

# 配电网电源侧故障下大范围负荷转移优化策略及实现方法

朱国防<sup>1</sup>, 高厚磊<sup>1</sup>, 徐丙垠<sup>2</sup>, 李天友<sup>3</sup>

(1. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南 250061; 2. 山东理工大学, 山东 淄博 255049;  
3. 福建省电力公司, 福建 福州 350003)

**摘要:** 配电网电源侧故障下大范围负荷转移优化策略及实现方法是馈线自动化的延伸, 对提高配电网供电可靠性具有重要意义。首先定义了母线失压类型, 进而把大范围停电问题分解为不同类型的母线失压问题。然后提出了不同类型母线失压的大范围负荷安全转移优化策略, 再把母线失压的大范围负荷转移问题转化成了等效馈线故障恢复问题和站内负荷转移问题。最后提出了大范围负荷安全转移方案生成方法, 给出了各个模块的实现框图。该研究为配电网电源侧故障大范围负荷转移走向实用化提供方法和技术支撑。

**关键词:** 配网自动化; 电源侧故障; 母线失压; 大范围负荷转移; 等效馈线故障

## Wide range of load transfer optimization strategy and its implementation method for the busbar voltage loss in distribution network

ZHU Guo-fang<sup>1</sup>, GAO Hou-lei<sup>1</sup>, XU Bing-yin<sup>2</sup>, LI Tian-you<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education (Shandong University), Jinan 250061, China; 2. Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;  
3. Fujian Electric Power Company Limited, Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** The optimization strategy for wide range of load transfer and its implementation in distribution networks during power supply side failure is the extension of feeder automation. It will be of great significance to improve the reliability of distribution network. Firstly, the paper defines the types of busbar voltage loss. Thus the problem of large scope blackout is decomposed into different types of busbar voltage loss problems. After that the optimization strategy for wide range of load transfer of different types of busbar voltage loss is proposed, where the wide range of load transfer problem is transformed into the problems of fault recovery of equivalent feeders and load transfer within the substation. Finally, a scheme of a wide range of load transfer is investigated and the flowchart of each module is given. This research provides a method and technical support for the application of wide range of load transfer under busbar voltage loss in distribution networks.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050213).

**Key words:** distribution automation; power side failure; busbar voltage loss; wide range of load transfer; equivalent feeder fault

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)05-0073-05

## 0 引言

供电可靠性是考核供电系统质量的主要指标, 提高供电可靠性是智能电网建设, 特别是智能配电网建设的核心动力之一。在智能配电网的建设中,

随着馈线自动化功能的实用化, 配电自动化系统有效缩短了配电网发生故障后非故障区段的失电时间, 配电自动化系统成为了提高配电网供电可靠性的重要手段<sup>[1-4]</sup>。

馈线自动化是配电自动化系统的核心功能之一, 可以实现配电网事故状态下的故障检测、故障隔离和供电恢复功能。其中配电网供电恢复是一个多目标非线性约束问题。在该问题的解决方法中, 人工智能算法<sup>[5-8]</sup>和启发式搜索算法<sup>[9-14]</sup>最为普遍, 许多论文对这两种方法进行了深入研究。虽然人工

**基金项目:** 国家 863 高技术基金项目 (2012AA050213); 国家电网公司科技项目资助 (031 [2012] 19); 山东省中青年科学家科研奖励基金 (BS2011 DX015); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20120131120015)

智能算法能够形成较优恢复方案,但是迭代次数多,计算量大,无法满足配电网供电可靠性的要求。启发式搜索方法搜索速度快,能够迅速实现故障恢复。在实际的工程中,为了进一步提高供电恢复方案的生成速度,一般采用简化的启发式搜索方法,实现在 5~10 s 以内生成供电恢复方案。

变电站母线失压、主变故障等电源侧故障涉及停电用户多,影响范围大,虽然发生次数少,但同样受到电力部门的重视。随着用电负荷的日益增长,在用电高峰期发生电源侧故障,往往单靠变电站内部备用容量无法恢复所有的负荷。随着馈线联络率的提高,通过馈线外部联络开关实现大范围的负荷安全转移以应对变电站内部备用容量不足问题成为了可能。

