

学校代号: 10532

学 号: S11092001

密 级:

湖南大学硕士学位论文

大型工业企业电网自愈控制的重构方法研究

学位申请人姓名: 凌理远

导师姓名及职称: 黄纯 教授

培 养 单 位: 电气与信息工程学院

专 业 名 称: 电气工程

论 文 提 交 日 期: 2014 年 5 月 8 日

论 文 答 辩 日 期: 2014 年 5 月 20 日

答辩委员会主席: 李欣然 教授



Research on reconfiguration method of self-healing control system

on large-scale industrial enterprise grid

by

LING Liyuan

B.E. (Shandong University of Technology) 2011

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Electrical Engineering

in the

Graduate School

of

Hunan University

Supervisor

Professor HUANG Chun

May, 2014

湖南大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：凌理定 日期：2014 年 5 月 29 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

- 1、保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本授权书。
- 2、不保密 ☒。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：凌理定

日期：2014 年 5 月 29 日

导师签名：黄旭

日期：2014 年 5 月 29 日

摘要

大型工业企业是我国国民经济的顶梁柱，其耗电量大，生产工艺和设备对供电可靠性的要求高，企业内部电网的安全经济运行至关重要。自愈控制技术在电网正常运行时优化网络结构，提高安全稳定裕度，降低网损，在故障发生后迅速隔离故障和恢复供电，是大型工业企业电网安全稳定、经济高效运行的重要技术保障。本文围绕大型工业企业电网自愈控制技术中网络重构等问题进行深入研究。

首先，介绍了自愈控制的基本内容，讨论了自愈控制的原则、实现条件和方式，研究了电网不同运行状态下自愈控制的目标和策略，分析了自愈控制中网络重构技术，构建了大型工业企业自愈控制技术框架。

其次，针对大型工业企业电网经济性网络重构，提出了基于多榜样系统的粒子群算法。采用多榜样系统和调整速度惯性系数的方法来处理早熟问题，利用多中心的粒子更新系统，增大搜索范围，增强了抗早熟的能力，降低陷入局部最优解的风险；在粒子更新中采用环网编码方式和电力孤岛搜索方式避免大量不可行解产生。

再次，针对大型工业企业电网故障性网络重构，提出了配电网故障后多线路恢复供电的负荷分配方法。通过电压电流安全约束得到临界负荷分配比，以非失电区网损最小为目标得到极值负荷分配比，将两者结合考虑给出最佳负荷分配，再根据实际网络结构找出与最佳负荷分配最接近的分配方案，调整负荷分配，做出实际负荷分配方案；通过潮流计算验证方案是否满足安全经济要求，从而确定合理有效的负荷分配方案，划分失电区域，完成网络故障重构；该方案既满足了快速供电恢复的要求，同时也实现了供电恢复后配网的安全经济运行。

最后，以首钢京唐钢铁企业电网中 5 个 110kV 区域变电站及其以下 10kV 车间变电所作为仿真算例，利用基于多榜样系统粒子群的经济性重构算法优化电网运行方式，有效降低了网络损耗。以 1 号 110kV 区域变电站 10kV 侧 1 段丢失电源为例，利用基于故障后多线路恢复供电的负荷分配方法对非故障失电区恢复供电，快速有效地为运行调度人员提供最佳网络重构决策方案。

关键词：大型工业企业电网；自愈控制；网络重构；供电恢复

Abstract

Large-scale industrial enterprises play a highly important role in the national economy. For their large power consumption, rising production levels, and equipment requirements for stable grid operation, the safe and economic operation is critical in internal grid of enterprise grid. Self-healing control technology could optimize the network structure in normal operation of the power grid, improve security and stability margin, reduce network loss, quickly isolate the power fault and restore service after a fault occurs in power network. Self-healing control technology become an important safeguard for secure, economic, stable and efficient operation of the grid. This paper focuses on network reconfiguration method of self-healing control on large-scale industrial enterprise grid.

Firstly, this paper introduces the basic content of the self-healing control, discusses the principle, the conditions and modes of self-healing control, studies the objectives and strategies of self-healing power grid control in different operating conditions, and constructs the framework of self-healing control system in large industrial enterprise grid.

Secondly, for economic network reconfiguration of self-healing control on large-scale industrial enterprise grid, the particle swarm optimization algorithm based on multi-model system is proposed. The advanced algorithm adopt multi-model system and adjust the speed inertia coefficient to solve the problem of precocity. It generated multi-center particle update system to expand the search range, enhance the anti-premature ability, and reduce the risk of falling into local optimal solution. Ring network coding method and power isolated island research pattern used in particle update can solve the problem that infeasible solutions generated.

Thirdly, for fault network reconfiguration of self-healing control on large-scale industrial enterprise grid, multi-line service restoration of distribution network after power failure algorithm based on load distribution is proposed. The algorithm of failure recovery calculate extreme load distribution ratio for the objective of loss minimization in non-lost electric area, and critical load distribution ratio for the the voltage and current security constraints. From a combination of the two load distribution, optimal load distribution ratio can be obtained. Then, based on actual network structure, the actual load distribution, mostly closest to the optimal load

distribution, can be found. Power flow calculation can be used to test whether the scheme satisfies the requirement of safe and economic or not. The reasonable and effective load distribution scheme that dividing lost electricity area and completing network fault reconstruction, can be obtained. The algorithm meets not only the requirements of fast power recovery operation, but also the request that distribution network can be in economic and secure operation.

Finally, based on the five 110kV regional substation and the following 10kV grid workshop substation in Shougang Jingtang iron & steel company as a research object, the network reconfiguration is proceeded by particle swarm algorithm based on multiple model system to optimize power grid operation. The method effectively avoids network loss. Based on bus 1 lost power supply on 10kV side of 1#110kV area substation as a research object, the network reconfiguration is proceeded by multi-line service restoration of distribution network after power failure algorithm based on load distribution for service restoration of failure power area. The method provides the best network reconfiguration decision-making scheme quickly and efficiently for dispatch and operation staff.

Keywords: Large-scale industrial enterprise grid; Self-healing control; Network reconfiguration; Power recovery

目录

学位论文原创性声明与学位论文授权使用授权书	I
摘要	II
Abstract	III
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 大型工业企业电网特点	2
1.3 自愈控制方法的研究现状	3
1.4 本文主要研究内容	4
第 2 章 自愈控制技术框架	6
2.1 引言	6
2.2 自愈控制内容及目标	6
2.3 自愈控制条件	7
2.4 自愈控制实现方式	8
2.5 自愈控制体系中的网络重构技术	9
2.6 本章小结	10
第 3 章 配电网经济性网络重构方法	11
3.1 引言	11
3.2 经济性重构的算法介绍	11
3.2.1 启发式方法	11
3.2.2 人工智能算法	12
3.3 潮流计算和辐射状判断	13
3.3.1 潮流计算	13
3.3.2 辐射状判断	14
3.4 粒子群算法的基本原理	15
3.5 基本粒子群算法的改进方法	16
3.5.1 基本粒子群算法的问题与改进	16
3.5.2 粒子编码方式	17
3.5.3 多榜样系统	18
3.5.4 速度惯性系数	18
3.6 数学模型	19
3.6.1 目标函数	19

3.6.2 约束条件	19
3.7 算法流程	20
3.8 算例分析	21
3.9 本章小结	22
第 4 章 配电网故障性网络重构方法	24
4.1 引言	24
4.2 故障性网络重构的基本原理与方法介绍	24
4.2.1 数学优化方法	25
4.2.2 启发式方法	25
4.2.3 人工智能方法及其混合算法	25
4.3 故障重构的常用数学模型	27
4.3.1 目标函数的数学模型	27
4.3.2 常用的约束条件	29
4.4 配电网故障后多线路恢复供电的负荷分配方法原理	29
4.4.1 临界负荷分配比的计算规则	31
4.4.2 极值负荷分配比的计算规则	33
4.4.2.1 网损增量的近似计算	33
4.4.2.2 极值负荷分配比	33
4.4.3 最佳负荷分配比的调整规则	35
4.5 配电网故障恢复流程	36
4.6 算例分析	37
4.7 本章小结	39
第 5 章 大型工业企业电网网络重构的应用研究	40
5.1 引言	40
5.2 首钢京唐钢铁企业的电网结构	40
5.3 首钢京唐钢铁企业电网部分区域拓扑结构	41
5.4 基于首钢京唐钢铁企业电网经济性重构的仿真算例	43
5.5 基于首钢京唐钢铁企业电网故障性重构的仿真算例	44
5.6 本章小结	50
结论与展望	51
参考文献	53
致谢	57
附录 A 攻读学位期间发表的学术论文目录	58

第 1 章 绪论

1.1 引言

随着中国经济的高速增长，能源短缺问题日益凸显，节能任务艰巨。工业企业作为中国能源消耗大户，其用电量占社会总用电量的 85%，其中比重较大的有冶金、化工、电力、有色、建材等高耗能企业，发展低碳经济、建设生态文明、实现可持续发展，成为人类社会的普遍共识，大型工业电网作为能源供应的重要环节，其降损节能对于工业企业高效利用能源起到至关重要的作用；同时，许多大型工业企业如钢铁企业，对电力的供应非常敏感，一旦失电，设备不能正常工作，引起巨大甚至永久性损坏，更严重将造成重大安全事故，带来人员伤亡和巨大经济损失，电网安全可靠运行对工业生产安全有序进行提供重要保障。因此，大型工业企业电网安全经济的运行是大型工业企业可靠高效生产的重要基础。

配电网^[1]是电力系统对用户供电的重要组成部分，配电网的智能化对于提高供电可靠性、电网运行效率与用户供电电能质量起到重要作用。智能配电网优化配电资产运行、构建良好的电力维护与信息管理系统，支撑分布式发电、微网的并网等多种新型供电形式，较传统配电网更加坚强有力，可以有效抵御自然灾害、外力破坏、操作失误等突发事件给电力系统造成的影响，具有强大的自愈功能。

作为智能配电网的“免疫系统”、智能配电网最重要的特征——自愈，受到科研工作者的重视，其内涵是实现电网安全稳定运行和可靠供电，实时监测电网运行状态，快速诊断和消除故障隐患，隔离故障，恢复供电，避免大区域停电，它可无需或较少的人工干预。

智能配电网自愈控制^[2]有以下几个特征，(1) 具有在配网各个层次和区域内充分协调、经济优化的控制手段；(2) 具有自我感知、诊断、决策、恢复能力；(3) 实现配电网在不同状态下的安全可靠经济运行，在电网正常运行时的优化与预警，故障情况下的故障诊断、网络重构与供电恢复，极端情况下与主网解列，同时依靠分布式电源以及储能装置短时孤网运行。

配电网自愈控制的目的是要保证不间断供电，依托先进的测量技术、通信手段，共享电网运行参数的数据信息，实时采集与检测电网各个节点支路电气量数据与故障信息，搜索和预测可能存在的各种安全隐患与风险，能对发生故障区域进行及时切除，快速可靠地对失电区恢复供电。

总之，配电网自愈控制系统必须能够在配电网正常运行时有选择性、有目的地采取优化控制策略，提高电网安全稳定裕度和抗扰动的能力，改善电网运行状

态；在非正常运行情况下采取预防校正控制策略，及时发现、诊断和消除故障隐患；而在故障运行情况下对电网采取紧急恢复、检修维护等控制策略，使失电区快速恢复供电运行的能力，故障后重构不失去或者失去尽量少的负荷，保持连续供电。

1.2 大型工业企业电网特点

大型工业企业配电网^[3]由配电设备(馈线、变压器、断路器、开关)和继电保护装置、测量仪表以及通信控制设备构成,持续可靠地对各厂区用电设备供电。配电网在网络拓扑结构、线路参数、负荷功率以及各种配电装置设备、通信保护装置、控制手段等方面,都具有一定特征。工业企业配电网闭环设计,开环运行,线路结构复杂,负荷设备多,并带有一定的冲击性负荷,线路上存在许多分段开关和联络开关,输电线路距离相对常规城市电网较短,网络联系比较紧密;开关设备和终端设备具有一定的智能化和信息化水平,对用电设备运行、开关位置状态、变压器实际负荷量具有远程监控能力,开关断路器具有远程控制能力,由调度中心统一监控管理。

大型工业企业电网存在以下几个特点:

(1) 大型工业企业电网层次结构分明,呈放射状,一般由一个区域变电站对多个车间变电所供电,输电距离短,负荷集中,区域变电站间存在联络线,车间变电所存在两条或多条电源进线,存在多种供电形式,供电可靠性比较高,一般满足 N-1 规则,即车间变电所失去一条电源进线仍能保持供电;而常规城市配网中负荷分布分散,输电距离长,负荷一般单回路供电或双端供电,供电可靠性相对较低,结构变化形式相对较少。

(2) 大型工业企业电网为了节省用电成本,减轻电网输电压力,常常拥有自备电厂以及余热、余压等中小型发电机,企业内部存在有电源,比如钢铁企业中存在干熄焦发电、海淡前置发电等,而常规配电网一般是无分布式电源,故大型工业企业智能电网的控制与保护相对复杂,运行方式更加灵活。

(3) 大型工业企业电网的工业负荷具有非线性、冲击性、间歇性等特点,生产过程中冲击性负荷对电网产生很大影响;常规配电网也带有一定的工业负荷,但比较分散,冲击性负荷对整个电网的影响很小,一般忽略不计。

(4) 大型工业企业常拥有大量精密重要用电设备与仪器,对电能质量与供电可靠性的要求高。电网电压水平、系统频率波动、电压电流波形变化以及电压暂降都有可能对生产产品质量以及人员设备安全产生巨大影响;而一般常规配电网中用户对电能质量要求相对较低。

大型工业企业电网调度、运行与控制以及保护策略与常规电力系统配电网大

体相同，大型工业企业电网的智能化电气设备是大型工业企业智能电网的基础，增强了电网的能观性和能控性，实现大型工业企业电网的自愈控制手段。

(1) 智能开关：智能开关是微处理器技术、电力电子开关技术、传感器技术和通信技术的结合。智能开关技术，可以延长设备使用寿命、提高供电可靠性，并能在一定程度上节约电能，降低操作成本，减少人为操作失误，增强复杂配网重构的可操作性，是实现自愈控制技术的重要手段。

(2) 储能装置：储能装置可以抑制电网功率波动，提高电网运行的稳定性。特别在供电线路故障情况下可以提供短时供电，并自动切换到备用供电线路重新供电，削弱故障对用户供电的影响，大幅提高供电可靠性，保证安全生产。

(3) 电源相互支撑：大型工业企业的生产工艺对供电可靠性和电能质量提出更高要求。对于重要工业负荷，短时间停电或者几个周波的电压暂降都有可能导导致生产线的瘫痪，造成安全事故，给企业带来重大损失。采用多电源多线路对重要负荷供电，安装设置变电所间的联络线，增强电网的供电能力，保证对负荷可靠供电。

1.3 自愈控制方法的研究现状

现如今，各国根据自身的国情对智能电网建设有着不同的重点和目标。美国作为率先倡导智能电网建设的大国，提出智能电网应具有自愈、安全、集成、协同、预测、优化、交互功能，重点关注电网建设的可靠性、经济运行与效益成本以及相关技术支撑，其中自愈电网是美国电网建设的重点。欧盟将智能电网描述为能支持分布式和可再生能源的接入，具有更可靠安全电力供应，面向服务的架构体系，具有分布式智能终端以及高级自动化系统；重点关注电网建设对市场、能源以及环境方面要求，以分布式电网为建设重点。中国在智能电网建设中密切结合中国基本国情，提出了建设具有中国特色的智能电网，其内涵包括坚强可靠、经济高效、清洁环保、灵活互动、友好开放。尽管各国对智能电网发展与建设有着不同的观点与期望，但智能电网建设都以市场、安全、电能质量和环境因素作为重要考量指标，内涵丰富，包含自愈、兼容、优化、集成、环保、友好等特征。

自愈是配电网智能化的核心^[4]，包含配电网的自我预防、自我恢复的能力，它以保障不间断供电为核心目标，基于对电网重要参数的监测和有效的控制策略，及时检测出发生的故障并进行控制操作，将故障对系统的影响降低到最小。电网自愈恢复是指在电网经受扰动或故障时，自动进行故障隔离，并对非故障失电负荷恢复供电等操作。

自愈的概念是对传统继电保护与安全自动装置技术的延伸和发展，最终目标是为用户提供持续的理想电能，其内涵不断丰富与发展。自愈技术的研发与应用，

对于建设智能电网，提高大型工业企业电网的智能化水平，提高大型工业企业电网供电的可靠性和稳定性具有十分重要的意义。

智能配电网自愈控制^[5]是涵盖了继电保护、自动控制、应用数学、计算机和软件等领域的多种新技术和成果，是一种综合控制技术，包括先进算法的软件系统、坚强灵活的网络构架、分布式智能终端设备、大容量信息处理的指挥调度机制。

自愈控制的重要方法之一便是网络重构，在电网正常运行状态下通过网络重构，实现系统负荷平衡，降低系统网络损耗，提高节点电压水平，提高供电可靠性的目标，这属于经济性网络重构的范畴；在电网发生故障后，通过网络重构，实现对失电区的恢复供电，这属于故障性网络重构的范畴。

重构目标有：配电网有功损耗最小；平衡馈线负荷，消除线路过载；改善电压分布，提高节点电压水平；以运行成本最小等经济性指标为目的，最小化系统能量损耗；提高供电可靠性，减少失负荷的容量和概率；以故障情况下尽快切除故障和恢复供电为目的，最大限度的恢复停电区域的供电，同时不引起非故障区域过负荷；开关动作次数少，操作上简单方便；

网络重构模型约束条件：配网潮流约束；配网辐射状拓扑结构约束，不能存在孤立节点或孤立子网；配网各支路电流必须满足其功率上限约束；配网各节点电压必须满足电压上下限约束；供电约束：分布式电源容量约束与变压器容量约束；与继电保护及可靠性指标等的协调。

1.4 本文主要研究内容

基于以上分析，结合国内外研究成果，根据经济性网络重构和故障性网络重构的自愈控制方法，结合大型工业企业电网的特点，本文主要研究内容如下：

(1) 自愈控制系统框架

首先，阐述了自愈控制的基本内容，介绍了配电网自愈控制的原则，自愈控制实现的技术、条件，和实现方式等，分析了自愈控制体系中网络重构技术的内涵与目标，其中包括经济性网络重构、故障性网络重构、预防性网络重构。

