

# 智能配电网自愈控制系统技术研究与设计

秦红霞, 谭志海, 葛亮, 赵风青

(北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 对自愈、自愈能力、自愈控制、智能配电网自愈控制等智能配电网自愈控制系统相关的概念进行了介绍。围绕智能配电网自愈控制系统的目标和实现策略, 介绍了智能配电网自愈控制系统相关的关键技术, 分析了智能配电网自愈控制系统应具有的功能, 对智能配电网自愈控制系统的架构、接口和相关指标进行了设计。所设计开发的智能配电网自愈控制系统已经成功应用于示范工程现场。示范工程现场实际应用表明, 所设计开发的智能配电网自愈控制系统能够满足智能配电网自愈控制的实际需求。

**关键词:** 智能配电网; 自愈控制; 自愈控制系统架构; 自愈控制动作正确率

## Study and design of smart distribution grid self-healing control system technology

QIN Hong-xia, TAN Zhi-hai, GE Liang, ZHAO Feng-qing

(Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** The concepts of self-healing, self-healing capacity, self healing control, smart distributed grid self-healing control, etc in smart distribution grid control system are introduced. Around the goal and implementation strategy of the smart distribution grid self-healing control system, smart distribution grid self-healing control system related key technologies are introduced, the function analysis of smart distribution grid self-healing control system is achieved, and smart distribution grid self-healing control system architecture, interface and related indexes are designed. The smart distribution network self-healing control system developed according to the proposed design has been successfully applied to the demonstration project site. Practical application in demonstration project shows that the smart distribution grid self-healing control system developed according to the proposed design can meet the actual demand of smart distribution grid self-healing control.

This work is supported by National High-tech R&D Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A114).

**Key words:** distribution automation; self-healing control; self-healing control system architecture; operation accuracy of self-healing control

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)22-0134-06

## 0 引言

系统论中自愈定义为系统察觉自身状态, 并在无人干预的情况下, 进行适当调整以恢复常态的性质。自愈系统的关键在于能够从非健康状态恢复到健康状态。健康的本质是处于“有序稳定”状态, 保持健康的根本点在于建立和保持“有序稳定”状态的具体机制, 即“自愈”。自愈系统具有自身状态与外部环境监测、自身健康状态维持和从非健康状态恢复到健康状态的功能。自愈流程包括“信息采

集”、“状态诊断”、“方案决策”和“控制执行”4个步骤。电网自愈主要是对电网的运行状态进行实时评估, 采取预防性控制手段, 及时发现、快速诊断故障和消除故障隐患, 变被动的事故处理为主动的抑制事故发生。

自愈能力是自我预防和自我恢复(自我愈合)的能力。自愈控制具有两个显著特征:(1)预防控制为主要控制手段, 及时发现、诊断和消除故障隐患;(2)具有故障情况下维持系统连续运行的能力, 不造成系统的运行损失, 并通过自治修复功能从故障中恢复<sup>[1]</sup>。

自愈控制最早在美国的“复杂交互网络/系统计划”中提及。该项目由国防部牵头, 美国电科院,

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863计划)课题(2011AA05A114)

华盛顿大学等多家单位参与, 项目总经费 3 000 万美元。此外, 欧盟在第七框架计划 (The 7th framework programme) 的“能源”主题下支持了一系列以自愈为特征的智能电网技术研究。电网安全保障体系是国家安全防御体系的重要组成部分, 以自愈为特征的智能配电网是未来电网技术发展的必然趋势。电网自愈控制以不间断供电为控制原则。电网自愈控制的目标是: 首先避免故障发生; 其次, 如果故障发生, 故障后不失去负荷; 以故障后失去部分负荷为基本的控制底线; 如果发生了电网瘫痪事故, 意味着电网自愈控制失败<sup>[1]</sup>。

目前智能配电网自愈控制还没有统一的定义。我们认为, 自愈的智能配电网应该是, 在配电网的不同层次和区域内实施充分协调且技术经济优化的控制手段与策略, 使其具有自我感知、自我诊断、自我决策、自我恢复的能力, 四个“自我”形成闭环, 实现配电网在不同状态下的安全、可靠与经济运行。自愈的配电网可以做到在正常情况下预防事故发生, 实现运行状态优化; 在故障情况下可以快速切除故障, 同时实现自动负荷转供; 在外部停运情况下, 可以实现与外部电网解列, 孤岛运行, 并进行黑启动。发展自愈控制技术是解决我国配电网长期存在的设备利用率低、供电可靠性低、线损率高等问题的核心技术。