与馈线故障后的供电恢复问题相比,电源侧故障大范围负荷转移问题所涉及的范围更大。因为每条母线所接的馈线一般在 8~12 条,电源侧故障大范围负荷转移相当于多个馈线故障供电恢复问题的叠加。若把电源侧故障大范围负荷转移问题也看做一个多目标非线性约束问题,直接采用人工智能算法和启发式搜索算法生成其大范围负荷转移方案,则问题的维度和搜索空间成几何级数上升,使快速生成十分困难。

本文以配电网电源侧故障大范围负荷安全转移优化策略为主要研究内容,首先对电源侧故障即母线失压的进行分类,把大范围停电问题转化为母线失压问题;然后提出母线失压转化为馈线故障供电恢复问题原则,把电源侧故障转化为馈线故障的组合;最后给出大范围负荷转移方案生成方法。本文通过把大范围停电转化为母线失压问题,把母线失压问题转化为馈线故障问题,最终可以实现配电网电源侧故障下大范围负荷转移方案的快速生成。

### 1 母线失压分类

由于种种原因,配电网中往往会出现电源侧故障,造成相应的母线失压。配电网中变电站低压侧常见母线接线方式有:单母线二分段、单母线三分段、单母线四分段(负荷均分)和单母线六分段环形接线等<sup>[15]</sup>。不同分段之间通过母联开关实现变电站内部备用。

为了便于形成大范围负荷转移策略,对变电站低压母线上的馈线根据联络电源的类型分为:有外部联络电源馈线(如图 1 中 L2 馈线)和无外部联络电源馈线两大类。对于三变压器以上变电站,根据与不同母线的联络关系,无外部联络电源馈线又可以分为站内备用母线转供馈线和站内非备用母

转供馈线两种。站内备用母线转供馈线指无其他变电站联络电源,馈线所带负荷只能靠母联或馈线联络开关由备用母线(相邻母线)转供的馈线。如图 1 所示, I 母失压后, L1、L3、L5 和 L6 馈线都属于站内备用母线转供馈线。站内非备用母线转供馈线指无其他变电站联络电源,馈线所带负荷可以通过非备用母线转供的馈线(如图 1 所示, I 母失压后的 L4, 可以通过非相邻母线 IV 实现转供),与站内备用母线转供馈线区别在于:站内非备用母线转供馈线肯定有馈线联络开关,且馈线联络开关背后的母线不是与本母线通过母联开关直接连接的备用母线。

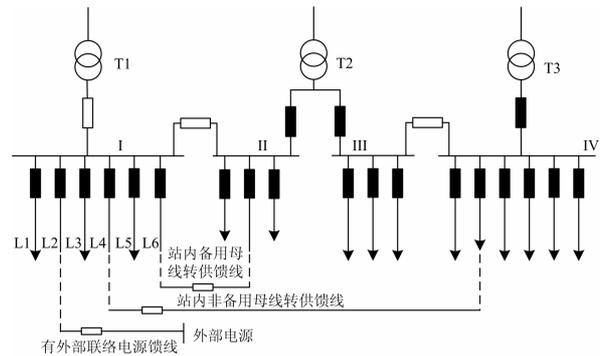


图 1 馈线分类示例

Fig. 1 Backup source example of feeders

根据有无站内电源的支援情况,对于因电源故障引起的母线失压等大范围停电可以进行如下分类:无站内负荷转移母线失压和有站内负荷转移母线失压两种。例如:若在图 1 所示的在负荷均分接线方式中 T1 和 T2 变压器失压导致 I、II、III 母失压, I 母和 II 母属于无站内负荷转移母线失压,既无外部联络电源的馈线又无 T3 变压器转供的馈线无法恢复供电; III 母属于有站内负荷转移母线失压, IV 母是其备用母线,可以提供转变电站内部负荷转移,实现全部或部分馈线恢复供电。再例如:全站失压则变电站内所有失压母线都属于无站内负荷转移母线失压。若考虑涉及多个变电站的大范围停电情况,可以定义为站间多母线失压。

### 2 大范围负荷安全转移优化策略

配电网发生电源侧故障时,造成母线失压,需要尽可能把与母线相连的所有馈线上的负荷转移至其他正常工作的电源,实现大范围负荷安全转移。针对以上三类母线失压类型,本文分别制定了进行大范围负荷安全转移的策略。