(2) 配电网经济性网络重构方法

首先，阐述了配电网经济性重构的基本算法与原理，介绍了经济性重构需要的潮流计算与网络辐射状判断的模块；然后，重点分析运用粒子群算法进行配电网经济性重构时存在两个问题：“早熟”和粒子更新中产生大量不可解的现象，采用多榜样系统和调整速度惯性系数的方法来处理早熟现象，采用环网编码方式和电力孤岛搜索方式更新粒子位置避免大量不可行解产生；最后，用 IEEE33 节点仿真算例验证其可行性和有效性。

(3) 配电网故障性网络重构方法

首先, 讨论配网故障性重构的自愈控制方法, 阐述了故障性重构的基本原理方法, 并介绍了故障性重构的目标函数与约束条件; 然后, 针对故障后非故障失电区多线路恢复供电的问题提出一种可行的快速决策方案, 提出了临界负荷分配比、极值负荷分配比, 最佳负荷分配概念, 根据实际网络结构找出与最佳负荷分配最相近的分配方案, 做出实际负荷分配方案, 确定合理有效的负荷分配方案, 划分失电区域, 完成网络故障重构; 方案既满足了快速供电恢复的要求, 同时实现供电恢复后配网的运行, 算法快速简单有效; 最后, 通过 IEEE33 节点仿真算例验证了其可行性和有效性。

(4) 大型工业企业电网网络重构的应用研究

简要介绍了首钢京唐钢铁企业电网架构情况, 对首钢京唐钢铁企业电网中 5 个 110kV 区域变电站及其以下 10kV 车间变电所拓扑结构进行分析, 网络拓扑结构包括 127 节点与 184 支路, 将其作为仿真研究算例, 进行经济性重构和故障性重构的自愈控制方法应用研究。一方面, 利用基于多榜样系统的粒子群算法进行经济性重构, 有效避免产生大量不可行解和陷入局部最优解的现象, 提高算法的效率, 优化电网运行, 验证其算法对大型企业电网经济性重构的有效性。另一方面, 对首钢京唐钢铁企业电网 1#110kV 区域变电站 10kV 侧 1 段丢失电源为研究对象, 对非故障失电区恢复供电, 提供多种恢复供电方案, 结合网损增幅、电压水平、开关操作次数分析其优劣, 确定出最优和备选方案供运行调度人员参考, 仿真验证算法快速有效。

第2章 自愈控制技术框架

2.1 引言

自愈是指电网在正常运行情况下能够在线状态评估和状态优化，在异常情况或故障情况下能够自行检测、自行隔离和快速恢复，尽量减少人工干预，最大限度地减少甚至避免故障或异常状态对系统的影响，保持系统持续处在正常状态，以及优化至最佳运行状态。自愈控制是利用在线监测、实时通信、信息处理、远程控制等先进手段实现实时信息采集与监视、快速分析评估系统运行状态，诊断故障隐患、预测故障风险，在正常运行状态下的采取优化控制优化系统运行，在脆弱状态下采取预防控制消除故障隐患、在故障发生状态下采取紧急控制切除故障，减少故障波及范围，在故障切除后采取恢复控制对非故障失电区快速恢复供电，缩小停电范围，增强电网抗风险能力。

2.2 自愈控制内容及目标

自愈控制以保证对用户的持续可靠安全供电为基本原则，其控制目标为：首先，在正常运行状态或异常但未发生故障的情况下优化电网的运行状态，增强电网抗扰动能力，避免故障的发生；其次，若电网已经发生故障，则应快速切除故障，应避免引发更大的故障，损失更多的负荷；最后，在电网切除故障后对失电的负荷点尽可能快的恢复正常供电。

智能配电网自愈控制以传统配电自动化技术为基础，凭借智能配电网先进的量测通信体系，在系统的可观性、可控性、智能化及快速响应方面得到极大改善。

自愈控制通常将电力系统运行状态划分成五种：优化状态，正常状态，脆弱状态，故障状态和故障后状态。

- (1) 优化状态：是具有比正常运行状态更加安全可靠优质经济的运行状态；
- (2) 正常状态：是指系统保持合理安全正常的供电状态；
- (3) 脆弱状态：指系统某些节点电压支路电流以及各种电力参数出现越限或不合理状态，此时系统仍保持供电，但存在故障风险的运行状态；
- (4) 故障状态：系统正在发生故障时的瞬时状态；
- (5) 故障后状态：故障发生后系统重新达到的一种新的平衡状态。包括有失电区恢复供电的状态；丢失部分负荷系统运行状态；电网瘫痪状态甚至电网解列极端恶化状态。

针对配电系统的不同运行状态，自愈控制的目标与控制策略完全不同，自愈

控制包括以下几个方面：

(1) 优化控制。在系统正常状态下优化电网运行；此时自愈控制的目标是使电网经济高效供电，降低系统网络损耗，提高电压水平，均衡负荷，提高设备资产利用率；优化控制包含经济性网络重构内容。

(2) 预防控制。即电网在脆弱状态下，如支路电流过载，节点电压越限，电网出现了不稳定的特征情况下，采取预防性自愈控制，使之恢复到正常情况；此时自愈控制目标是避免故障的发生，保证系统安全可靠供电。

(3) 紧急控制。即电网发生故障，如何快速进行故障定位，并准确切除故障；此时自愈控制目标是快速切除故障，减小故障波及范围，避免发生电网瘫痪和电网解列。

(4) 恢复控制。当电网发生故障并切除故障后，快速对非故障失电区恢复供电，此时自愈控制目标是快速对失电区负荷最大限度恢复供电，缩短停电时间。恢复控制包含故障网络重构内容。

总之，配电网自愈控制以连续供电、保证电能质量、保证电网安全稳定运行为原则。通过优化控制、预防控制、紧急控制、恢复控制，有效地在正常运行时优化电网运行；脆弱状态下恢复正常情况，避免故障发生；发生故障时快速切除故障；对失电区快速恢复供电；保证供电可靠性。

2.3 自愈控制条件

(1) 开关设备及终端设备的智能化和信息化

智能配电网应具有强大的系统信息数据观测能力与对系统元件的远程控制能力，增强电力设备参数、电网运行状态以及分布式能源的监测、控制与管理能力是提高系统能观性与能控性的重要手段，传感与量测技术、设备的智能化和信息化是提高系统性能、在线监控的基本条件。其中，智能传感器具有信息采集、处理、传输、逻辑判断等功能，为自愈配电网的发展提供了敏锐的“神经末梢”，实现对电力设备实时状态监测，具有高性价比、良好工程维护性、电磁兼容性、智能数据交换接口等特点；智能配电网的发展趋势将使系统各个部分与节点遍及状态监测设备，对电网运行实时全方位实时监控，精确、直观地展现电网当前的运行状态。实时监测、控制和管理分布式智能终端，在线风险评估与对预测故障，建立预警机制。实现远程定时抄表，存储历史数据、自行完成报表，提高管理运行水平。

(2) 灵活多样的网络拓扑结构

物理结构是配电网运行的物理基础，适应多种复杂情况的运行，特别是在故障后的自愈控制运行都必须依靠灵活的网络拓扑和坚强的物理结构。网架结构具

备双端供电、多联络线支撑、兼容多种新能源接入等特点才能保证系统能够在正常运行时持续优化、在故障发生后实现快速恢复重构等高级灵活的自愈控制功能。在大型工业企业电网中，许多负荷点都采用双电源供电，双线路供电，变电站间存在多条联络开关，变电站中高压有双母线运行，低压有单母线分段运行，运行方式多样，线路连接多样，这是实现自愈控制的物理基础。

(3) 可靠的通信网络及强大的信息处理能力

利用全球定位系统提供的精确时间，同步相量测量技术对电力系统进行同步相量测量、同步时钟、运行参数实时监视、数据实时存储传输，实现系统各节点电气量与状态信息的同步测量，通过高速通信网络把测量相量传送到系统主站，为配电网的实时状态监测、运行参数分析和设备运行控制提供基础信息。现有调度监测系统 SCADA 不能监测辨识电力系统动态行为，而同步相量测量技术实现广域电网运行状态的实时同步测量，为传统系统状态估计提供丰富数据，增强系统能观性，为电力系统稳定性提供有力技术支撑。随着智能配电网的发展，实时相角测量系统为控制与保护系统等装置设备提供很好的数据支撑。智能化系统管理主站拥有分析、计算、评估与预警等功能，具有实时通信系统，终端设备的遥信、遥测、遥控和遥调等“四遥”功能。现有的 WAMS(广域测量系统)和 SCADA(数据采集与监控系统)系统是实现大型工业企业电网自愈控制的重要条件。

2.4 自愈控制实现方式

(1) 系统主站集中控制方式

在配电网正常运行时，通过配电终端实时采集配电网的运行状态，监视配电网运行，依靠远方控制优化配网运行方式；在配电网发生故障时，配电终端上传故障信息给主站，由配电主站实现配电网故障定位，通过遥控实现配电网的故障隔离、恢复非故障区负荷供电。集中控制系统由配电终端、通信通道、配电子站和配电主站构成，配电终端具备遥信、遥测和遥控的“三遥”功能。集中控制需要主站与终端的大量数据通信，完全由主站进行分析决策，耗时长，较难满足故障切除的快速性要求。

(2) 分布式智能终端分散控制方式

依托现场分布式智能终端以及保护装置间相互数据通信，实现配电自动化功能。故障隔离和恢复的过程由分布式智能终端根据预设程序在当地完成，无需远方控制中心的干预，而是在故障处理完成后才将报警及开关触头状态反馈至配电主站，该方式对通信系统要求不高，故障处理的速度会有显著提高，但在复杂网络结构中，存在多路电源转供回路时，只能对转供方式进行局部优化，难以提供当前全局最优策略。

(3) 综合控制方式

分布式智能终端与系统主站相互协同配合的综合控制方式，该方式结合了分布式智能终端的快速故障处理优势与系统主站的集中优化控制优势。分布式智能终端装置重点实现配电自动化的紧急控制功能，故障识别和故障隔离的保护功能，有利于对故障的快速切除，充分发挥分布式智能的实时性和可靠性，尽快完成故障隔离，恢复非故障区域供电，减少停电时间和面积；系统主站重点实现对系统优化、负荷转供方式优化等功能，提供了优化的后备方式，一方面能及时纠正分布式终端控制出现的错误，另一方面能综合考虑系统运行情况和约束条件，给出最佳的故障处理方式选择，同时提供人工干预接口，有利于相关调度人员监视和控制故障处理过程。该方式适用于网络转供路径复杂、负荷密度高、可靠性要求高的配电区域。

2.5 自愈控制体系中的网络重构技术

自愈控制体系内涵丰富，网络重构技术是自愈控制体系的重要组成部分。网络重构技术通过改变配网中分段开关与联络开关的开闭状态，构造新的系统网络拓扑结构，实现配网安全经济高效运行的目的。针对系统不同运行状态，网络重构技术有着不同的内涵与目标。

(1) 经济性网络重构技术

在系统正常运行中，通过改变网络拓扑结构，降低系统网络损耗，提高电压运行水平，均衡线路供电功率，提高设备运行效率与资产利用率，优化电网运行，这是配电网经济性重构的内容。

(2) 故障性网络重构技术

在系统发生故障并切除故障后，在保证未失电区的负荷安全可靠运行的前提下，快速通过闭合相邻馈线联络开关，对非故障失电区快速恢复供电，实现非故障失电区的负荷转移，保证重要负荷的快速可靠的恢复供电，这是故障性网络重构的内容。

(3) 预防性网络重构技术

在系统某些节点电压支路电流以及各种电力参数出现越限或不合理状态，相关电力设备运行指标出现异常状况，电网处于脆弱的供电运行状态，时刻存在安全风险，容易引发故障停电事故。这时，通过网络重构改变网络拓扑结构，优化电网运行，将电网存在越限的节点支路的电力参数指标回归到正常水平，使电网在安全可靠的状态下运行，预防事故的发生，这是预防性重构的内容。

2.6 本章小结

本章主要阐述了自愈控制的基本内容，自愈控制包括优化、预防、紧急、恢复控制；配电网自愈控制的原则有连续供电、保证电能质量、保证电网安全稳定运行；自愈控制实现的技术和条件，包括设备智能化、拓扑结构多样化、通信技术、主站信息处理系统等；自愈控制实现的方式有集中、分散和综合控制方式等。最后介绍自愈控制体系中网络重构技术的内涵与目标，它包括经济性网络重构、故障性网络重构、预防性网络重构。

第3章 配电网经济性网络重构方法

3.1 引言

自愈控制中优化控制是指在系统正常状态下优化电网运行,使电网经济高效供电,提高设备资产利用率,而经济性重构包含于自愈控制的优化控制内涵之中。网络经济性重构是对配网正常运行系统结构优化,在保证配电网呈辐射状、满足馈线热容、电压质量要求和变压器容量约束等前提下,通过调整联络开关和分段开关的开合状态来改变网络拓扑结构,使配网某一指标最优或者多目标综合最优配电网运行方式,其中指标有配网网损、负荷均衡或电压质量等。

3.2 经济性重构的算法介绍

配电网重构的算法^[6]主要可以分为启发式方法、人工智能算法以及混合算法等。

3.2.1 启发式方法

(1) 最优流模式算法^[7,8,9]

最优流模式算法以功率损耗最小为目标函数,首先闭合所有联络开关,形成多环网系统,去掉电网中支路阻抗中的电抗部分,在满足网络约束条件 KCL、KVL 下,计算得到电流分布,此即为系统最优流模式;打开在最优流模式下电流最小的开关,以此作为打开开关的启发式规则,打开一个开关解开对应环路。重复打开开关步骤,直到网络恢复为辐射状拓扑结构,完成重构。

最优流模式算法将开关组合问题转化为最优潮流的计算问题,简化配电网重构模型,但由于初始状态存在多个环网,需要逐次打开各个开关,开关打开顺序对最后结果将产生较大影响,最优流法无法保证得到重构的全局最优解。

(2) 支路交换算法

支路交换算法步骤是计算配电网初始潮流和网络损耗,通过潮流计算结果将负荷表示为恒定电流;然后在配网中每次闭合一个联络开关形成一个环网;选择环网中一个分段开关,将其打开使配网重新恢复为辐射状,从而实现负荷转移,达到负荷均衡和降低线损的目的。该方法有如下特点:(1) 快速确定可降低线损的网络结构;(2) 通过公式估算开关操作引起的线损变化;(3) 利用启发式规则减少需要计算的开关组合数目。算法不足之处在于每次只考虑一对开关的操作,单环网网损与整体网络结构网损存在差别,利用该启发式规则得出的计算结果受配

电网的初始结构影响大，使算法计算得出的结果不能保证全局最优。

启发式优化方法，基于对电网系统的理论分析，结合网络的实际特点进行优化和加速求解，计算方法比较明确，计算过程确定性强，计算量比较小，算法一般比较容易实现。

3.2.2 人工智能算法

(1) 人工神经网络

人工神经网络是由神经处理单元构成，模拟了人脑的信号传输特性，通过训练样本，调整神经网络各个层级神经元之间的联系规则及神经元权值，描述出信号输入与状态输出之间的非线性关系。在配电网网络重构中，利用多层感知神经网络模型，描述配电网负荷模式与配电网最优拓扑结构之间复杂非线性关系，输出为配网中开关的状态。

利用人工神经网络处理配电网重构问题时，不需要潮流计算与估算结构变化后的降损程度，减少计算量，缩短重构时间。但算法结果依赖于提供的训练样本，对于结构复杂、节点支路规模大的配电网而言，开关状态、拓扑结构、负荷模式多样复杂，其负荷模式与最优配电网结构数据获取比较困难，训练样本耗时长，负荷模式及其拓扑结构特点被隐藏在神经网络的隐含层，从负荷模式的数据能否得出精确的网络最优开关状态的原理并未得到证明，其算法的可信度值得商榷。

(2) 模拟退火算法^[10,11]

模拟退火方法是解决混合优化问题的有效方法，该算法主要内容有：制定全局冷却方案，确定一系列参数，包括起始冷却温度、冷却率、每次冷却时交换支路数目、特定温度时支路交换总数。算法中通过交换支路，形成新的网络拓扑结构，即新解，并进行潮流计算，得到系统网损情况，若新解网损较小，保留新解，否则按一定的概率接受新解；继续交换支路，直到达到最大支路交换数目。持续冷却，直到满足结束判据，算法停止。设定新解与原解的网损变化情况作为结束判据。模拟退火算法对参数和退火方案的依赖性大，在网络重构时，开关交换数量大，并进行多次潮流计算及网损计算，具有较大计算量。

(3) 遗传算法

遗传算法是以自然基因选择机理为基础的搜索方法，通过模拟基因优胜者生存及随机交换信息的方法搜索优化方案。利用前代优质基因信息去合成新基因，有效利用父辈信息去搜寻新基因。遗传算法结合了目标函数与遗传过程，在网络重构中，一个基因代表一个开关组合，基因中一个编码位表示一个开关的开闭状态。

适应度函数由系统评价指标构成，可以单指标例如系统总网损，也可以包括电压水平，负荷均衡率等指标；适应度函数值是遗传算法指导搜索方向的依据，

要保证其值不为负，如网络重构的目标函数是网损最小，可以加以调整，采用如下表达式：

$$F = \begin{cases} C_{\max} - f & , f < C_{\max} \\ 0 & , \text{其他} \end{cases} \quad (3.1)$$

式中，

f -系统的总网损；

F -遗传算法适应度函数；

$C_{\max}$ -设定的阈值。

基本遗传算法结合拓扑约束产生并选取一组初始基因，采用轮盘赌方法进行选择复制，设定交叉率 P_c 和变异率 P_m 对个体进行交叉和变异操作。遗传算法不需要目标函数的导数或其他辅助的信息，使用概率规则能处理病态、离散型的优化问题，因而具有广泛的适应性；但遗传算法存在一些问题，计算量大，计算速度慢，基因初始优劣严重影响优化结果。

人工智能算法对处理非线性复杂数学问题有广泛的适用性，但也存在计算量大，计算结果精度，计算收敛性，陷入局部最优解等问题。混合算法结合不同算法的长处，弥补算法中的短处，也取得了一定的效果，不再一一赘述。