智能配电网的自愈控制通过应用先进的数学和控制理论, 建立起配电网在异常脆弱区、故障扰动区、检修维护区、正常运行区下的自动判别算法, 在稳定评价指标、电能质量评价指标、经济评价指标、兼容评价指标、用户服务评价指标体系下, 对配电网运行状态进行实时评估和隐患预测, 并执行相应区域的控制方案, 以实现配电网优化运行和自愈控制的目的, 达到安全可靠、经济高效、绿色环保、灵活互动和友好开发的供电要求<sup>[2]</sup>。

## 1 智能配电网自愈控制系统关键技术

### 1.1 分层分区协调的自愈控制技术

智能配电网自愈控制系统在不同层次、不同区域实施相应的协调自愈控制策略, 以使实现智能配电网的“自我感知”、“自我诊断”、“自我决策”和“自我恢复”, 达到智能配电网安全、稳定、优质和经济运行的目的<sup>[3]</sup>。

电网自愈控制“2-3-6”框架式电网自愈控制实现分布自制性、广域协调性、工况适应性的基础组织架构, 有密切联系的两环控制逻辑、三层控制结构、六个控制环节组成。

两环控制承认电网局部控制保护快速性与电网全局控制方案慢速性的矛盾, 研究全局控制方案与局部控制功能协调的方法。三层控制结构包括局部的反应层、高端的决策层、中间的协调层。通过协调层, 重点解决全局控制方案与局部保护控制之间的矛盾。六个控制环节是指在三层控制结构上, 沿信息流方向有采集量测、监视协调、工况评价、控制方案、部署协调、控制行动六个环节<sup>[4-6]</sup>。

在两环控制中局部控制即局部的保护快速控制, 也就是智能配网终端的就地控制, 也称为智能分布式就地保护控制。智能分布式就地保护控制在配网智能终端保护控制时不需要与配电主站或配电站的配合, 通过终端间相互通信、根据故障判断逻辑, 实现故障区域隔离, 非故障区域恢复供电, 并将处理过程及结果上报主站。智能分布式就地保护控制的技术特点为: (1) 故障定位与控制策略均由终端自身完成, 无需配电主站/子站参与协调与控制; (2) 故障信息和决策信息仅在相邻的终端之间传递, 对通信依赖相对较低; (3) 仅需要局部拓扑信息, 能够更好地适应线路变更; (4) 仅依靠局部信息恢复非故障区域供电, 协调控制能力不足。智能分布式就地保护控制通信结构如图 1 所示。

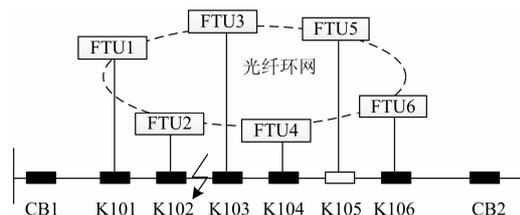


图 1 智能分布式就地保护控制通信结构图

Fig. 1 Intelligent distributed local protection communication structure

### 1.2 配电网快速仿真与模拟技术

配电网快速仿真与模拟技术 (Distribution Fast Simulation and Modeling, DFSM) 是实现配电网自愈的重要工具, 它能够实现的主要功能包括自适应保护、故障自动定位和排除、网络重构、自动电压和无功控制等, 仿真工具包括配电网状态评估、电网潮流优化、电网动态安全评估、负荷预测等, 建模工具包括网络拓扑分析、设备模型、负荷模型和发电模型<sup>[2,7-9]</sup>。

DFSM 在实时软件平台基础上, 应用数学分析工具箱先进的预测技术, 根据配电网物理结构、电网运行状态, 实现配电网的精确状态估计和实时优化运行, 预测配电网潜在事件, 并为系统运行人员