#### 2.1 无站内负荷转移母线失压负荷转移策略

无站内负荷转移的母线失压,该母线上所连接

的站内备用母线转供馈线没有备用电源,只能切除;只能把有外部联络电源的馈线上的负荷和站内非备用母线转供馈线上的负荷转移至外部联络电源和站内非备用母线上。负荷转移方法采用类似馈线故障恢复方法。因此,无站内负荷转移母线失压的大范围负荷转移问题就可以转化为多个馈线故障供电恢复问题。

## 2.2 有站内负荷转移母线失压负荷转移策略

有站内负荷转移母线失压的大范围负荷转移遵循以下原则:

(1) 备用母线通过母联开关转移所有失压母线上馈线类型是站内备用母线转供馈线的馈线上的负荷,并优先转移重要负荷。

(2) 站内备用母线转供馈线若有联络开关则保持分闸状态,即忽略其存在,由母联开关完成其负荷转移。

(3) 有外部联络电源或联络电源是站内非备用母线且备用容量充足的馈线负荷全部转移到站外电源或站内非备用母线,馈线的负荷转移的方法采用馈线故障的供电恢复方法。

(4) 有外部联络或非备用母线联络的,但备用容量不充足的馈线组,若备用母线在转移了站内备用母线转供馈线后,备用容量尚存,则备用母线参与这些馈线的负荷转移,尽可能多的恢复失电负荷。备用母线的剩余备用容量按馈线组备用容量缺额等比例分配,若仍然不能满足转移负荷要求,则根据负荷的重要程度,切除部分非重要负荷。

若把涉及母联和馈线出口断路器的操作定义为站内负荷转移操作,则有站内负荷转移母线失压大范围负荷转移问题就转化成了站内负荷转移问题和馈线故障恢复问题。

## 2.3 站间多母线失压的负荷转移策略

站间多母线失压问题可以分解为多个有站内负荷转移母线失压和无站内负荷转移母线失压问题的组合。利用上两节的策略进而可以将站间多母线失压的负荷转移问题转化为多个馈线故障和站内负荷转移问题。不同之处在于,在生成每个负荷转移方案之前,需要更新能用的转供电源和馈线类型,因为在发生站间多母线失压后,有些馈线的外部联络电源失效,该联络开关的类型可能由有外部联络电源馈线转变成无外部联络电源的馈线。

## 3 大范围负荷安全转移方案生成方法

根据以上大范围负荷转移策略,将大范围负荷转移算法分解成四个模块实现,分别是:母线失压类型判别模块、故障等效及站内负荷转移方案生成

模块、故障恢复处理模块和负荷转移方案集成模块。母线失压类型判别模块完成站间多母线失压分解;故障等效及站内负荷转移方案生成模块把母线失压负荷转移任务分解为馈线故障恢复和站内负荷转移。故障恢复处理模块处理等效故障馈线的供电恢复方案生成。负荷转移方案集成模块负责把某个母线失压所涉及的站内负荷转移方案和等效馈线故障恢复方案集成为最终的大范围负荷安全转移方案。

### 3.1 母线失压类型判别模块

定时检测是否有新母线失压产生,当检测到新母线无压时间超过定值时,则判定出现了新失压母线。当出现新母线失压事件时,首先判断是否有尚未处理完的故障恢复和(或)母线失压负荷转移处理;再者统一考虑新发生的母线失压和正在处理的母线失压,考虑变电站的母线接线类型,判断更新所有的母线失压类型,将大面积停电分解为若干个无站内负荷转移母线失压和有站内负荷转移母线失压;并统计无站内负荷转移母线失压和有站内负荷转移母线失压的数量及相应的负荷待转移区。然后,通知故障等效及站内负荷转移方案生成模块需要处理的无站内负荷转移母线失压和有站内负荷转移母线失压的数量和负荷转移区。对于正在处理的母线失压的类型有变化的,作废已生成的负荷转移方案重新生成。母线失压类型判别模块的流程图如图2所示。