3.3 潮流计算和辐射状判断

3.3.1 潮流计算

潮流计算是配网重构的基础，本算法采用前推回代潮流计算方法，首先需要对接点的层次关系进行排序，从电源点出发搜索，将电源点设置为第一层，与电源点直接通过闭合支路连接的节点为第二层，与第二层节点直接通过闭合支路连接的节点为第三层，以此类推。确定好节点的层次关系后，就可以开始潮流计算，前推回代法按照以下两个步骤进行迭代，计算支路功率和节点电压。

(1) 前推计算

按照设置好的支路顺序，从网络末节点开始，假定电压不变(第一次设为额定电压，第二次以后使用前一次的迭代电压)，依次向电源点推算功率，节点功率是该节点负荷功率与相连下级支路的支路功率之和，支路功率包含该支路末节点的节点功率和该支路的功率损耗，网络末节点的节点功率即为节点负荷功率。前推计算逆着功率传送的方向，依次计算出各支路的功率损耗和首端功率。计算公式为：

$$\Delta S_{ij(k)} = \frac{P_{j(k)}^2 + Q_{j(k)}^2}{U_{j(k)}^2} \cdot (R_{ij} + j \cdot X_{ij}) \quad (3.2)$$

$$S_{ij(k)} = S_{j(k)} + \Delta S_{ij(k)} \quad (3.3)$$

$$S_{i(k)} = \sum_{j \in \text{con}_i} S_{ij(k)} + S_{di} \quad (3.4)$$

式中,

R_{ij} 、 Q_{ij} 表示支路 ij 的电阻、电抗;

$P_{j(k)}$ 、 $Q_{j(k)}$ 表示节点 j 第 k 次迭代的节点有功功率和节点无功功率;

$\Delta S_{ij(k)}$ 表示首节点为 i , 末节点为 j 的支路第 k 次迭代的功率损耗;

$S_{ij(k)}$ 表示支路 ij 第 k 次迭代的支路功率;

S_{di} 表示节点 i 的节点负荷功率;

$S_{i(k)}$ 表示节点 i 第 k 次迭代的节点功率;

con_i 表示与节点 i 相连的下级节点编号。

(2) 回代计算

从电源点开始, 顺着功率流向, 利用前推计算得到的支路功率, 计算各个节点电压, 计算公式为:

$$V_{j(k+1)} = \sqrt{(V_{i(k)} - \frac{P_{ij}R_{ij} + Q_{ij}X_{ij}}{V_{i(k)}})^2 + (\frac{P_{ij}X_{ij} - Q_{ij}R_{ij}}{V_{i(k)}})^2} \quad (3.5)$$

$$\theta_{j(k+1)} = \theta_{i(k)} - \tan^{-1}(\frac{\frac{P_{ij}X_{ij} - Q_{ij}R_{ij}}{V_{i(k)}}}{V_{i(k)} - \frac{P_{ij}R_{ij} + Q_{ij}X_{ij}}{V_{i(k)}}}) \quad (3.6)$$

式中,

$V_{i(k)}$ 为节点 i 的电压幅值;

θ_i 表示节点 i 的电压相角。

设置迭代结束条件, 节点电压两次迭代相量差幅值最大值不超过容许误差, 迭代结束, 收敛成功, 公式如下:

$$\max_i \left| \dot{V}_{i(k+1)} - \dot{V}_{i(k)} \right| < \varepsilon \quad (3.7)$$

3.3.2 辐射状判断

配网闭环设计, 开环运行, 要求配电网正常运行时要保持网络结构为辐射状, 判断网络辐射状是判断结果为可行解的首要条件。

辐射状网络判据的充要条件为:

(1) 闭合支路数=节点数-电源点数;

(2) 网络中不存在孤立节点或孤立子网;

由以上必要条件分析, 辐射状判断程序, 应该由简单到复杂地判断粒子是否满足辐射状要求, 这样可以在判断中减少计算时间。具体步骤如下:

a. 计算闭合支路数目是否满足条件(1);

b. 闭合支路是否包含所有节点信息;

通过闭合支路的两端点信息集合, 没有被包含的节点即为孤立节点, 这样就可以判断是否存在孤立节点, 但不能判断是否有孤立子网的存在。

c. 从电源点沿闭合支路依次搜索, 是否所有节点与电源点相连;

从每个电源点出发, 沿闭合支路搜索节点, 深度遍历的方法, 将所有节点记录, 搜索结束最终未记录的节点, 它们脱离电源点而存在, 形成了孤立子网, 这样就判断出是否存在孤立子网。

3.4 粒子群算法的基本原理

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, 简称 PSO)^[12,13]是对鸟群、鱼群等觅食过程中所表现出来的群体智能的模拟, 通过个体之间的信息共享完成复杂搜索空间中最优解的寻找, 简单有效。每个优化问题的解就是搜索空间中的一个粒子, 有一定的位置, 以一定的速度运动, 其速度根据它自身飞行历史经验和种群的飞行历史经验来动态调整, 第 i 个粒子在 D 维空间里的位置表示为矢量 $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 速度表示为矢量 $v_i = (v_1, v_2, \dots, v_n)$, 存在一个 ω 适应度函数, 每个粒子根据其位置得到不同的适应度值, 按照适应值比较, 在种群中存在一个最大的适应度的粒子, 其位置为 $gBest$; 粒子不断更新, 一个粒子存在很多历史的适应值, 其中最大的适应度的历史值, 其位置为 $pBest$;

$$V_{i,d}(t+1) = \omega \cdot V_{i,d}(t) + c_1 \cdot rand \cdot (gBest_d - x_{i,d}(t)) + c_2 \cdot rand \cdot (pBest_{i,d} - x_{i,d}(t)) \quad (3.8)$$

$$x_{i,d}(t+1) = x_{i,d}(t) + v_{i,d}(t) \quad (3.9)$$

式中,

N -种群粒子数目, $i=1, 2, 3 \dots N$

D -搜索空间维数, $d=1, 2, 3 \dots D$

t -当前迭代次数;

ω -速度惯性系数;

c_1 、 c_2 -加速度系数;

$x_{i,d}(t)$ -第 t 次迭代第 i 个粒子位置矢量的第 d 维分量;

$v_{i,d}(t)$ -第 t 次迭代第 i 个粒子速度矢量的第 d 维分量;

$pBest_{i,d}$ -第 t 次迭代第 i 个粒子自身历史上取得最大适应值位置的第 d 维分量;

$gBest_d$ -第 t 次迭代种群中取得最大适应值的粒子位置的第 d 维分量;

rand -在 $[0, 1]$ 内变化的随机数;

3.5 基本粒子群算法的改进方法

3.5.1 基本粒子群算法的问题与改进

粒子群算法在解决多目标非线性复杂问题取得很好的效果,但也存在收敛性,“早熟”(陷入局部最优解),参数设置,产生大量不可行解等问题,很多研究学者也做出了对粒子群算法的改进:

(1) 动态调整速度

速度惯性系数 ω 表示对粒子原速度的保留程度,较大的速度惯性系数使粒子速度保持较大值,使粒子对应的开关位置更容易改变,扩展了搜索空间,增强了搜索新解的可能性,但同时较大的速度惯性系数使粒子在开闭位置上不断变化,出现收敛速度慢、迭代次数多,甚至无法收敛到一个稳定解的问题;较小的速度惯性系数使粒子速度保持较小值,开关位置变化不易改变,可以使粒子位置稳定下来,增强收敛的快速性,在一个局部搜索区域内寻找更优解,但同时容易陷入局部最优解,出现早熟现象。因此,可以动态调整速度惯性系数,在进化迭代的前期采用较大的速度惯性系数,增强全局搜索能力,避免陷入局部最优,等到进化迭代到一定次数,可以采用较小的速度惯性系数,稳定一部分开关位置,提高收敛速度。

(2) 局部化粒子群算法

基本粒子群算法是将所有粒子朝向当前种群最优粒子靠拢,因当前种群最优粒子并非一定是全局最优,容易将粒子引入局部最优,解空间容易陷入局部最优解,即“早熟”现象,为了避免早熟,采取去中心化方法,让粒子靠近自身周边局部较优的粒子,各个粒子搜索目标和方向不同,避免过早收敛,陷入局部最优,增强全局收敛能力。

(3) 混合粒子群算法

将粒子群算法与其他智能算法结合,比如遗传算法中的交叉因子加入粒子群算法中,将粒子随机两两组队,按一定的交叉率,交换两者的部分位置,增强规避陷入局部最优解的能力,提高算法的全局搜索能力,更加有效地收敛到全局最优解。

(4) 环网编码方式

通过环网编码方式在一定程度上减少不可行解的产生机率，但仍不能保证在粒子更新优化中生成可行解。

以上可知，粒子群算法的重点问题是如何避免陷入局部最优解，即发生早熟现象，本章采用多榜样系统解决早熟问题，采用环网编码方式与电力孤岛搜索方式保证在粒子更新过程中产生可行解。

3.5.2 粒子编码方式

对于粒子群随机编码方式出现大量非辐射状粒子的问题，可以采取以下原则。

(1) 对于可双端供电的一条线路而言，至多断开其中一条支路开关。如图 2.1 网络结构为例，2-22-23-24-28 为一条线路，该线路可以从节点 2 和节点 28 供电，保证辐射状只允许最多断开其中一条支路 2-22，22-23，23-24，24-28，显然，断开两条以上支路将出现孤立节点或孤立子网。

(2) 未在环网中的线路不参与重构。如图 3.1 中 33-1 支路，不在环网中，不参与重构，减少粒子维数。

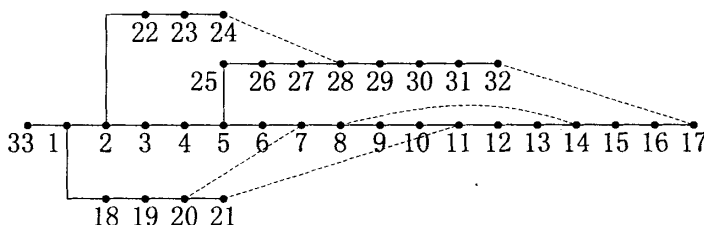


图 2.1 IEEE33 节点图

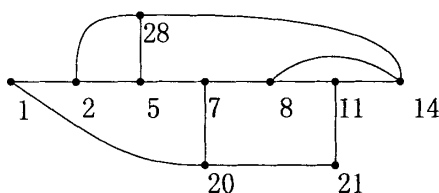


图 2.2 简化的 IEEE33 节点图

针对以上原则(1)、(2)，可以对图 3.1 简化为图 3.2。

在网络重构中，(1-2, 2-5, 5-7, 7-8, 8-11, 11-14, 2-28, 5-28, 28-14, 1-20, 20-21, 7-20, 11-21, 8-14)在这 14 段线路中，选择 5 段线路断开其中一条支路，这将大大减少了非辐射状粒子的产生。

(3) 电力孤岛搜索方式。在粒子位置更新过程中，每当有一个闭合开关打开后，立即对网络搜索出相应的电力孤岛(孤立节点或孤立子网)，找出该电力孤岛

(孤立节点或孤立子网)与电网未失电区相连的所有联络开关, 计算其速度大小, 按速度从大到小依次闭合联络开关, 判断网络是否满足辐射状为止, 满足辐射状即更新为新粒子, 保证粒子更新后为可行解。

3.5.3 多榜样系统

(1) 设置一个榜样系统, 其规模 N_b 约为粒子数目 N 的 10% 左右, 由当前迭代的粒子中适应度较好的粒子组成。

(2) 每个粒子(包括榜样系统的粒子)选取榜样系统中一个作为学习的目标, 榜样被选择的概率为其适应值占榜样系统总适应值的比。

基本粒子群算法是将种群现有最优位置作为全局最优位置, 让所有粒子向其学习, 容易快速收敛并且陷入局部最优解中, 多榜样系统就是为了克服单个局部最优粒子的影响, 建立一个多个局部最优粒子, 让每个粒子随机选择其中榜样粒子作为搜索目标, 让搜索路径多元化; 并且榜样粒子也同样随机选择榜样系统中自身或者其他粒子作为学习对象, 增强了抗早熟的能力, 降低避免陷入局部最优解的风险。

3.5.4 速度惯性系数

速度惯性系数 ω 代表着上次迭代的速度对当前速度的影响程度, 使粒子能够保持速度惯性, 使其有扩展搜索空间的趋势, 较大的速度惯性系数能使粒子保持较大的速度, 更容易改变其相应的开关位置, 使粒子改变的开关位置多, 越有利于探索不同的开关组合, 从而发现更优解, 算法的全局搜索能力强, 相对应地, 较小的速度惯性系数使粒子保持较小的速度, 减少对开关位置的改变, 局限在粒子相对速度大的一个或几个中, 改变的开关位置少, 有利于在当前开关组合中开发相对更优的解, 即粒子的局部搜索能力很强。

因此, 在实际优化中, 先采用较大的速度惯性系数, 改变粒子更多的开关位置, 出现更多种类的开关组合, 加强全局搜索能力, 然后逐渐缩小其速度惯性系数, 让粒子局部精细搜索其相邻的开关组合, 以找到更优解。

惯性速度系数调整如下:

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot (1 - \text{gen} / \text{gen}_{\max}) \quad (3.10)$$

式中,

$\omega_{\max}$ 和 $\omega_{\min}$ 为惯性速度系数最大值和最小值;

gen 和 $\text{gen}_{\max}$ 为当前迭代次数和最大迭代次数;

3.6 数学模型

3.6.1 目标函数

以电网线路损耗最小为目标函数，如下：

$$\min F = \sum_{i,j} \Delta S_{ij(N_{end})} \quad (3.11)$$

式中，

N_{end} -最终迭代次数；

$\Delta S_{ij(N_{end})}$ -最终迭代次数 N_{end} 下，支路 ij 有功损耗，计算公式见 (3.2)；

3.6.2 约束条件

(1) 功率平衡约束

网络节点电压功率必须满足潮流方程：

$$\dot{U}_i \sum_{j=1}^N \dot{Y}_{ij} \dot{U}_j = P_{di} + j \cdot Q_{di} \quad (3.12)$$

式中，

N -节点总数

$\dot{U}_i$ -节点 i 电压相量；

P_{di} 、 Q_{di} -节点负荷有功功率、无功功率

Y_{ij} -节点导纳矩阵元素

(2) 电流电压约束

$$\begin{cases} I_{bi} \leq I_{bi-\max} \\ U_{i-\min} \leq U_i \leq U_{i-\max} \end{cases} \quad (i=1,2,\dots,N_{branch}; k=1,2,\dots,N_{node}) \quad (3.13)$$

式中，

I_{bi} -支路 i 电流；

$I_{bi-\max}$ -支路 i 电流允许最大值；

U_i -节点 i 电压；

$U_{i-\min}$ 、 $U_{i-\max}$ -节点 i 电压下限值与上限值；

N_{branch} 、 N_{node} -支路数与节点数。

(3) 网络拓扑约束

重构后电网拓扑结构应满足辐射状结构。

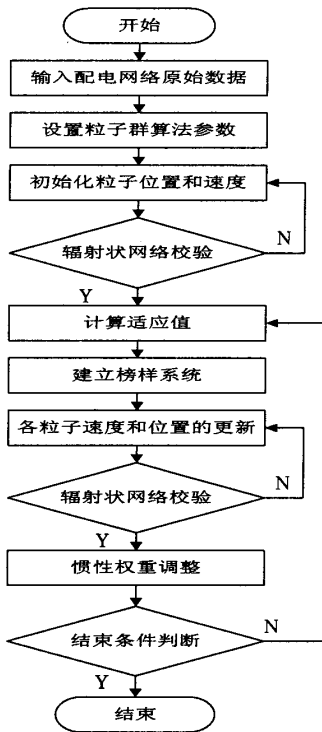


图 3.3 多榜样系统的粒子群算法网络重构流程图

3.7 算法流程

基于多榜样系统的粒子群算法的网络重构流程，如图 3.3 所示。

- (1) 输入配网络原始数据：配网支路参数，各种节点负荷及支路开关状态等。
- (2) 设置粒子群算法参数：粒子种群规模 N_s ，速度惯性系数 ω ，加速度系数 c_1 、 c_2 ，粒子群最大速度 $v_{\max}$ ，榜样系统规模 N_b 。
- (3) 初始化：初始化所有粒子位置(即开关状态组合) x_i ， $x_i = 0$ or 1 在速度范围内，随机初始化所有粒子速度 v_i ， $v_i \in [-v_{\max}, v_{\max}]$ 。
- (4) 辐射状网络校验：校验所有粒子是否满足网络辐射状拓扑约束。如不满足拓扑约束，重新初始化此粒子位置。
- (5) 计算适应值：计算粒子有功网损、各节点电压及支路电流情况，并校验粒子是否满足约束。若满足约束则计算其适应值 f_i ，如果不满足电压电流约束，加罚函数计算适应值；
- (6) 建立榜样系统：将适应值较大的 N_b 个粒子组成榜样系统 $x_{\text{good-}i}$ ，按其适应值 $f_{\text{good-}i}$ 占总适应值的比定为其被其他粒子选为榜样的概率 $P_{\text{good-}i}$ 。
- (7) 各粒子速度和位置的更新：按概率随机选择榜样，按式(3.9)进行粒子位

置和速度更新。

(8) 辐射状校验：校验更新后是否满足结构约束。

(9) 计算适应值。

(10) 更新榜样系统。榜样系统中粒子适应值比新更新的粒子小，则被新粒子替换掉，直到新榜样系统中粒子数其适应值在比所有非榜样粒子大，完成更新。

(11) 惯性权重调整。

(12) 结束条件判断：结束条件：a.榜样系统中粒子经过连续多次迭代不再变化，即榜样系统粒子群停滞，则优化完成，结束并输出结果；b 超过迭代次数，则结束计算，优化失败。否则继续转入步骤(7)计算。算法流程如图 2.3 所示。