提供辅助决策建议和最优决策服务,从而实现配电网自愈<sup>[2,7-9]</sup>。

### 1.3 配电网自愈控制在智能分析与决策技术

基于预想事故的智能配电网自愈控制方案自动匹配技术,对于预想事故给出有效的控制与保护动作方案,形成典型预想事故处理方案(事故处理预案)。

基于预想事故的智能配电网自愈控制方案最佳匹配技术,智能配电网连锁故障演变的预防控制方法,智能配电网自愈控制的智能化学习技术。研究考虑多重分析结果的多目标智能决策技术。

### 1.4 智能配电网极端条件下关键负荷保障技术与大面积停电恢复技术

智能配电网内部严重故障被动解列技术,智能配电网外部严重故障主动解列技术,基于网络重构的智能配电网故障后局部供电恢复技术。极端条件下智能配电网关键负荷保障技术,包括基于微网的智能配电网关键负荷保障的主动解列技术及智能配电网故障解列时智能的负荷分配与功率平衡控制方法;极端条件下基于分布式电源的智能配电网孤岛划分和黑启动技术。

孤岛是指当电网的部分线路因故障或维修而停电时,由停电线路所连接的发电装置继续供电,并连通周围负载构成一个自我供电的孤岛的现象。根据分布式电源的容量、故障前的运行状态以及本地负荷的大小、本地负荷的重要性,有计划地规划孤岛,对于提高系统的黑启动能力,减小停电影响都有很重要的意义。孤岛划分的本质问题为网络重构问题,即寻求合理的解列点,确定孤岛的范围。

当配电网发生故障时,快速地根据故障前各个负荷的功率信息以及分布式电源的额定功率及其调节能力,使用孤岛划分算法确定合理的孤岛范围。孤岛内的分布式电源要有足够的容量并且具有较好的调节能力,以维持孤岛的安全稳定运行,保证孤岛内设备和线路处于安全状态。当主网运行状态恢复后,应根据电网的频率、电压的幅值和相位,实现主网和孤岛的同期并网。

黑启动即为电力系统在发生大面积停电事故后(不排除孤立系统的仍然运行),不依赖于别的网络的帮助,利用选定的黑启动电源(具有自启动能力的机组)带动无黑启动能力的电源(无自启动能力的机组),逐步扩大系统的恢复供电范围,最终恢复对于整个电网的供电。

近年来,随着分布式电源和微网在电力系统中的逐步应用,很多学者提出了微网黑启动的方法,即利用微网和分布式电源,实现将配电系统恢复分

为若干个小系统恢复再进行并网的“自下而上”的恢复策略。配电网的恢复可以分为两个方面:一是配电网的自启动,保障对重要负荷的供电,即将配电网分为若干个小系统,每个小系统里包含一个或一个以上的分布式电源,再利用分布式电源自启动,并适当地恢复对重要负荷的供电;二是配合大电网的恢复,主要表现在为大型机组提供备用电源,从而增加可用的黑启动电源,提高黑启动的成功率。即使黑启动失败也能通过解列操作保障对重要负荷的供电。

### 1.5 智能配电网故障隔离与网络重构技术

该技术是智能配电网非正常运行状态下自愈控制相关技术,立足于智能配电网非正常状态下故障恢复技术,实现配电网内部故障以及外部严重故障时的“自我恢复”。

相关技术包括:基于局部信息与保护原理实现的自愈控制故障隔离技术,基于全局信息与分布式智能控制实现的自愈控制故障隔离技术,含分布式电源、微网及储能装置的智能配电网自愈控制故障隔离技术。含分布式电源、微网与储能装置的智能配电网自愈控制网络重构技术,包括紧急状况下的环网解列技术与网络再组合技术。基于控制代价最小的智能配电网网络重构技术,基于保障关键负荷供电和最大供电恢复能力的智能配电网网络重构技术。智能配电网内部严重故障时被动解列技术,智能配电网外部严重故障时主动解列技术,基于网络重构的智能配电网故障后局部供电恢复技术,智能配电网基于网络重构的电压控制技术。

## 2 智能配电网自愈控制系统设计

### 2.1 智能配电网自愈控制系统功能

智能配电网自愈控制系统是智能型的、含分布式电源/储能/微网接入协调控制的高级配电自动化系统,是在数据采集与监控、分布式自愈控制、配电网分析与状态评估基础上,自动根据配电网状态自我主动调节的智能系统,以实现配电网的“自我感知,自我诊断,自我决策,自我恢复”为主要目的。智能配电网自愈控制系统主站功能层次如图 2 所示。

