids[C]. //Proceedings of Power Engineering Society General Meeting. Montreal(Canada): 2006: 18-22.
- [13] 鲁鸿毅, 何奔腾. 超级电容器在微型电网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (2): 87-91.  
LU Hong-yi, HE Ben-teng. Application of the super-capacitor in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (2): 87-91.

收稿日期: 2010-01-29

作者简介:

吕婷婷 (1985-), 女, 硕士生, 主要从事微电网控制方面的研究工作; E-mail: holyhappyrain@yahoo.com.cn

段玉兵 (1980-), 男, 博士生, 主要从事微电网潮流计算、故障分析等方面的研究工作;

龚宇雷 (1973-), 男, 博士生, 主要从事微电网、光伏发电技术方面的研究工作。