3.8 算例分析

如图所示，IEEE33 节点配电系统，其电源点 33 电压为 10.5kV，网络额定电压选 10.0kV。重构前，支路 7-20、11-21、8-14、17-32、24-28 打开。分别采用基本的粒子群算法和改进的多榜样系统的粒子群算法。设置粒子种群规模为 100，榜样系统的粒子个数为 10，速度惯性权重为 $\omega_{\max}=0.9$ 、 $\omega_{\min}=0.4$ ，设置最大迭代数为 30，加速系数 $c_1=c_2=2.05$ 。

表 3.1 网络重构结果分析与比较

	重构前	基本粒子群重构	改进粒子群重构
网络打开支路	7-20	6-5	6-7
	8-14	8-9	8-9
	11-21	13-14	13-14
	24-28	30-31	30-31
	17-32	24-28	24-28
最低节点电压(kv)	9.12	9.64	9.71
平均节点电压(kv)	9.68	9.97	10.01
有功网损(kW)	319.60	193.46	189.96
网损降低率	/	39.47%	40.56%

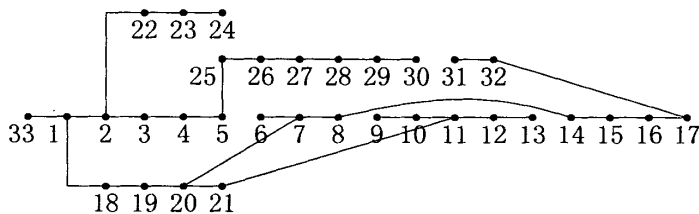


图 3.4 基本粒子群算法重构图

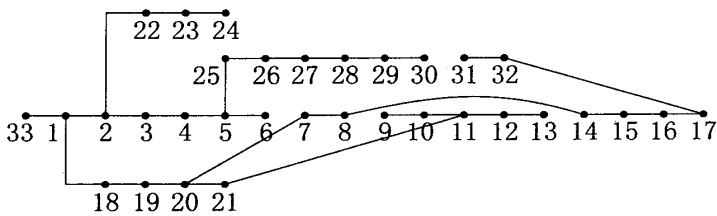


图 3.5 多榜样系统的粒子群算法重构图

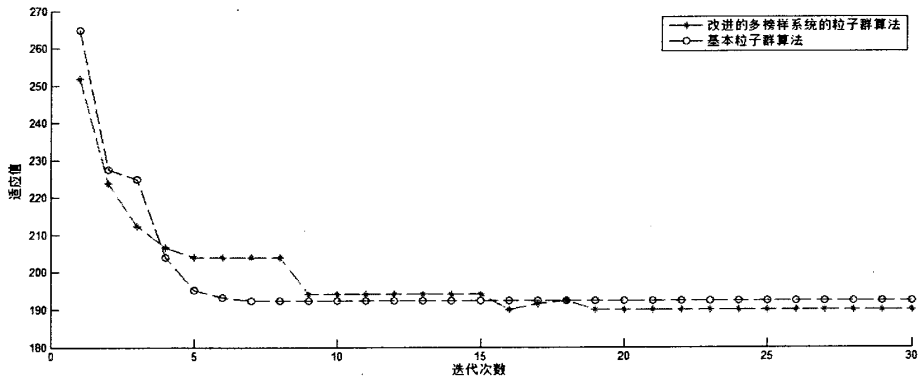


图 3.6 基本与改进粒子群结果比较

由图分析，基本粒子群迭代到 7 代时就已经收敛到次优解 193.46，而改进的多榜样系统的粒子群算法则迭代到 19 代才收敛到全局最优解 189.96，并且在迭代到 16 代时，达到了最优解，却没有保持自身的有利地位，跳出了原有的最优解，是因为这个最优解粒子随机选择了其他榜样粒子作为速度更新的目标而失去了最优地位，这种跳出自身有利位置的能力，降低了避免陷入局部最优的风险。

基本粒子群算法其实质内容为通过种群现有最优位置和自身历史最优位置与现在自身位置来调整自身速度，进而影响自身位置，实现种群向最优位置靠拢，找到最优解，种群现有最优位置就是一个中心，其他粒子向其靠拢，只要下一代没有更优粒子的出现，这个中心自身是不变的，所以虽然基本粒子群算法容易快速收敛，但比较容易陷入最优解；而改进的粒子群算法，由于存在多榜样系统，属于多中心，各个粒子在榜样系统中选择自己的目标修改位置，各个粒子变化方向不同，增加了全局搜索范围；不仅如此，榜样粒子也可以随机选择其他榜样粒子作为速度更新的目标，也就是说这个多中心并不固定，即使没有新的更优粒子出现，自身也可能由于其他中心的影响而改变自身中心位置，增强了躲避早熟现象的能力。

3.9 本章小结

本章首先介绍了配电网经济性重构的基本算法与原理，介绍经济性重构需要的潮流计算与网络辐射状判断的模块，重点介绍粒子群算法，并分析运用粒子群

算法进行配电网经济性重构时存在两个问题：“早熟”和粒子更新中产生大量不可解的现象，针对早熟现象采用多榜样系统和调整速度惯性系数的方法来处理，产生多中心的粒子更新系统，粒子随机选择榜样系统中粒子作为更新手段，增大搜索范围，增强了抗早熟的能力，降低陷入局部最优解的风险；而粒子更新中产生大量不可行解的问题采用环网编码方式和位置更新搜索电力孤岛方式，保证迭代粒子产生可行解。用 IEEE33 节点仿真算例验证其可行性和有效性。

第4章 配电网故障性网络重构方法

4.1 引言

如今，系统网络结构、运行方式的日益复杂，用户对供电可靠性要求不断提高，电网的自愈恢复与故障重构已经成为电力系统需要迫切考虑的问题之一。

故障性网络重构作为网络重构的一种，是指在故障已经被隔离后，在不发生安全越限的情况下，通过网络重构快速恢复对非故障区失电负荷的供电。重构方案一般综合考虑开关操作次数、非故障失电负荷恢复量、馈线容量裕度、供电电压水平、网络拓扑结构变化程度、供电负荷均衡度等因素，存在不可微、不连续、多维、多约束条件、高度非线性化等问题。由于开关数目很大，其生成的环状网络数量也十分巨大，网络结构复杂，在配电网突然发生故障并切除故障后，对未故障失电区的负荷重新恢复供电存在许多种可能方案，因此在理论上网络重构问题是一个庞大的非线性 0-1 整数组合优化问题。考虑到开关组合数量巨大，将它们作为优化变量进行穷举搜索将面临“组合爆炸”问题，从而导致数学求解过程中计算量过大，占用大量的机时，并且无法确保计算过程的收敛性。

为了解决计算速度的问题，研究人员提出了许多不同的方法来解决配电网重构问题，主要研究内容集中在对网络故障性重构的优化算法和目标两个方面。

4.2 故障性网络重构的基本原理与方法介绍

作为系统运行和控制的重要手段，配电网重构在配电管理系统中起着重要作用。目前，配电网络广泛采用环状设计、开环运行。通常情况下，在沿馈线方向上分布了一定数量的常闭分段开关，而在馈线之间装有常开的联络开关。正常运行时，分段开关闭合，给负荷输电，形成辐射状网络，一旦某段线路发生故障时，故障点两端的分段开关跳开切除故障，故障点至电源点一侧的节点负荷继续保持供电，而故障点另一侧的节点负荷因失去电源导致断电，成为非故障失电区（也称为待恢复供电区），如何快速、有效、可靠地给失电区恢复供电是故障性网络重构的主要内容。配电网故障供电恢复是一个多目标、非线性的网络优化问题，主要包括供电恢复程度，网络结构变化，开关动作次数，支路负荷是否过载，节点电压是否越限，网络损耗增幅，算法简单快速可靠等多个目标。

4.2.1 数学优化方法

数学优化方法是直接利用现有的数学优化原理进行配电网重构的方法，供电恢复问题是个组合优化问题，用于供电恢复的数学优化方法主要有分支定界法^[14,15]和混合整数优化法^[16,17]。数学优化方法能够准确地建立供电恢复的数学模型，理论上可以找到最优解。文献[15]结合专家系统法和分支定界法的两者优势，用专家系统法分解负荷恢复问题，用分支定界法决定负荷恢复子问题的恢复供电路径以及需要断电的负荷。文献[16]结合启发式方法与混合整数规划法，用分层的方法转移非故障失电区负荷。一般而言，供电恢复问题复杂，数学模型通常无法涉及所有方面，并且算法存在收敛性问题，得出局部最优解或者无法收敛。通常与启发式方法或人工智能法结合使用的。

4.2.2 启发式方法

启发式优化方法，基于电力系统理论分析，结合网络实际情况，进行优化和求解，计算方法明确，计算过程确定，计算量相对较小，算法一般比较容易实现。目标函数除考虑最大限度恢复供电以外，还包括恢复供电后系统网损最低，馈线负荷供电比较平衡，开关操作次数尽可能少，恢复供电后网络电压水平比较高等。文献[18]采用二叉搜索树和深度优先搜索策略。文献[19]提出了基于启发式规则的最优搜索树的方法。文献[20]采用基于评估函数和启发式规则的搜索策略。文献[21]提出供电恢复目标函数为恢复负荷供电以及开关操作数最少。此外，文献[22]以开关操作次数最少为目标，采用启发式规则的广度优先搜索策略恢复供电。文献[23]提出了待恢复树切割算法，把大量联络开关与分段开关组合优化问题转化为以联络开关为中心的待恢复树切割问题，减少了计算量。文献[24]提出了动态规划算法的故障恢复方案，将非故障失电区的多个负荷节点分割为不同的恢复区，根据每个分区节点位置生成恢复供电序列组，将恢复供电过程变为可供动态规划方法求解的计算模型；

启发式算法是使得供电恢复问题的搜索空间大大减少，能够迅速得出恢复方案，可行性强，结果可信度高，但得到全局最优解相对比较困难。因此，对于供电决策速度快并且结果要求比较宽松的情况下，启发式规则将会是重要选择。

4.2.3 人工智能方法及其混合算法

用于供电恢复的人工智能方法主要有模糊算法、遗传算法、专家系统法、Petri网算法、人工神经网络法、粒子群优化算法(PSO)，模拟退火法(SA)、禁忌搜索法(TS)及蚁群算法等。

(1) 模糊算法

模糊算法对可行解按照一定的目标进行模糊化处理,通过模糊评价指标,选取评价值最大的恢复方案作为供电恢复方案。文献[25]模糊化处理开关操作数和线路电流,允许支路在高峰负荷时轻微过载。文献[26]采用启发式算法模糊化处理开关操作个数、转移负荷量和备用容量。模糊算法的优点是能够解除死约束,使目标函数变得相对灵活,能够综合多个目标,选取评价值相对最优的方案。其难度在于指标的模糊化处理中的参数取值将严重影响算法的可信度。

(2) 遗传算法

文献[27]提出一种改进的遗传算法进行配网重构,以最大恢复供电、最小网络损耗和操作损耗为目标函数,基于环路的编码策略降低不可行解产生率,自适应的种群规模避免经验设置的不合理对算法收敛的影响,基于种群优劣的自适应交叉、变异算子有效地保护优秀个体,加快收敛速度。文献[28]采用遗传算法来解决大规模失电区域和多故障等复杂情况下的故障恢复,以求获得全局最优解。文献[29]将故障恢复方案分成由一至三条支持馈线对非故障失电区恢复供电的决策方案。文献[30]改进编码、适应度函数,并且引入一个特殊的基因寻找最优的切负荷操作。遗传算法处理离散非线性优化问题比较方便,对处理故障恢复问题存在一定优势;但遗传算法中初始基因对结果产生较大影响,基因交叉遗传变异计算量大,计算速度慢,并且产生不可行解的机率很大,必须结合启发式规则处理配网重构问题,才能更好地发挥其优越性。

(3) 专家系统

专家系统是一个具有大量专门知识与经验的程序系统,它根据某个领域中的专家提供的知识和经验进行推理和判断,模拟专家的决策过程,解决复杂问题。文献[31]提出专家知识系统,提供决策方案,能消除线路过载,电压稳定问题,保护装置不匹配问题。文献[32]结合专家系统与启发式规则,得出的重构方案有效地消除变压器、馈线过载,提高系统电压水平。文献[33]提出故障恢复算法集,通过构造故障恢复的自学习模糊专家系统,形成了综合智能式故障恢复系统,其中包括知识库、数据库和推理机等模块,算法集提高了供电恢复成功率,缩短网络故障恢复时间。文献[34]提出用于解决变压器、馈线过载和电压越限的专家系统知识库规则。文献[35]为,建立了专家知识库,用于平衡负荷、降低网损与恢复供电,算法可以处理电压电流越限、保护装置协调等问题。

(4) 混合算法

根据故障恢复各阶段的不同特点,结合各个算法的不同优势,采用两者或多种算法混合,规避各种算法的不足发挥其优点,更好地解决故障恢复问题。文献[36]提出了启发式规则与熵权理论相结合的配网故障恢复算法。文献[37]把禁忌搜

索算法中的禁忌表、禁忌表处理和藐视准则融入到克隆遗传算法中，提高计算效率。文献[38]将节点深度编码技术引入改进的非支配遗传算法中，可快速得到新的网络拓扑结构，减少了算法的寻优时间。

4.3 故障重构的常用数学模型

4.3.1 目标函数的数学模型

(1) 以恢复失电负荷程度最大为目标函数

故障重构首要目标就是尽可能多地对非故障失电区负荷恢复供电，可将失电负荷恢复程度最大的目标转化为在故障自愈过程中未能恢复供电的失电负荷最小这一目标，其公式表示如下：

$$\min S_{nr} = \sum_i^{N_{nr}} S_{lost-i} \quad (4.1)$$

式中，

N_{nr} -未能恢复供电的失电负荷节点编号；

S_{nr} -未能恢复供电的失电负荷总量；

S_{lost-i} -未能恢复供电的节点 i 失电负荷量

(2) 以降低网络损耗为目标函数

配电网网损主要包括变压器的铜耗、铁耗以及线路上导线的损耗等，配电网故障恢复时，随着网络结构改变，潮流分布随之改变，必将影响线路和变压器的功率损耗。以降低网损为目标的函数模型可表示如下：

$$\min L = \sum_i^{N_b} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i} \cdot R_i \quad (4.2)$$

式中，

N_b -网络中闭合支路数目；

U_i -支路 i 末端电压；

P_i , Q_i -流过支路 i 的有功功率和无功功率；

R_i -支路 i 电阻；

(3) 以提高电压质量为目标函数

由供电电能质量要求可知，配电网供电的电压质量水平是衡量电能质量的重要指标，以全网节点电压降最小为目标的计算公式如下：

$$\min U_d = \sum_i \left| \frac{U_i - U_0}{U_0} \right| \quad (4.3)$$

式中,

D-网络节点编号集合;

U_i 、 U_0 -分别表示节点 i 和电源节点电压;

U_d -电压差值之和。

另外, 利用电压均衡指数可以提高恢复供电后的配网供电电压质量, 也能达到负荷均衡与降低网损的效果, 数学模型如下:

$$\min \sum_{i,j=\alpha} V_{BL-ij} \quad (4.4)$$

$$V_{BL-ij} = \max[U_i, U_j] / \min[U_i, U_j] \quad (4.5)$$

式中,

α -联络开关两端的节点集;

V_{BL-ij} -两端节点编号为 i, j 的联络开关处的电压平衡指数;

U_i 、 U_j -分别为节点 i, j 的电压。

(4) 以开关操作次数为目标函数

开关频繁的开闭会使开关工作寿命的缩短, 增加开关损耗, 影响电网的安全稳定运行, 同时一次重构中过多的开关操作次数将延长恢复供电的时间, 因此, 在保证恢复供电的情况下, 应尽可能减少开关操作次数, 其目标函数如下:

$$N = \sum_{i=1}^m (1 - C_i) + \sum_{j=1}^l O_j \quad (4.6)$$

式中,

N -开关操作次数;

C_i -正常运行时保持闭合的分段开关, 闭合时取值为 1, 断开取值为 0;

O_j -正常运行时保持断开的联络开关, 闭合时取值为 1, 断开取值为 0,;

m -分段开关编号集;

l -联络开关编号集

(5) 以负荷均衡为目标函数

配网负荷分布不均衡将增加系统过负荷的风险, 影响电能质量, 增加网络损耗, 通过故障恢复将负荷在馈线间进行转移, 使负荷均匀分布, 避免设备过载, 提高配网安全运行和抗风险能力。

$$L_{Bsys} = \frac{1}{n_b} \sum_{i=1}^{n_b} L_{Bi} \quad (4.7)$$

$$L_{Bi} = \frac{S_i}{S_i^{\max}} \quad (4.8)$$

式中,

L_{Bsys} 、 L_{Bi} - 分别是系统总负荷均衡指数和支路 i 负荷均衡指数;

S_i 、 $S_i^{\max}$ - 分别是流过支路 i 的实际功率和支路 i 的功率容量上限;

n_b - 系统支路总数。

4.3.2 常用的约束条件

(1) 辐射状拓扑结构约束

配网多为环网结构, 开环运行, 因此配网正常运行时与故障重构后都应满足辐射状结构, 为了保持辐射状网络结构, 配网中闭合与打开的开关数目是一定的, 在网络发生故障并切除后, 线路下游失电, 如采用多供电路径恢复供电, 则要断开非故障失电区分别由各个供电路径供电, 如两条供电路径对失电区恢复供电, 则失电区断开一个开关, 保证辐射状运行。

(2) 线路容量约束

从导体热稳定性出发, 为了保证线路安全可靠地供电, 线路流过的实际电流不应超过线路的长期允许载流量, 换言之, 供电路径对非故障失电区恢复供电时, 不能超过其线路备用容量。

(3) 节点电压约束

根据供电电能质量标准, 系统中正常运行时节点电压不能越限, 影响系统安全稳定供电, 换言之, 供电路径对非故障失电区恢复供电时, 不能使原线路供电电压水平下降到限值以下。

(4) 开关操作次数约束

开关操作带来开关操作损耗, 频繁开关操作影响开关使用寿命, 同时, 复杂的开关操作命令对电网智能控制性要求高, 影响实际操作准确和安全, 对电力系统也产生安全稳定影响, 应把握好开关操作次数与故障恢复后系统安全稳定的平衡关系。