智能配电网自愈控制系统主站功能分为基础层、分析层、评估层和决策层 4 个层次。基础层是由分布式统一支撑平台和在其之上的配电网运行监控、分布式电源监控、配电网运行仿真等智能配电网基本应用组成;分析层由网络拓扑分析、状态估计、潮流计算、负荷转供分析、负荷预测等常用的配电网分析功能组成;评估层主要是在基础层和分

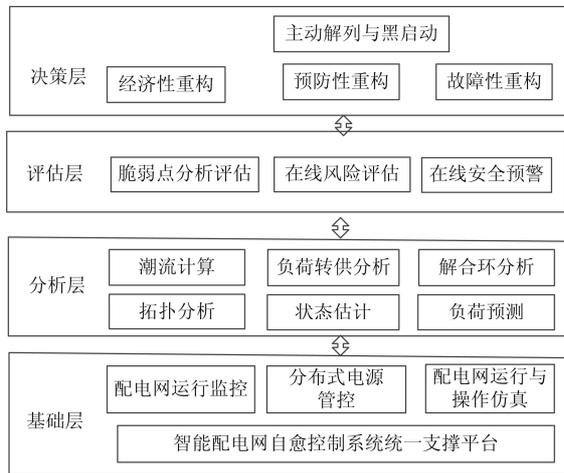


图2 智能配电网自愈控制系统主站功能层次图

Fig. 2 Function hierarchy diagram of smart distribution grid system master station

析层提供数据和基本功能调用的基础上,对配电网的运行风险进行评估和预警,对配电网的运行状态进行划分;在配电网运行状态划分的基础上,根据不同的运行状态进行相应的网络重构,形成智能配电网自愈控制系统的决策层。

智能配电网自愈控制系统在常规配网自动化功能基础上实现智能配电网在线运行状态评估划分、智能在线预警分析、风险评估和脆弱点评估,并根据不同运行状态计算相应的策略实现多种情况下的自愈控制策略;在线路负载越限或母线电压越限时进行预警性网络重构计算以实现预防控制、消除设备越限,使配电网自我恢复到正常运行状态;在配电网发生故障时,首先由配电终端的分布式就地自愈控制功能实现故障的快速诊断、定位、隔离和恢复,在终端隔离或恢复操作失败时智能配电网自愈控制系统主站启动故障性网络重构,自动实现故障后自愈控制策略,以达到故障后准确地进行故障定位、快速隔离和尽快恢复非故障停电区域供电的目的,提高供电可靠性;在配电网处于正常状态时,还可以通过经济性重构进行优化控制,保证电网安全运行的前提下,达到负荷均衡、网损最小、扩大配电网供电能力实现经济运行的目的;通过在线风险评估和脆弱点评估,能够实时监测电网的运行风险,为配电网状态检修提供决策依据;在配电网外部严重故障导致大面积停电情况下利用分布式电源进行配电网孤岛划分,通过分布式电源黑启动保证关键负荷供电,以达到关键负荷快速恢复供电的目的。

## 2.2 智能配电网自愈控制系统架构

整个智能配电网自愈控制系统由分布式自愈控制层、主站集中自愈控制两层通过网络通信组成,整个系统应按照实现智能配电网“自我感知、自我诊断、自我决策、自我恢复”的目标进行主站系统和分布式终端软件设计,其整体架构及部分应用模块间的逻辑联系如图3所示。

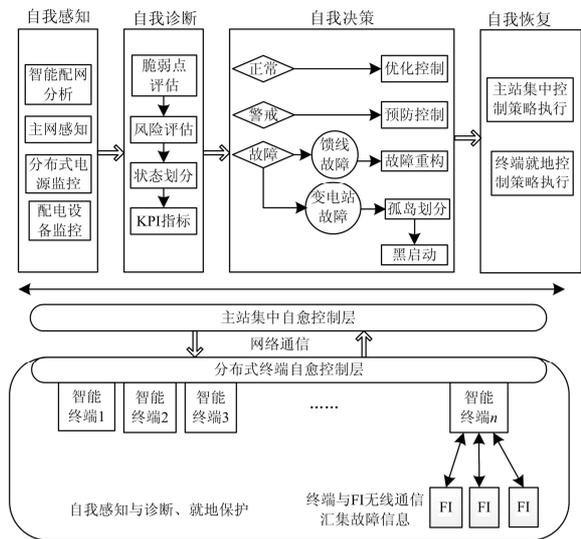


图3 智能配电网自愈控制系统分层架构示意图

Fig. 3 Layered architecture diagram of smart distribution grid self healing control system