4.4 配电网故障后多线路恢复供电的负荷分配方法原理

根据配电网开关动作次数少, 网络结构变化小的要求下, 对非故障失电区进行恢复供电, 优先考虑一级支持馈线的联络开关的闭合, 如果备用容量不足将考虑次级支持馈线转供。一般情况下, 配网在设计时将考虑故障后支持馈线的供电恢复问题, 馈线留有一定备用容量, 本章主要研究在一级支持馈线的备用容量充足的情况下, 实现供电恢复的快速性和保证供电恢复后配网的安全经济运行。

针对大面积断电恢复传统方法的是按照联络开关备用容量来划分恢复供电区, 用穷举法依次将失电区分段开关断开恢复供电, 存在计算量大, 耗时长的问题;

智能算法计算复杂，求解稳定性差，耗时，不满足快速恢复故障要求；采用节点一阶负荷矩法计算量小，但存在计算精度问题；本节针对大面积断电恢复这一问题，以恢复供电路径网损增量最少为原则提出最佳负荷分配比方法，快速划分失电区恢复供电，实现故障快速恢复，优化配网运行。

本章涉及的名词解释如下：

非故障失电区：配电网发生故障，并切除故障后，该故障线路故障下游的停电区域。

未失电区：配电网发生故障，并切除故障后，配网继续保持正常供电区域。

供电路径：电源点到联络开关节点处的线路。

一级支持馈线：其联络开关直接与非故障失电区相连的供电路径。

次级支持馈线：其联络开关与一级支持馈线相连的供电路径。

失电区总负荷：非故障失电区的所有节点负荷（视在功率）之和。

负荷分配比：各条供电路径的所带失电区负荷占失电区总负荷的百分比。

临界负荷分配比：以支路电流不过载，节点电压不越限为约束，各条供电路径负荷分配比的临界值。

极值负荷分配比：以未失电区网损增量最小为目标，得到的每条供电路径上的负荷分配比。

最优负荷分配比：根据临界负荷分配比和极值负荷分配比两者关系调整得到的最终的负荷分配比。

当非故障失电区存在多个联络开关与其他供电路径相连，而任意一条联络开关的备用容量都小于失电区的总负荷，需要两条或两条以上的供电路径同时对失电区恢复供电，为了满足配电网辐射状的要求，必须将失电区划分相应个数区域分别与单个联络开关相连恢复供电，对各个联络开关分配多少负荷是失电区划分区域的关键和前提。本发明提出失电区负荷分配比的计算方法，根据开关动作次数少，支路负荷不过载，节点电压不越限得到每个联络开关临界负荷分配比，以未失电区网络损耗增幅最小为目标函数得到极值负荷分配比；比较极值负荷分配比和临界负荷分配比，当方案中所有极值负荷分配比均小于相应临界负荷分配比时，最优负荷分配比由极值负荷分配比确定；当存在有极值分配比小于其相应的临界负荷分配比时，该越限线路的最优负荷分配比由临界负荷分配比决定，将需转移的负荷量加在未越限的支持线路上，确定最优负荷分配比。

下节对两线路对非故障失电区恢复供电为例，如图 4.1，解释负荷分配比的计算规则。本文采取双线路共电源的模型，因为存在双线路重合段的问题，使计算方法更加复杂，使决策方案更具有适用价值，该计算方法同样适用于多线路多电源的模型。

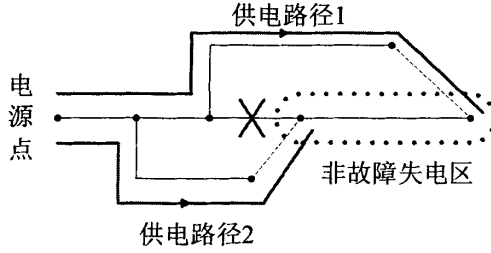


图 4.1 双线路共电源模型

4.4.1 临界负荷分配比的计算规则

对于一条向失电区供电的供电路径，必须满足联络开关节点电压不越限，各供电路径电流不过载，根据这两个条件约束下得到负荷分配比的可行域，其中最大值即为临界供电负荷分配比。

(1) 联络开关备用容量的计算

一般情况，配电网线路输电距离短，各节点电压相角相差较小，可以忽略不计，电压采用标量计算。联络开关 i 备用容量指经该联络开关向失电区供电的供电路径中各支路额定电流与配电网故障切除后、网络重构前（非故障失电区恢复供电前）的支路电流之差的最小值。

$$I_{rsv-i} = \min \{I_{N-k} - I_{real-k} \mid k = 1, 2, \dots, Num\} \quad (4.9)$$

其中， I_{N-k} 支路 k 的额定电流， I_{real-k} 支路 k 在故障切除后、网络重构前的实际支路电流， Num 为该供电路径的支路个数。

容量约束负荷分配比为：

$$\alpha_{l-res-i} = \frac{I_{rsv-i}}{I_r} \quad (4.10)$$

其中， I_r 为失电区总负荷。

(2) 线路节点电压安全不越限的计算

对线路电压安全约束主要考察联络开关节点电压处满足安全不越线，联络开关节点将作为失电区供电恢复的电源点，需事先设定联络开关节点电压阈值。根据图 4.1 双线路供电恢复例子，线路 1 上恢复供电后线路 1 中电源点与联络开关节点的电压降近似计算为：

$$\begin{aligned} \Delta U_1' &= \Delta U_1 + z_{11} \cdot \Delta I_1 + z_{12} \cdot \Delta I_2 \\ &= \Delta U_1 + z_{11} \cdot \alpha \cdot I_r + z_{12} \cdot (1 - \alpha) \cdot I_r \\ &= \Delta U_1 + z_{12} I_r + (z_{11} - z_{12}) \cdot I_r \cdot \alpha \end{aligned} \quad (4.11)$$

其中， ΔU_1 为故障切除后供电恢复前线路 1 在电源点与联络开关节点之间的电压降； ΔI_1 为线路 1 负荷电流增量； z_{11} 为线路 1 的线路总阻抗， z_{12} 为两线路重合

段的线路阻抗, α 为线路 1 的负荷分配比。

设电源电压 U_s , 线路 1 联络开关节点电压为:

$$U_{c-1} = U_s - \Delta U_1 - z_{12} I_r - (z_{11} - z_{12}) \cdot I_r \cdot \alpha \quad (4.12)$$

设线路 1 联络开关节点电压最低阈值 $U_{c-\min-1}$, 则线路 1 的电压约束负荷分配比为:

$$\alpha_{u-res-1} = \frac{U_s - U_{c-\min-1} - \Delta U_1 - z_{12} I_r}{(z_{11} - z_{12}) \cdot I_r} \quad (4.13)$$

对于多线路的供电恢复时, 且各供电路径没有重合段, 即满足

$$z_{ij} = 0, \forall i, j \text{ 且 } i \neq j \quad (4.14)$$

其中, z_{ij} 为两供电路径 i 和 j 重合段的线路阻抗;

则供电路径的联络开关节点电压为:

$$\begin{bmatrix} U_{c-\min-1} \\ \vdots \\ U_{c-\min-i} \\ \vdots \\ U_{c-\min-n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{s1} \\ \vdots \\ U_{si} \\ \vdots \\ U_{sn} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \vdots \\ \Delta U_i \\ \vdots \\ \Delta U_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_{11} & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & z_{ii} & & \\ & & & \ddots & \\ & 0 & & & z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_{u-res-1} \\ \vdots \\ \alpha_{u-res-i} \\ \vdots \\ \alpha_{u-res-n} \end{bmatrix} \cdot I_r \quad (4.15)$$

其中, $\alpha_{u-res-i}$ 为供电路径 i 的电压约束负荷分配比, U_{si} 为电源 i 电压, $U_{c-\min-i}$ 为供电路径 i 的联络开关节点电压最低阈值, ΔU_i 为故障切除后供电恢复前供电路径 i 在电源点与联络开关节点之间的电压降; z_{ii} 为供电路径 i 的线路总阻抗;

由此得出电压约束负荷分配比

$$\begin{bmatrix} \alpha_{u-res-1} \\ \vdots \\ \alpha_{u-res-i} \\ \vdots \\ \alpha_{u-res-n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{z_{11}} & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & \frac{1}{z_{ii}} & & \\ & & & \ddots & \\ & 0 & & & \frac{1}{z_{nn}} \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} U_{s1} \\ \vdots \\ U_{si} \\ \vdots \\ U_{sn} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \vdots \\ \Delta U_i \\ \vdots \\ \Delta U_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_{c-\min-1} \\ \vdots \\ U_{c-\min-i} \\ \vdots \\ U_{c-\min-n} \end{bmatrix} \right) \cdot \left(\frac{1}{I_r} \right) \quad (4.16)$$

(3) 临界负荷分配比的计算

临界负荷分配比取容量约束负荷分配比 $\alpha_{u-res-i}$ 和电压约束负荷分配比 α_{rsv-i} 两者的最小值, 即临界负荷分配比为:

$$\alpha_{res-i} = \min\{\alpha_{u-res-i}, \alpha_{rsv-i}\} \quad (4.17)$$

4.4.2 极值负荷分配比的计算规则

4.4.2.1 网损增量的近似计算

网损增量计算采取以下两个近似计算原则。

(1) 考虑到一般情况下，配电网节点负荷的功率因数角小于 40° ，可以近似认为原电流与新增电流的相角差不大，电流可以标量相加。

对于一个阻抗 $Z = R + jX$ ，原来流过该阻抗的电流为 I ，电压为 ΔU ，这时，新增一个大小为 ΔI 的电流，与原电流 I 相角差较小近似忽略不计，则在阻抗 Z 上产生的网损增量近似记为

$$\begin{aligned}\Delta P_s &= (I + \Delta I)^2 \cdot R - I^2 \cdot R = 2(IR) \cdot \Delta I + R \cdot \Delta I^2 \\ &= 2(\Delta U \cdot \cos \phi_z) \cdot \Delta I + R \cdot \Delta I^2\end{aligned}\quad (4.18)$$

其中 $\Delta U = I \cdot Z$ ， ϕ_z 为阻抗角。

从式(4.18)中可以将新增网损理解为在电阻原压降分量上产生的功耗和新增电流在电阻上产生功耗的叠加。

(2) 供电路径上各个支路段电阻的电压降分量之和近似等于该路径的总电阻的电压降分量，即

$$\sum_n \Delta U_{1branch-n} \cdot \cos \phi_{z1branch-n} = \Delta U_1 \cdot \cos \phi_{z1} \quad (4.19)$$

其中， $\Delta U_{1branch-n}$ 为供电路径 1 的第 n 条支路段的电压降， $\cos \phi_{z1branch-n}$ 为供电路径 1 的第 n 条支路段的线路阻抗角余弦， ΔU_1 为供电路径 1 的总电压降， $\cos \phi_{z1}$ 为供电路径 1 的线路总阻抗角余弦。

4.4.2.2 极值负荷分配比

以图 4.1 两线路恢复供电为例，按上述网损增量的近似计算方法，总网损增量包括新增电流在对应恢复供电路径电阻原压降分量上的功耗和在恢复供电路径电阻的功耗，加上双线路重合段互电阻产生互压降的功耗，总网损增量总计为：

$$\begin{aligned}\delta P &= 2\Delta U_1 \cos \phi_{z1} \Delta I_1 + 2\Delta U_2 \cos \phi_{z2} \Delta I_2 \\ &\quad + r_{11}(\Delta I_1)^2 + r_{22}(\Delta I_2)^2 + 2r_{12}\Delta I_1 \Delta I_2 \\ &= (r_{11} + r_{22} - 2r_{12})I_r^2 \alpha^2 + r_{22}I_r^2 + 2\Delta U_2 \cos \phi_{z2} I_r \\ &\quad + 2(r_{12}I_r - r_{22}I_r + \Delta U_1 \cos \phi_{z1} - \Delta U_2 \cos \phi_{z2})I_r \alpha\end{aligned}\quad (4.20)$$

其中， ΔU_1 、 ΔU_2 分别为故障切除后供电恢复前供电路径 1 和 2 在电源点与联络开关节点之间的电压降； ΔI_1 、 ΔI_2 为供电路径 1 和 2 对非故障失电区供电的负荷电流增量； $\cos \phi_{z1}$ 、 $\cos \phi_{z2}$ 分别为供电路径 1 和 2 的线路阻抗角的余弦； r_{11} 、 r_{22} 分别为供电路径 1 和 2 的线路总电阻； r_{12} 为两供电路径间重合部分的线路电阻（如果没有重合段，取值为 0）； I_r 为待恢复总负荷电流； α 为供电路径 1 的负荷分配比。

令 $\frac{d\delta P}{d\alpha} = 0$ ，求出总网损增量最小值的供电负荷分配比，即为所求的供电路径

1 的极值负荷分配比：

$$\alpha_1 = \frac{\frac{\Delta U_2 \cos \phi_{z_2} - \Delta U_1 \cos \phi_{z_1}}{I_r} + r_{22} - r_{12}}{r_{11} + r_{22} - 2r_{12}} \quad (4.21)$$

当需要三条供电路径同时对非故障失电区供电时，供电路径极值分配比计算规与上述相同，总网损增量以矩阵形式描述为：

$$\begin{aligned} \delta P = 2I_r \cdot [\Delta U_1 \cos \phi_{z_1} \quad \Delta U_2 \cos \phi_{z_2} \quad \Delta U_3 \cos \phi_{z_3}] \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} \\ + I_r^2 \cdot [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3] \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{12} & r_{22} & r_{23} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.22)$$

由于存在

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1 \quad (4.23)$$

所以将式(4.23)代入式(4.22)，得：

$$\begin{aligned} \delta P = 2I_r [\Delta U_1 \cos \phi_{z_1} \quad \Delta U_2 \cos \phi_{z_2} \quad \Delta U_3 \cos \phi_{z_3}] \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ 1 - \alpha_1 - \alpha_2 \end{bmatrix} \\ + [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad 1 - \alpha_1 - \alpha_2] \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{12} & r_{22} & r_{23} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ 1 - \alpha_1 - \alpha_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.24)$$

令 $\frac{\partial \delta P}{\partial \alpha_1} = 0$ 、 $\frac{\partial \delta P}{\partial \alpha_2} = 0$ 联立方程组，计算结果为：

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \text{inv} \left(\begin{bmatrix} r_{11} - 2r_{13} + r_{33} & r_{12} - r_{23} - r_{13} + r_{33} \\ r_{12} - r_{23} - r_{13} + r_{33} & r_{22} - r_{23} + r_{33} \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta U_3 \cos \phi_{z_3} - \Delta U_1 \cos \phi_{z_1}}{I_r} + r_{33} - r_{13} \\ \frac{\Delta U_3 \cos \phi_{z_3} - \Delta U_2 \cos \phi_{z_2}}{I_r} + r_{33} - r_{23} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

由式(4.23)计算 α_3 ，完成三线供电的极值负荷分配比的计算。

多线路供电的极值负荷分配比计算规则：

总网损增量为：

$$\begin{aligned} \delta P = & 2I_r \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_1 \cos \varphi_{z1} & \cdots & \Delta U_n \cos \varphi_{zn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} \\ & + I_r^2 \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 & \cdots & \alpha_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1n} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.26)$$

其中,

$\Delta U_1 \sim \Delta U_n$ 为供电恢复前供电路径(1-n)在电源点与联络开关节点之间电压降;

$\Delta I_1 \sim \Delta I_n$ 为供电路径(1-n)对非故障失电区供电的负荷电流增量;

$\cos \varphi_{z1} \sim \cos \varphi_{zn}$ 分别为供电路径(1, 2)的线路阻抗角的余弦;

r_{ii} 分别为供电路径 i 的线路总电阻;

r_{ij} 为供电路径 i 和 j 间重合部分的线路电阻 (如果没有重合段, 取值为 0);

I_r 为待恢复总负荷电流;

α_i 为供电路径 i 的负荷分配比。

极值负荷分配比满足条件:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (4.27)$$

将公式(4.27)代入公式(4.26), 得

$$\begin{aligned} \delta P = & 2I_r \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_1 \cos \varphi_{z1} & \cdots & \Delta U_n \cos \varphi_{zn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_{n-1} \\ 1 - \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i \end{bmatrix} \\ & + I_r^2 \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 & \cdots & \alpha_{n-1} & 1 - \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1n} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_{n-1} \\ 1 - \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.28)$$

令 $\frac{\partial \delta P}{\partial \alpha_i} = 0, (i=1, \dots, n-1)$ 与公式(4.27)联立得出极值负荷分配比 $\alpha_i (i=1, \dots, n)$

4.4.3 最佳负荷分配比的调整规则

(1) 当各供电路径的极值负荷分配比均小于相应的临界负荷分配比时, 最优负荷分配比由极值负荷分配比确定。

(2) 当存在某条供电路径的极值负荷分配比小于其相应的临界负荷分配比时,

该条供电路径的最优负荷分配比由其临界负荷分配比确定，该供电路径需转移的负荷量由其余未越限供电路径均衡承担。

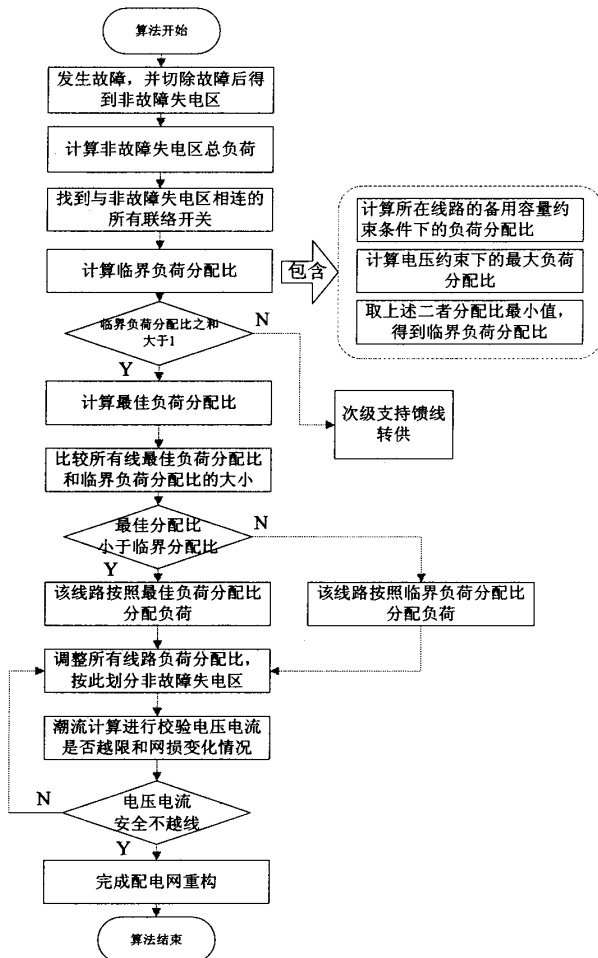


图 4.2 供电恢复算法流程图

4.5 配电网故障恢复流程

故障恢复主要步骤如下：

- (1) 配电网发生故障，并切除故障后，得到孤立子网，即非故障失电区。
- (2) 计算非故障失电区总负荷。
- (3) 找到与非故障失电区相连的所有联络开关。
- (4) 按式(4.9)计算各个联络开关所在供电路径的备用容量，按式(4.10)得到容量约束负荷分配比。
- (5) 设置联络开关节点处电压阈值，按式(4.16)计算得到电压约束负荷分配比。
- (6) 按式(4.17)得到临界负荷分配比，与非故障失电区相连所有联络开关的临界负荷分配比之和应大于 1，否则需要次级支持馈线转供。

(7) 确定恢复供电路径, 按照式(4.28)得到极值负荷分配比。

(8) 比较极值负荷分配比和临界负荷分配比的大小, 按 4.4.3 节所述调整并确定最佳负荷分配比。

(9) 由调整得到的最佳负荷分配比, 划分非故障失电区, 并通过潮流计算进行校验电压电流是否越限和网损变化情况, 越限则返回步骤(7)重新确定恢复供电路径, 未越限则完成配电网重构。

4.6 算例分析

本节采用 IEEE 33 节点系统为例, 当节点 6-7 线路段发生故障切除, 如图 4.3。

(1) 节点 7~17 成为非故障失电区, 失电区总负荷为 966.29kW, 供电区与非故障失电区相连的有三条联络开关 7-20、11-21、17-32, 如表 4.1 所示。

(2) 设置基准电压 10kV, 非故障失电区总负荷电流 $I=96.629\text{A}$ 。

(3) 根据我国电力标准 10kV 及以下三相供电电压允许偏差为正负 7%, 可以设置电压阈值为 9.33kV, 由配电网故障恢复流程 4.5 中的步骤(4)、(5)、(6), 计算得到每个联络开关的临界负荷分配比, 如表 4.2 所示。

(4) 因为联络开关 7-20 和 11-21 在同一线路上, 只选其一, 由此有两种方案, 方案一选择联络开关 7-20 和 17-32 对失电区供电, 方案二选择联络开关 7-20 和 17-32 对失电区供电。

(5) 对于两种方案, 按照配电网故障恢复流程 4.5 中的步骤(7)分别计算其极值负荷分配比, 两种方案都存在联络开关 17-32 发生安全越限, 按 4.4.3 所述规则进行负荷分配比的调整, 计算负荷分配量, 如表 4.3, 表 4.4 所示。

(6) 对于两种方案, 按照负荷分配量划分失电区域, 在节点 16-17 支路断开, 各失电区域的负荷量最接近于最佳负荷分配量, 计算各联络开关实际分配负荷量, 校验电压越限和电流过载情况, 如表 4.5、4.6 所示。

(7) 该方法以电流越限 2%为合理范围, 两方案最大支路电流越限不超过 1%, 均满足要求。方案二网损较小, 为最佳方案, 方案一为候选方案。按照方案二实施配网重构方案, 断开支路 16-17, 闭合联络开关 11-21 和 17-32, 完成重构, 如图 4.4 所示。

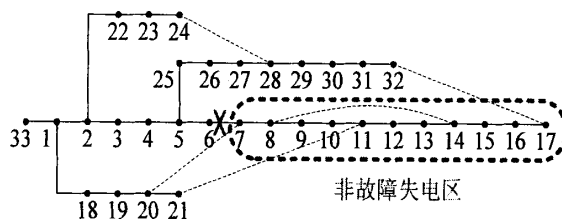


图 4.3 IEEE 33 节点算例故障图

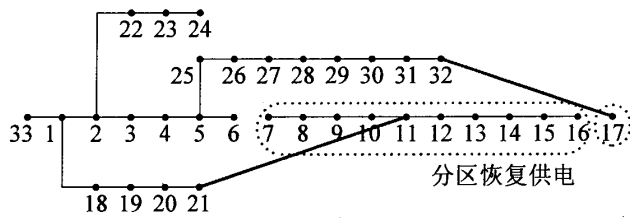


图 4.4 完成重构 IEEE33 节点算例图

表 4.1 非故障失电区数据一览

失电区负荷节点编号	失电区总负荷/kW	失电区总负荷电流/A	失电区相连的 联络开关
7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17	966.29	96.629	7-20, 11-21, 17-32

表 4.2 临界负荷分配比的计算数据

联络开关 节点编号	备用容量 / kW	容量约束下 负荷分配比	电压约束下 负荷分配比	临界负荷 分配比
7-20	87.14	0.9018	3.4076	0.9018
11-21	87.14	0.9018	2.4897	0.9018
17-32	50.83	0.5260	0.1467	0.1467

表 4.3 方案一最优负荷分配比的计算和调整

联络开关编号	极值负荷分配比	最佳负荷分配比	实际分配负荷量/kVA
7-20	0.7483	0.8533	824.56
17-32	0.2517(越限)	0.1467	141.73

表 4.4 方案二最优负荷分配比的计算和调整

联络开关编号	极值负荷分配比	最佳负荷分配比	实际分配负荷量/kVA
11-21	0.6938	0.8533	824.56
17-32	0.3062(越限)	0.1467	141.73

表 4.5 方案一实际负荷分配量与校验情况

联络开关编号	实际分配负荷量 /kVA	网络最低 节点电压/kV	最大支路电流 越限情况	供电恢复后 总网损/kW
7-20	742.37	9.353	0.6%	230.43
17-32	224.72			

表 4.6 方案二实际负荷分配量与校验情况

联络开关 节点编号	实际分配 负荷量/kVA	网络最低节点 电压/kV	最大支路电流 越限情况	供电恢复后 总网损/kW
11-21	742.37	9.352	0.79%	229.93
17-32	224.72			

4.7 本章小结

本章主要讨论配网故障性重构的自愈控制方法，首先介绍故障性重构的基本原理方法，并介绍了故障性重构的目标函数与约束条件，然后针对故障后非故障失电区多线路恢复供电的问题提出一种可行的快速决策方案，利用非失电区网损最小为目标得到极值负荷分配比，以电压电流安全约束得到临界负荷分配比，将两者结合考虑提出最佳负荷分配，接着根据实际网络结构找出与最佳负荷分配最相近的分配方案，调整负荷分配，做出实际负荷分配方案，再通过潮流计算验证该方案是否满足安全经济要求，从而确定合理有效的负荷分配方案，划分失电区域，完成网络故障重构；该方案既满足了快速供电恢复的要求，同时实现供电恢复后配网的运行，算法快速简单有效，通过 IEEE33 节点仿真算例验证了其可行性和有效性。

第 5 章 大型工业企业电网网络重构的应用研究

5.1 引言

发展智能电网是社会经济发展的必然选择。随着低碳经济的发展与清洁能源的开发,电网必须提高其灵活性和兼容性,接纳新能源发电。同时智能电网依托先进的智能化手段不断提高安全防御能力和自愈能力,增强抵御日益频繁的自然灾害和外界干扰能力。智能电网增强系统运行优化能力,降低运营成本,促进节能减排;智能电网对用电设备进行智能控制,尽可能减少用电损耗。钢铁企业作为大型工业企业的重要部分,作为本章研究对象进行重点讨论。

提高企业的电能利用率是构建钢铁企业智能电网的重要目标,钢铁电网安全可靠经济运行是研究钢铁企业智能电网的重要基础,配电网和用电系统是钢铁企业智能电网重要组成部分,钢铁企业节电重点方面主要是降低配电网损耗、提高电能转换效率以及提高资源综合利用率。高效生产传输分配与消费电能是提高电网经济运行的重要手段,可以通过优化发电成本、配电网重构与用电负荷管理,减少网络损耗,降低用电成本,其中配网重构是重要手段之一。

5.2 首钢京唐钢铁企业的电网结构

以首钢京唐钢铁企业为应用研究的例子,首钢京唐钢铁企业的电网结构如下:

(1) 电力网络总体架构。厂区项目建设 2 座 220kV 变电站,每站三台主变,总变电容量 1440MVA,站内 220kV 采用双母线接线,110kV 采用双母线双分段接线,两座 220kV 变电站的 220kV 母线及 110kV 母线均有联络线。正常运行时,站内 220kV 母线长期并联运行,电源与负荷平均分配在各母线上。110kV 变电站 12 座,共计 38 台主变,总装机容量 3033MVA,其中 7 座 110kV 采用双接线方式,其余采用线变组方式,10kV 母线均采用单母分段方式每台变压器带一段 10kV 母线独立运行。

(2) 余能余热发电设施。项目建设 TRT、CDQ、海淡前置发电、烧结余热(规划中)等 7 台余能发电机组,总余能发电装置容量达到 180MVA,所有余能发电机组均采用 10kV 并网方式,同时各机组根据地理位置就近在 110kV 变电站并网,使并网点深入车间负荷中心,缩短供电距离,减少电能损耗,节约成本。全厂自发电能力超过 100%,富余电量外售电网公司,余能余热自发电能力达到 45%。

(3) 能源中心信息化技术。能源管理系统的电力子系统对厂区所有 220kV、110kV、部分 10kV 变电站以及重要用电设备集中监控,电力信息系统 I/O 规模达

到 10 万余点,具有强大的数据信息采集能力,实时采集系统电气数据、事件信号,分析运行报表与历史数据,对供配电系统运行情况进行实时监控,提高系统供电可靠性,降低电网运行成本,为供配电系统的安全可靠经济高效运行提供决策指导,实现变电站少人值守;大幅提高钢铁企业能源系统劳动生产率;电力监控包括所有厂级变电所,进线的开关刀闸、母联开关、接地刀闸,主变压器的有载调压开关,具有遥信、遥控功能,能传输开关状态信号与故障信号,并远程控制开关开闭;对进线电流、功率、电量、母线电压以及系统频率拥有遥测能力;对主变压器低压侧有遥信、遥控功能,能传输开关状态信号与故障信号,并远程控制开关开闭,对主变高低压侧电流、有功无功功率有遥测能力;对馈线开关有遥信能力、遥控功能,对馈线电流、有功无功功率、有功无功电量有遥测能力。1)遥信功能。遥信包括对开关开闭位置以及故障、控制信号的传输。2)遥测功能。遥测信息包括三相交流电压电流,中性点对地电压电流,直流电压电流,有功无功功率,功率因素,变压器温度档位等参数;3)遥控功能。遥控包括对断路器、隔离开关、接地刀闸等控制设备远程操作;以及调节主变压器档位。4)数据归档。归档包括对电流、电压、功率等电气量以及故障、控制信息的短期归档处理数据,和电度量等数据长期归档处理。

5.3 首钢京唐钢铁企业电网部分区域拓扑结构

对首钢京唐钢铁企业电网中 5 个 110kV 区域变电站及其以下 10kV 车间变电所拓扑结构分析,简化为 127 节点(包含电源点数)、184 支路、10 电源点的拓扑图,电源点编号为 1、2、25、26、54、55、88、89、116、121;

图 5.1 表示 1#110kV 区域变电站及以下 10kV 车间变电所拓扑图;

图 5.2 表示 2#110kV 区域变电站及以下 10kV 车间变电所拓扑图;

图 5.3 表示 3#110kV 区域变电站及以下 10kV 车间变电所拓扑图;

图 5.4 表示 4#110kV 区域变电站及以下 10kV 车间变电所拓扑图;

图 5.5 表示 5#110kV 区域变电站及以下 10kV 车间变电所拓扑图;

图中未连接的短红线代表 110kv 区域变电站间 10kv 侧联络线,短红线旁红色数字代表联络的节点编号。

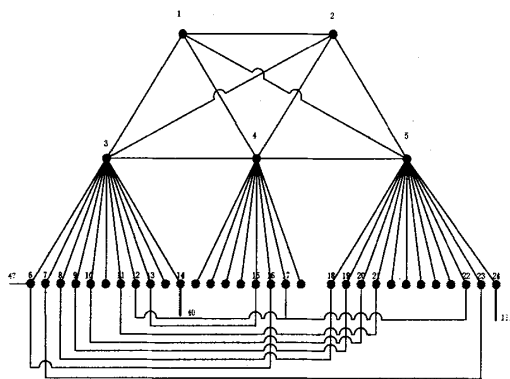


图 5.1 1#110kV 变电站及以下 10kV 车间变电所拓扑图

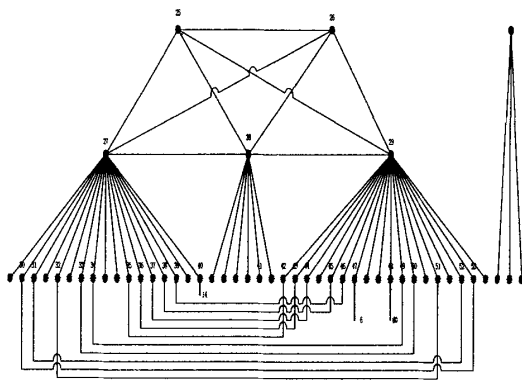


图 5.2 2#110kV 变电站拓扑图

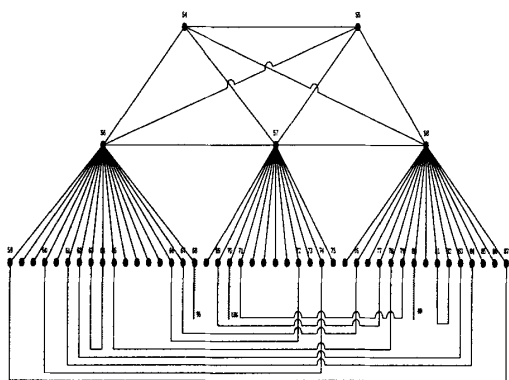


图 5.3 3#110kV 变电站拓扑图

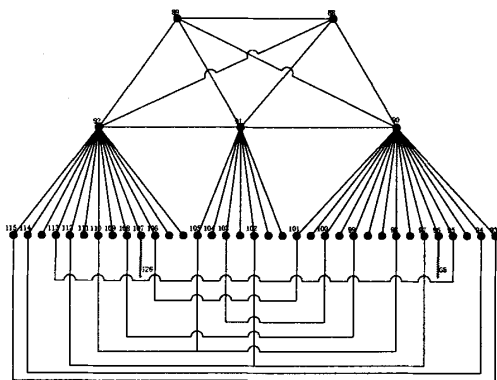


图 5.4 4#110kV 变电站拓扑图

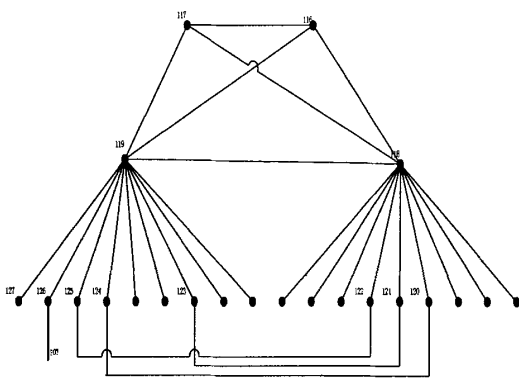


图 5.5 5#110kV 变电站拓扑图

5.4 基于首钢京唐钢铁企业电网经济性重构的仿真算例

将 5.3 节所述首钢京唐钢铁企业 5 个 110kV 变电站及以下 10kV 配电网作为分析对象，进行经济性重构的应用研究。按照首钢京唐电力系统运行方式，电源点电压标幺值为 1，进行潮流计算得出网络节点电压幅值如图 5.6。

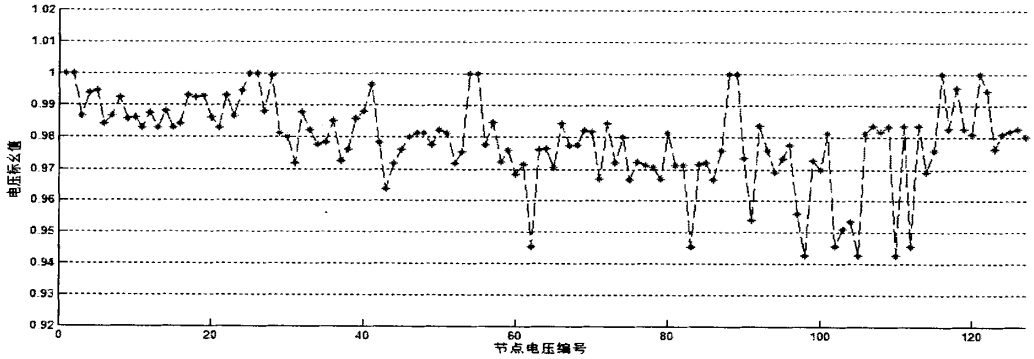


图 5.6 常规运行方式下节点电压幅值图

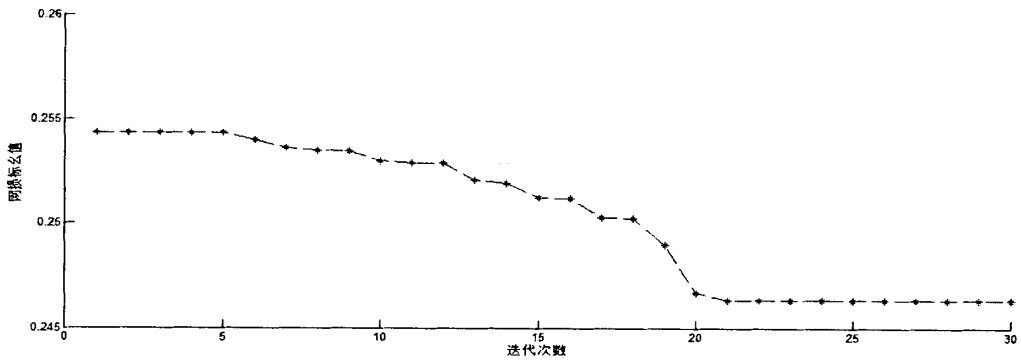


图 5.7 算法迭代结果图

算法迭代结果图 5.7 分析，计算到第 21 代收敛于最优解 0.2463，计算时间为 43.81s，计算机处理器型号为 Intel(R)core(TM)2 Duo CPU T6400 @ 2.00GHz，内存(RAM): 2.00GB，系统类型为 32 位操作系统。