## 2.3 智能配电网自愈控制系统接口设计

智能配电网自愈控制主站系统为实现对整个智能配电网的状态感知和分析,除需要从分布式配电网终端直接采集外,还需要从现有已建成的调度自动化系统 EMS 系统获取主网部分的高/中压配网模型和实时数据。在现有 EMS、配网自动化系统 DMS、配网 GIS、配电生产管理系统即生产 MIS、营销管理系统 CIS、配变采集与监测系统或计量自动化系统 AMR 等的基础上,按照 IEC61968、IEC61970 的标准,实现各个相关自动化系统及管理系统的最大程度的信息共享。通过配网 GIS 系统,共享 GIS 系统提供的配电网模型信息和地理信息,利用调度自动化 EMS 系统集成变电站 10 kV 出线开关状态和线路负荷数据、利用 AMR 计量自动化系统获得专变/公变负荷数据。

智能配电网自愈控制系统与相关系统的信息集成数据要求如图4。其中,与 EMS 系统的信息集成需要通过 EMS 系统实现站内 10 kV 出线开关的遥控功能智能配电网自愈控制系统需要的用户信

息、设备台帐信息、设备缺陷信息以及 GIS 图形信息接口连接配置图如图 5 所示。

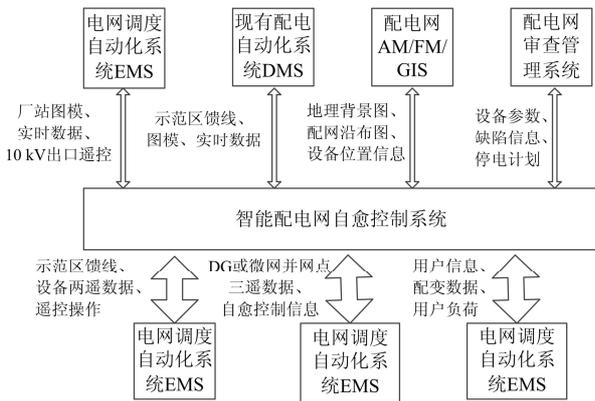


图 4 智能配电网自愈控制系统信息集成数据示意图

Fig. 4 Information integrated diagram of smart distribution grid self healing control system

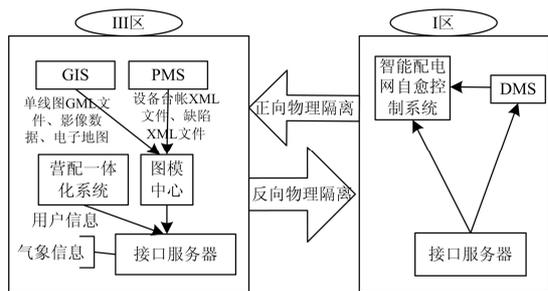


图 5 智能配电网自愈控制系统相关信息接口连接配置图

Fig. 5 Related information interface configuration diagram of smart distribution grid self healing control system

## 2.4 智能配电网自愈控制系统相关指标

与智能配电网自愈控制系统相关的指标如下。

### 2.4.1 自愈控制动作正确率

自愈控制动作准确率分由两部分组成。

#### 1) 故障自愈控制动作

故障自愈动作准确率的判断应该是从整个系统的角度进行判定，以系统最后的处理为准。分为几个层次：

终端正确动作，故障隔离或转供；

终端正确动作，故障隔离但并未正确或最优转供，主站控制，正确转供；

终端拒动或者误动，隔离范围扩大，故障隔离（或转供），主站控制成功；

终端拒动或者误动，隔离范围扩大，故障隔离（或转供），主站控制失败（主站给出 3 次控制方案，均未执行成功）。

#### 2) 预防控制动作

预防控制动作准确与否也是从系统角度进行判定，以系统预防控制前后的系统预防控制判定指标为依据，只要执行预防控制动作后将预防控制判定指标降低为正常值，就算预防控制动作准确。预防控制手段应当包括变压器有载调压、投切无功补偿装置、更改分布式电源的有功无功处理、改变开关状态等手段。