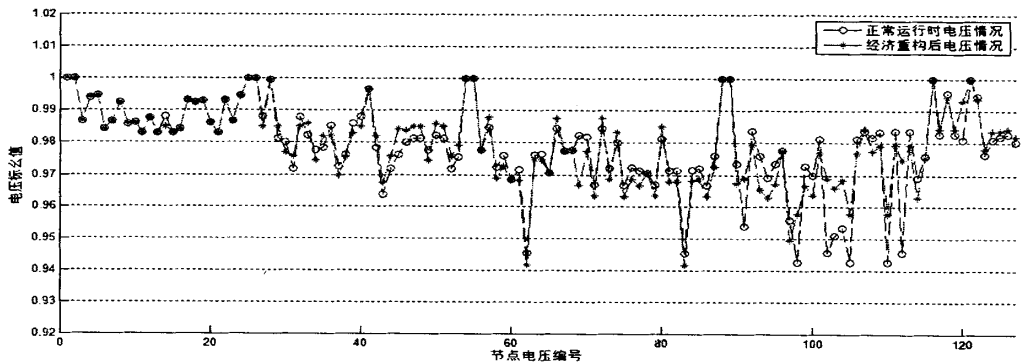


图 5.8 经济性重构后网络电压幅值与正常运行时比较图

通过表 5.1 经济性网络重构结果分析,目标函数值(网损标么值)有所下降,由常规运行方式下的 0.2544 下降到经济性网络重构后的 0.2463;节点电压水平得到一定改善,如图 5.8,电压偏移率下降 1.44%,网络得到优化,系统更加安全可靠经济的供电。

表 5.1 经济性重构与正常运行网损与电压水平比较

运行方式	网损情况	网损降低率	电压偏移率	电压偏移率降低百分比
正常运行	0.2544	/	0.0209	/
经济性重构后	0.2463	3.18%	0.0206	1.44%

大型工业企业电网正常运行时,为了保证经济可靠运行,已经工作在相对较优的位置上,从算法角度而言,初始解已为局部最优解,为了寻找更优解,算法需要扩大搜寻范围,提高避免陷入局部最优的能力,仿真结果证明该算法迭代收敛好,计算结果精度高,重构后对系统网络损耗和电压水平得到一定改善;由于经济性重构对计算时间要求比较宽松,该算法的计算时间在合理范围内。

5.5 基于首钢京唐钢铁企业电网故障性重构的仿真算例

对于首钢京唐钢铁企业电网的故障性重构的应用,本节采用 1#110kV 变电站 3 号 10kV 母线段及其以下所带车间变电所负荷节点(即图示 A 区)作为故障重构的研究对象,如图 5.9,分析 A 区故障性重构问题。图中,节点间连接为实线代表支路闭合,虚线代表断开。线路上标有叉号(1-3, 2-3, 3-4)代表该线路断开,不能参与重构。

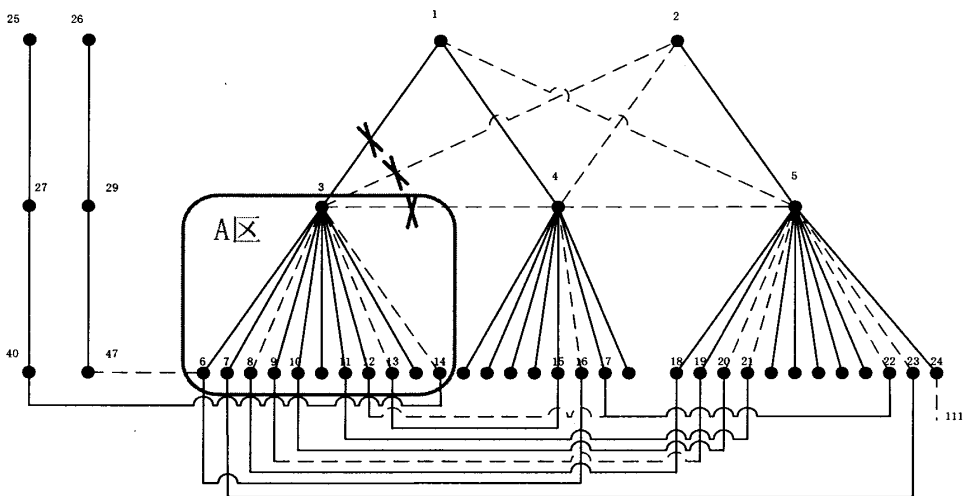


图 5.9 故障性重构前网络示例图

在电网正常运行时，1号电源点对3号母线段供电，因为采用双线路供电，即使1号电源点对3号母线供电发生故障，可以立即通过2号电源点进行供电，必要时也可通过3-4号母联开关闭合对A区负荷恢复供电。但在某些极端情形下，如图5.9所示，3号电源进线变压器发生故障(即1-3，2-3都无法闭合，1、2电源点无法直接对节点3供电)，同时10kv侧母联开关3-4无法正常闭合，3号母线及以下负荷所带负荷将失电，失电节点编号有3、6、7、9、10、11、12、40、23、16、20、21，组成非故障失电区，见表5.2，总失电负荷电流为0.9709，非故障失电区需要通过与这些失电节点相连的联络线对其恢复供电。

表 5.2 失电区节点编号与总失电负荷量

断开的故障支路	失电节点编号	失电总负荷电流	不参与重构支路
1-3	3, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 40, 23, 16, 20, 21	0.9079	2-3, 3-4

通过表 5.3 分析可知，总共有 4 个电源点(电源编号为 1, 2, 25, 26)、10 条供电路径对失电区负荷供电，临界负荷分配比指该供电路径所承受最大新增负荷量占总失电区负荷量的比值，其值大于 1 表示该供电路径可以单独恢复所有失电区负荷的供电，所以 1-4-16、2-5-23、2-5-20 三条供电路径可以采用单条供电路径对非故障失电区恢复供电；

表 5.3 恢复供电路径列表及其临界负荷比

电 源 点	供电路径	联络开关	阻抗 标幺值	联络开关 节点电压	电压约束 负荷分配 比	容量约束 负荷分配 比	临界负荷 分配比
26	26-29-47	47-6	0.0268	0.9787	1.0259	0.3231	0.3231
25	25-27-40-14	14-3	0.0374	0.9851	0.8990	0.4883	0.4883
	1-4	4-16	0.0231	0.9947	1.8536	1.7701	1.7701
1	1-4-15-13	13-3	0.0689	0.9859	0.4491	0.9050	0.4491
	1-4-17	17-12	0.0857	0.9931	0.4817	0.8350	0.4817
	2-5	5-23	0.0257	0.9790	1.0809	1.6870	1.0809
	2-5	5-21	0.0257	0.9736	0.8796	1.6870	0.8796
2	2-5	5-20	0.0257	0.9782	1.0511	1.6870	1.0511
	2-5-19	19-9	0.0609	0.9903	0.6339	1.0279	0.6339
	2-5-18-8	8-3	0.0536	0.9902	0.7202	1.0051	0.7202

除采取单供电路径供电恢复方案，也可采用多供电路径供电恢复方案，当采

用多供电路径供电恢复方案, 保证使各供电路径的临界负荷分配比之和大于 1。本节分为单供电路径供电恢复方案(第一组方案)和多供电路径供电恢复方案(第二组方案), 第一组方案由 3 个供电恢复方案, 第二组方案有 4 个供电恢复方案, 分析验证后得出其中最优可行方案和备选方案, 并得出其优势与缺陷, 供运行调度人员参考选取。

(1)第一组方案: 单条供电路径对失电区恢复供电。

方案 1.1: 闭合联络开关 5-23, 通过单供电路径 2-5-23 对失电区负荷恢复供电, 重构后网络节点电压与原正常运行时电压比较, 如图 5.10;

方案 1.2: 闭合联络开关 5-20, 通过单供电路径 2-5-20 对失电区负荷恢复供电, 重构后网络节点电压与原正常运行时电压比较, 如图 5.11;

方案 1.3: 闭合联络开关 4-16, 通过单供电路径 1-4-16 对失电区负荷恢复供电, 重构后网络节点电压与原正常运行时电压比较, 如图 5.12;

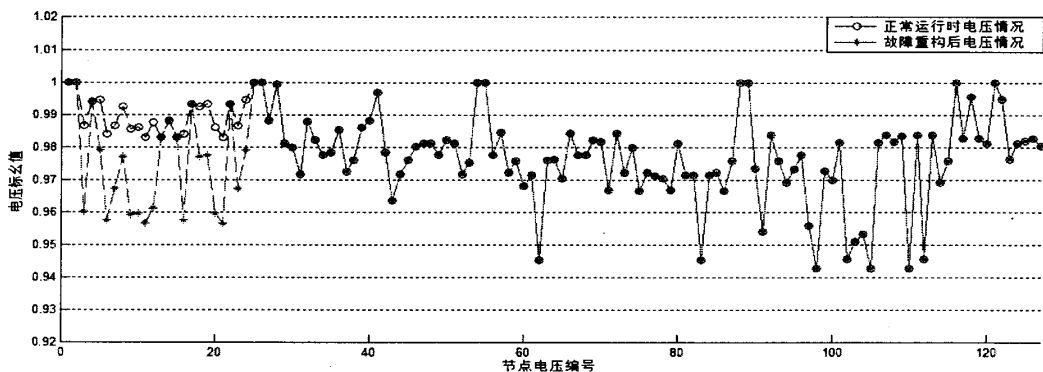


图 5.10 方案 1.1 重构后节点电压与正常时电压比较图

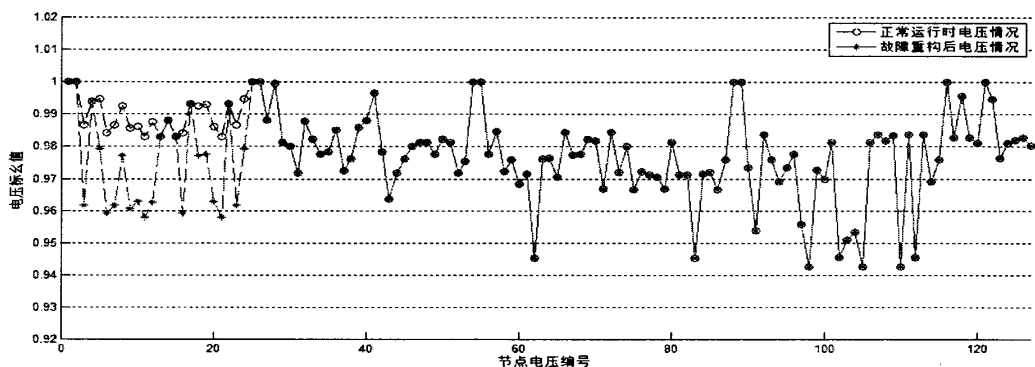


图 5.11 方案 1.2 重构后节点电压与正常时电压比较图

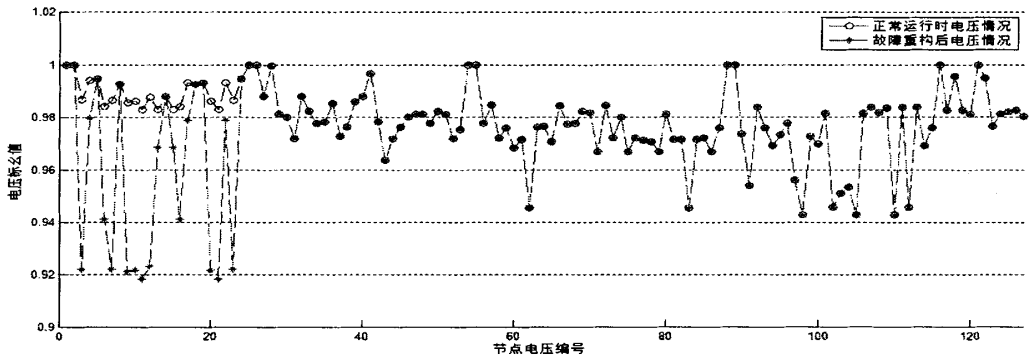


图 5.12 方案 1.3 重构后节点电压与正常时电压比较图

由表 5.4 数据分析可知，单条供电路径对失电区恢复供电，一般都要比正常运行时网损大，并且节点电压偏移增大。方案 1.1 和方案 1.2 的电压偏移率相当，但方案 1.2 的网损比方案 1.1 小，所以，方案 1.2 优于方案 1.1；而方案 1.3 网损增幅和电压偏移率增幅都比较大，舍弃该方案。

总而言之，当只考虑单条供电路径恢复供电时，方案 1.2 可作为首选方案，而方案 1.1 可作为备选方案参考。

表 5.4 第一组恢复供电方案的网损与电压偏移率比较

重构方案	正常运行	方案 1.1	方案 1.2	方案 1.3
网损大小	0.2544	0.2729	0.2717	0.2966
网损增幅	/	7.27%	6.80%	16.59%
电压偏移率	0.0209	0.0237	0.0237	0.0267
偏移率增幅	/	13.40%	13.40%	27.75%

(2)第二组方案，采用多供电路径对非故障失电区恢复供电：

方案 2.1：闭合联络开关 4-16 和 5-21，通过双供电路径 1-4-16 和 2-5-21 对失电区负荷恢复供电，根据表 5.5 数据计算其极值负荷分配比，并结合该供电路径的临界负荷分配比，得出最优分配负荷；然后根据网络拓扑结构，调整各个供电路径所带负荷，即为实际分配负荷，见表 5.6。

方案 2.2：闭合联络开关 4-16 和 5-20，通过双供电路径 1-4-16 和 2-5-20 对失电区负荷恢复供电，同方案 2.1 运算过程，见表 5.6。

方案 2.3：闭合联络开关 4-16, 5-21 和 47-6，通过三条供电路径 1-4-16, 2-5-21 和 26-29-47 对失电区负荷恢复供电，同方案 2.1 运算过程，见表 5.6。

方案 2.4：闭合联络开关 47-6, 14-13, 4-16 和 5-23，通过四条供电路径 26-29-47-6、25-27-40-14-3、1-4-16、2-5-23 对失电区恢复供电，同方案 2.1 运算过程，见表 5.6。

表 5.5 供电路径极值负荷分配比所需参数

电 源 点	供电路径	联络开关	供电路径 电压降	供电路径 阻抗角余弦	供电路径 电阻
26	26-29-47	47-6	0.0187	0.9644	0.3100
25	25-27-40-14	14-3	0.0170	0.9555	0.4080
	1-4	4-16	0.0060	0.9642	0.2690
1	1-4-15-13	13-3	0.0170	0.9705	0.8090
	1-4-17	17-12	0.0067	0.9685	1.0040
	2-5	5-23	0.0053	0.9582	0.2980
	2-5	5-21	0.0053	0.9582	0.2980
2	2-5	5-20	0.0053	0.9582	0.2980
	2-5-19	19-9	0.0068	0.9560	0.7040
	2-5-18-8	8-3	0.0074	0.9547	0.6190

表 5.6 多供电路径恢复供电方案列表及其实际负荷分配

方案	闭合联络 开关	极值 负荷 分配比	最优 分配 负荷	实际分配 负荷	实际负荷 分配比	断开分段 开关
方案 2.1	4-16	0.5248	0.4765	0.5721	0.6301	3-11
	5-21	0.4752	0.4314	0.3358	0.3899	
方案 2.2	4-16	0.5248	0.4765	0.5859	0.6460	3-10
	5-20	0.4752	0.4314	0.3220	0.3540	
方案 2.3	4-16	0.3939	0.3576	0.1140	0.1256	6-16
	5-21	0.3077	0.2794	0.3358	0.3699	3-11
	47-6	0.2984	0.2709	0.4581	0.5046	
方案 2.4	4-16	0.2927	0.2657	0.1140	0.1256	6-16
	5-21	0.2655	0.2410	0.3358	0.3699	3-11
	47-6	0.2443	0.2218	0.0107	0.0118	3-6
	14-3	0.1975	0.1793	0.4474	0.4927	

由表 5.7 数据分析可知, 方案 2.1 的网损最小, 方案 2.4 电压水平最高, 但开关动作次数多, 当不计开关操作损耗时可以考虑; 将表 5.7 与表 5.4 比较可知, 多条供电路径对非故障失电区恢复供电, 重构后的网络损耗和电压偏移明显低于

单条供电路径的重构，所以可以得出方案 2.1 网络网损最小，电压水平比较高，开关操作次数 3 次在合理范围，可以作为首选方案；在故障恢复过程中，较高的电压水平能较好地抵御风险，保证电网安全可靠供电，其重要性高于网损增量，当不计开关操作损耗，系统智能化水平较高，能快速准确开闭相应联络开关和分段开关，并且对系统电网电压水平和安全供电要求高，可以考虑采用方案 2.4，而对方案要求操作简单，开关动作次数少，对系统网损与电压水平要求不高，则采用方案 1.2。

表 5.7 第二组恢复供电方案的网损与电压偏移率比较

方案	正常运行	方案 2.1	方案 2.2	方案 2.3	方案 2.4
网损大小	0.2544	0.2565	0.2688	0.2653	0.2615
及其增幅	/	0.82%	5.66%	4.28%	2.79%
电压偏移	0.0209	0.0230	0.0241	0.0228	0.0222
及其增幅	/	10.05%	15.31%	9.09%	6.22%
操作次数	/	3	3	5	7

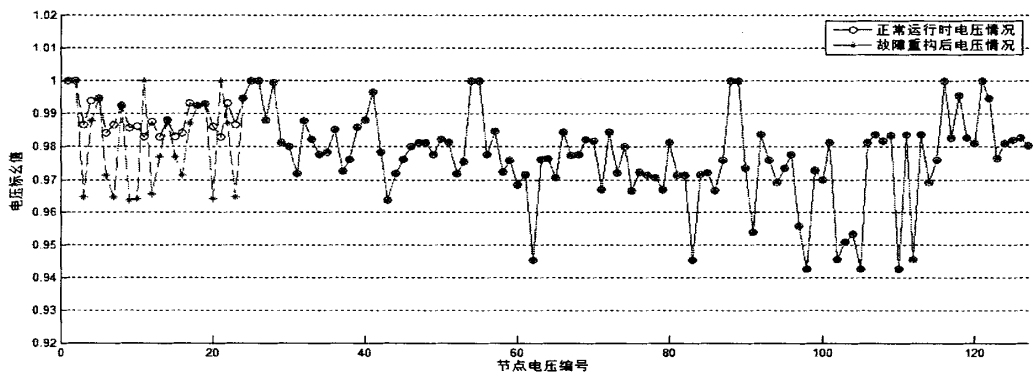


图 5.13 方案 2.1 重构后节点电压与正常时电压比较图

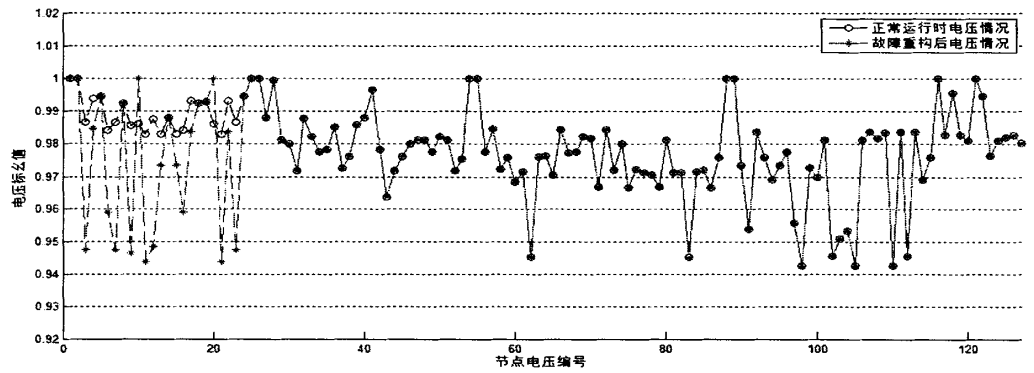


图 5.14 方案 2.2 重构后节点电压与正常时电压比较图

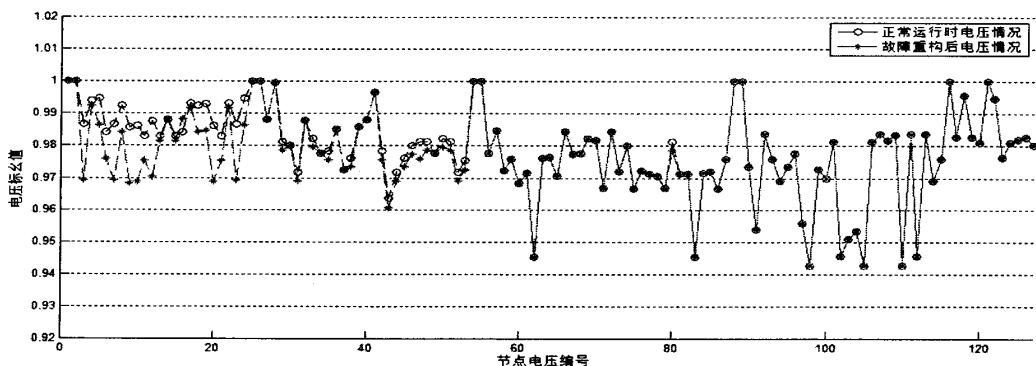


图 5.15 方案 2.3 重构后节点电压与正常时电压比较图

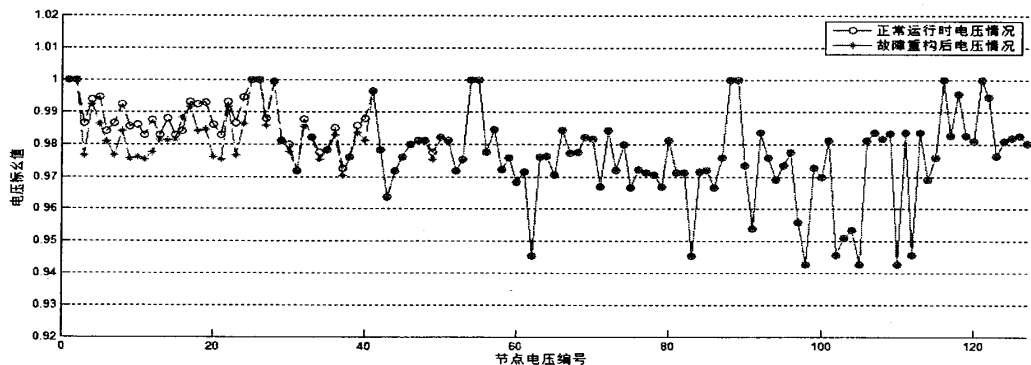


图 5.16 方案 2.4 重构后节点电压与正常时电压比较图

5.6 本章小结

本章简要介绍了首钢京唐钢铁企业电网架构情况，对首钢京唐钢铁企业电网中 5 个 110kV 区域变电站及其以下 10kV 车间变电所拓扑结构分析，对其作为仿真研究算例，进行经济性重构和故障性重构的自愈控制方法研究。

根据首钢京唐钢铁企业电网运行方式，利用基于多榜样系统的粒子群算法进行经济性重构，有效避免早熟现象和不可行解产生问题，提高计算效率，优化电网运行，得出重构方案比原常规运行网损下降 3.18%，电压偏移率下降 1.44%，取得良好效果，验证其算法的有效性。

接着，对 1#110kV 区域变电站 10kV 侧 1 段丢失电源(110kV/10kV 变压器故障、10kV 侧母联开关不能正常闭合)为研究对象，对非故障失电区恢复供电，进行故障性重构，提供多种恢复供电方案。通过计算临界负荷分配比，快速确定单条供电路径恢复供电方案，当单条线路供电无法满足电网高电压水平、均衡负荷、较小网损增幅的要求时，采用多供电路径恢复供电方案，计算多条线路组合下极值负荷分配，并结合实际电网架构，划分失电区完成重构，并通过潮流计算验证其电压水平和网损增幅；最后结合网损增幅、电压水平、开关操作次数分析其优劣，确定出最优和备选方案供运行调度人员参考，仿真验证算法快速有效。

结论与展望

本文以大型工业企业电网提高供电电压水平、减少网络损耗、增强供电可靠性和快速恢复供电为研究背景，结合经济性重构和故障性重构的自愈控制技术，进行理论研究和仿真计算。

(1)分析大型工业企业电网的特点，大型工业企业电网输电距离短，负荷集中，车间变电所存在两条或多条电源进线，存在多种供电形式，供电可靠性比较高，拥有自备电厂以及余热、余压等中小型发电机以及其他分布式电源，大型工业企业电网的工业负荷，常常具有非线性、冲击性、间歇性等突出特点，电网的供电电能质量和供电可靠性的要求很高。

(2)提出基于多榜样系统粒子群算法的经济性重构自愈控制方法，重点分析运用粒子群算法进行配电网经济性重构时存在两个问题：“早熟”和粒子更新中产生大量不可解的现象，采用多榜样系统和调整速度惯性系数的方法来处理早熟现象，多榜样系统粒子群算法产生多中心的粒子更新系统，粒子随机选择榜样系统中粒子作为更新手段，增大搜索范围，增强了抗早熟的能力，降低陷入局部最优解的风险；而采用环网编码方式和电力孤岛搜索方式处理粒子更新中产生大量不可行解的问题，保证迭代粒子产生可行解。

(3)提出配电网故障后多线路恢复供电的负荷分配方法，针对故障后非故障失电区多线路恢复供电的问题，以电压电流安全约束得到临界负荷分配比，确定可以单供电路径恢复供电的决策，未能满足要求，则按照所选供电路径临界负荷分配比之和大于1选择多条供电路径同时供电，利用非失电区网损最小为目标得到极值负荷分配比，结合考虑提出最佳负荷分配，接着根据实际网络结构找出与最佳负荷分配最相近的分配方案，调整负荷分配，做出实际负荷分配方案，再通过潮流计算验证该方案是否满足安全经济要求，从而确定合理有效的负荷分配方案，划分失电区域，完成网络故障重构；该方案避免多次潮流计算方案，只需在方案确定后验证其是否满足要求，既满足了快速供电恢复的要求，同时实现供电恢复后配网的运行。

(4)将首钢京唐钢铁企业电网5个110kV区域变电站及其以下的10kV变电所作为仿真研究算例，分析算法的有效性和可行性。根据首钢京唐钢铁企业电网运行方式，利用基于多榜样系统的粒子群算法进行经济性重构，有效避免早熟现象和不可行解产生问题，提高计算效率，优化电网运行，得出重构方案比原常规运行网损和电压水平得到一定改善；对首钢京唐钢铁企业电网1#110kV区域变电站

10kV 侧 1 段丢失电源(110kV/10kV 变压器故障、10kV 侧母联开关不能正常闭合)为研究对象,对非故障失电区恢复供电,进行故障性重构,提供多种恢复供电方案,结合网损增幅、电压水平、开关操作次数分析其优劣,确定出最优和备选方案供运行调度人员参考,仿真验证算法快速有效。

本文对大型工业企业电网自愈控制技术做了初步的研究,取得了一定的成果,但自愈控制技术内涵丰富,需要更加深入的研究和分析。

(1)大型工业企业电网存在很多分布式电源,可以考虑在极端情况下,由分布式电源带重要负荷短时孤网运行。

(2)本文提出的配电网故障后多线路恢复供电的负荷分配方法,只考虑在一级馈线下实现快速恢复供电的方案,还需要进一步考虑当一级馈线供电不足,选择次级馈线转供。

参考文献

- [1]贾东梨, 孟晓丽, 宋晓辉. 智能配电网自愈控制技术体系框架研究. 电网与清洁能源, 2011, 7(2): 14-18
- [2]董旭柱, 黄邵远, 陈柔伊. 智能配电网自愈控制技术. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 17-21
- [3]黎春渥. 大型工业企业智能电网构建研究: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学电气工程学院, 2012
- [4]袁鹏, 郭创新, 王康元. 调控一体化下的配电网自愈研究. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 150-154
- [5]张浩. 配电网协同保护与自愈控制研究: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2012
- [6]刘健, 鹏翔, 董海鹏. 复杂配电网简化分析与优化. 北京: 中国电力出版社, 2002, 183-245
- [7]Shirmohammadi Dariush, Hong H Wayne. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, (2): 492-1498
- [8]Go swam i S K, asu S K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1484-1491
- [9]邓佑满, 张伯明, 相年德. 配电网重构的改进最优流模式算法. 电网技术, 1995, 19(7): 47-50
- [10]Hsiao-Dong Chiang, Jean-Jumeau R. Optimal network reconfigurations in distribution systems I. A new formulation and a solution methodology. IEEE Transon Power Delivery, 1990, 5(4): 1902-1909
- [11]胡敏蓓, 陈元. 配电系统最优网络重构的模拟退火算法. 电力系统自动化, 1994, 18(2): 4-28
- [12]李源. 考虑多种负荷方式的配电网重构算法研究: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2008
- [13]彭伊伊. 基于粒子群算法的配电网恢复重构的研究: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2012
- [14]J Nahman, G Strbac. A new algorithm for service restoration in large-scale urban distribution system. Electric Power Systems Research, 1994, 29: 181-192
- [15]T Nagata, H Sasaki, R Yohoyama. Power system restoration by joint usage of expert

- system and mathematical programming approach. IEEE Trans on Power System, 1995, 10(3): 1473~1479
- [16]Aoki K, Satoh T, Itoh M, et al. Voltage crop constrained restoration of supply by switch operation in distribution systems. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(3): 1267~1274
- [17]Morelato A L, Monticelli A. Heuristic search approach to distribution system restoration. IEEE Trans on Power Engineering Review, 1989, 4(4): 2235-2241
- [18]Talor T, Lnbkeman D. Implementation of heuristic search strategies for distribution feeder reconfiguration. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(1): 239-246
- [19]Wu J S, Tomsovic K L, Chen C S. A heuristic search approach to feeder switching operations for overload, faults, unbalanced flow and maintenance. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(4): 1579-1585
- [20]Miu K M, Hsiao-Dong Chiang, Bentao Yuan, et al. Fast service restoration for large-scale distribution systems with priority customers and constraints. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 789-795
- [21]杨明帷, 黄单鲋. 配电网供电恢复决策的实时计算方法. 电力系统自动化, 2000, 24(5): 45-48
- [22]Susheela Deni V, Anandalingam. Optimal restoration of power supply in large distribution systems in developing Countries. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(1): 430-438
- [23]吴文传, 张伯明. 基于待恢复树切割的配电网故障恢复实时算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 50-54
- [24]张浩, 和敬涵, 薄志谦等. 基于动态规划算法的故障恢复重构[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 162-167
- [25]Yuan Yih Hsu, Han Ching Kui. A heuristic based fuzzy reasoning approach for distribution system service restoration. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(2): 948~953
- [26]颜萍, 顾锦汶, 张广. 一种快速高效的配电网供电恢复算法. 电力系统自动化, 2000, 24(4): 52-56
- [27]胡雯, 孙云莲, 张巍. 基于改进的自适应遗传算法的智能配电网重构研究. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 85-90
- [28]Brcas N G, Delbem A C B, de Carvalho A. Optimal energy restoration for general distribution system by genetic algorithms. International Conference on Power System Technology, 1998, 1: 43~47

- [29]Kyeong Jun Mun, Park J H, Hyung Su Kim, et al. Development of real-time-service restoration system for distribution automation system. In: IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Pusan: IEEE, 2001, 3: 1514~1519
- [30]Irving M R, Luan W P, Danial J S. Supply restoration in distribution networks using a genetic algorithm. Electrical Power and Energy Systems 2002, 10: 447~457
- [31]Tsai Men-Shen, Liu Chen-Ching, Mesa Vicente N, et al. IOPADS(intelligent operational planning aid for distribution systems). IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1562-1569
- [32]Jung Kyung-Hee, Kim Hoyong, Ko Yunseok. Network reconfiguration algorithm for automated distribution systems based on artificial intelligence approach. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(4): 1933-1941
- [33]葛朝强, 唐国庆, 王嘉. 综合智能式的故障恢复专家系统——与故障恢复算法集相结合的 G 学习模糊专家系统. 电力系统自动化, 2000, 24(2): 17-21.
- [34]KyungHee Jung, Hoyong Kim, Yunseok Ko. Network reconfiguration algorithm for automated distribution systems based on artificial intelligence approach. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(4): 1933~1941
- [35]Tsai M S, Liu C C, Mes V N, et al. IOPADS(Intelligent operational planning aid for distribution systems). IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(3): 1562-1569.
- [36]臧天磊, 钟佳辰, 何正友等. 基于启发式规则与熵权理论的配电网故障恢复. 电网技术, 2012, 36(5): 252-257
- [37]张利民, 马强, 李振坤等. 基于禁忌克隆遗传算法的配电网故障恢复重构. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(1): 60-64
- [38]黄弦超, Gareth TAYLOR. 基于节点深度编码技术的配电网故障恢复. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 40-44
- [39]刘健, 倪健立. 配电自动化新技术. 北京: 中国水利水电出版社, 2004, 145-174
- [40]张心洁, 葛少云, 刘洪等. 智能配电网综合评估体系与方法. 电网技术, 2014, 38(1): 40-46
- [41]乐秀璠, 杨成峰, 徐青山. 配电网故障恢复及负荷平衡的重构算法研究. 电网技术, 2002, 26(7): 34-37
- [42]郑兰, 别朝红, 王秀丽. 一种快速启发式配电网故障恢复算法[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(2): 16-19.
- [43]陈根军, 李繼洸, 唐国庆. 基于 Tabu 搜索的配电网重构算法. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 28-33.
- [44]Hsiao-Dong Chiang, Rene Jean-Jumeau. Optimal network reconfigurations in

- distribution systems II solution algorithms and numerical results. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(3): 1568-1574
- [45]王峥, 田文树, 罗彦青. 基于分层供电树的配电网供电恢复算法[J]. 电力科学与工程, 2008, 24(2): 43-46
- [46]李航, 刘西洋, 陈平. 自愈系统构架构建方法研究. 系统工程与电子技术, 2007, 29(2): 291-293
- [47]袁鹏, 郭创新, 王康元. 调控一体化下的配电网自愈研究. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 150-154
- [48] Ciric R M, Popovic D S. Multi-objective distribution network restoration using heuristic approach and mix integer programming method. Electrical Power and Energy Systems, 22(2000): 497~505
- [49]Narimani M R, Vahed A A, Azizipanah-Abarghooee R, et al. Enhanced gravitational search algorithm for multi-objective distribution feeder reconfiguration considering reliability, loss and operational cost. Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(1): 55-69
- [50]Men-Shen Tsai, Fu-Yuan Hsu. Application of grey correlation analysis in evolutionary programming for distribution system feeder reconfiguration. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 1126-1133

致谢

本论文是在导师黄纯教授的悉心指导下完成的，论文从选题到完成，每一步都倾注了导师大量的心血。导师渊博的专业理论知识，严谨的治学态度，细致的工作作风，诲人不倦的高尚师德，朴实无华、平易近人的人格魅力对我产生深远影响，使我不但在专业理论知识和仿真计算分析能力有了长足进步，而且在求知态度和为人处事等方面有了很大提高，这些所学知识和培养的能力将会使我在未来的学习、工作、生活中受益匪浅。在此，谨向导师表示崇高的敬意和衷心的感谢！

这些三年来的研究生生活，离不开各位老师、同学和朋友的关心和帮助，论文顺利完成，在此感谢实验室的同门师兄弟的热心帮助和支持！

最后，感谢我的家人，在我近二十年的求学之路上，正是你们无微不至的关心和鼓励使我坚持不懈地完成学业，我将铭记终生。

感谢所有关心支持我的老师、亲人、同学和朋友，感谢母校湖南大学！

附录 A 攻读学位期间发表的学术论文目录

- [1]黄纯,凌理远,曹一家,等.配电网故障后多线路供电恢复的负荷分配计算方法.
专利申请号:201310139681.5,公开号 CN103259261A.
- [2]凌理远,黄纯.配电网故障后多线路供电恢复的负荷分配计算方法.中国自动化大会暨自动化领域协同创新会议(CAC2013).