自愈控制动作正确率的计算公式。

故障自愈控制和预防控制都应用实际动作作为计算依据。因此，自愈控制动作准确率计算如下：

$$\text{故障自愈动作正确率} = \frac{\text{故障自愈动作正确次数}}{\text{故障自愈动作总次数}} \times 100\%$$

$$\text{预防控制动作正确率} = \frac{\text{预防控制动作正确次数}}{\text{预防控制动作总次数}} \times 100\%$$

自愈控制动作正确率=(故障自愈动作正确率+预防控制动作正确率)/2

### 2.4.2 供电故障自愈率

供电故障自愈率，其定义为在统计期（如一年）内故障自愈恢复的总用户数与受故障影响的总用户数的百分比值，即

$$\text{供电故障自愈率} = \frac{\sum (\text{每次故障自愈的用户数})}{\sum (\text{每次故障影响的用户数})} \times 100\%$$

### 2.4.3 用户平均自愈次数

用户平均自愈次数（次/户·年），它是每个用户在统计期（如一年）内遭受故障的平均自愈成功的次数，即

$$\text{用户平均自愈次数} = \frac{\sum (\text{每次故障自愈的用户数})}{\text{总用户数}}$$

## 3 结语

本文对智能配电网自愈控制系统相关的关键技术进行了研究，对智能配电网自愈控制系统的功能、整体架构、相关接口以及相关指标进行了设计。根据本文设计开发的智能配电网自愈控制系统已经成功运行于示范工程现场，现场实际运行情况表明，依据本文设计开发的智能配电网自愈控制系统能够满足智能配网自愈控制的实际需求，达到了预期的设计目标。

## 参考文献

[1] 郭志忠. 电网自愈控制方案[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 85-91.  
 GUO Zhi-zhong. Sheme of self-healing control frame of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 85-91.

[2] 马其燕, 秦立军. 智能配电网关键技术[J]. 现代电力, 2010, 27(2): 39-44.  
 MA Qi-yan, QIN Li-jun. Key technologies of smart

- distribution grid[J]. Modern Electric Power, 2010, 27(2): 39-44.
- [3] 董旭柱, 黄绍远, 陈柔伊, 等. 智能配电网自愈控制技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 17-21.  
DONG Xu-zhu, HUANG Shao-yuan, CHEN Rou-yi, et al. Self-healing control technology for smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 17-21.
- [4] 刘新东, 李伟华, 朱永, 等. 基于多代理技术的分布式电网自愈控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 116-120.  
LIU Xin-dong, LI Wei-hua, ZHU Yong, et al. Research on self-healing control of distributed networks based on multi-agent technology[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 116-120.
- [5] 陈铁军, 宁美凤. 基于分布式 MAS 的电网自愈控制方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 14-18.  
CHEN Tie-jun, NING Mei-feng. Study on self-healing control scheme of power grid based on distributed MAS[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 14-18.
- [6] 袁鹏, 郭创新, 王康元, 等. 调控一体下的配电网自愈研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 150-154.  
YUAN Peng, GUO Chuang-xin, WANG Kang-yuan, et al. Study of self-healing of distribution grid under the reulation & control integration mode[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22): 150-154.
- [7] 刘莉, 陈学峰, 翟登辉. 智能配电网故障恢复的现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 148-154.  
LIU Li, CHEN Xue-feng, ZHAI Deng-hui. Status and prospect of service restoration in smart distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 148-154.
- [8] 李天友, 徐丙垠. 智能配电网自愈功能与评价指标[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 105-108.  
LI Tian-you, XU Bing-yin. Self-healing and its benchmarking of smart distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 105-108.
- [9] IntelligentSM-distribution fast simulation & modeling engineering requirements: documents guideline[C] // EPRI, Palo Alto, CA: 2005.
- 
- 收稿日期: 2014-06-05
- 作者简介:  
秦红霞(1971-), 女, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化、电力系统保护与控制。E-mail: qinhx@sf-auto.com