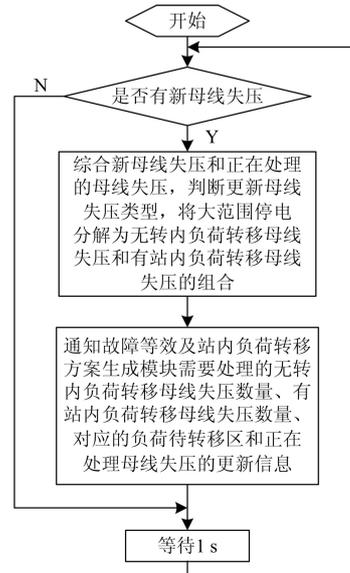


图2 母线失压类型判别模块流程图

Fig. 2 Flowchart of the busbar-voltage-loss classification module

### 3.2 故障等效及站内负荷转移方案生成模块

定时查询是否有需要处理的无站内负荷转移母线失压和有站内负荷转移母线失压。若存在无站内

负荷转移母线失压，将有联络开关的馈线变电站出口断路器断开，该馈线的所有失电区段看待恢复区，这样就把无站内负荷转移母线失压的负荷转移问题分解成了多个馈线故障恢复问题。若存在有站内负荷转移母线失压，将其分解成站内负荷转移和多个馈线故障恢复问题。本模块完成站内负荷转移控制方案生成。最后将分解后的馈线故障恢复问题提交给故障恢复处理模块。故障等效及站内负荷转移方案生成模块的流程图如图 3 所示。

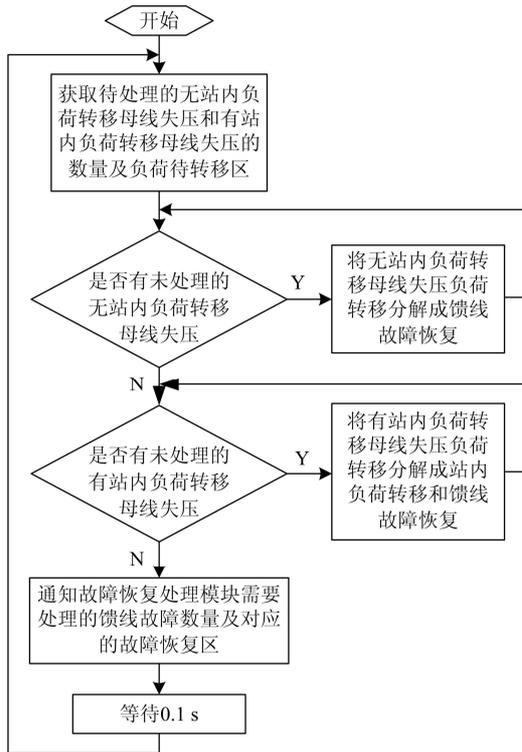


图 3 故障等效及站内负荷转移方案生成模块流程图  
Fig. 3 Flowchart of the busbar-voltage-loss decomposition module

### 3.3 故障恢复处理模块

定时查询是否有新馈线故障；若有新故障，首先暂停已有故障恢复处理，更新各个供电恢复区的转供电源的带电状态；重新统计每个供电恢复区所涉及的转供电源。有共用转供电源的几个单重故障为多重故障。把多重故障的公共转供电源解耦等效成多个转供电源，从而实现把多重故障转化成多个单重故障。解耦的方法为：共用转供电源按备用容量缺额等比例分配给对应的供电恢复区，处理后所有的馈线故障都是单重故障。每个馈线单重故障按启发式搜索方法生成供电恢复方案。故障恢复处理模块的流程图如图 4 所示。

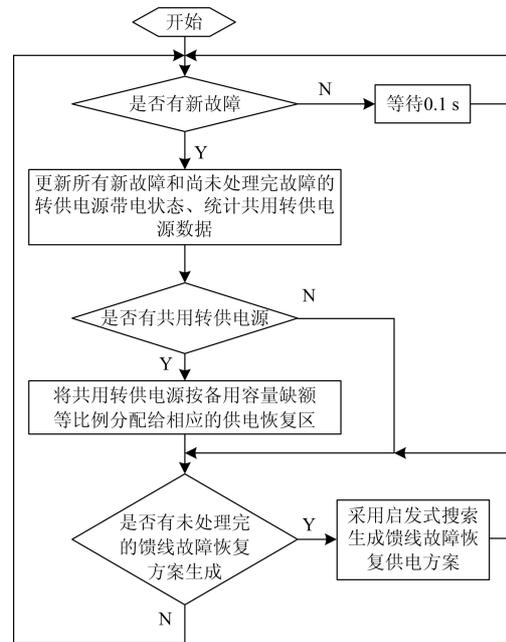


图 4 故障恢复处理模块流程图  
Fig. 4 Flowchart of the feeder fault restore module

### 3.4 负荷转移方案集成模块

负荷转移方案集成模块负责按母线失压事件收集其分解生成的站内负荷转移开关动作集和等效馈线故障恢复开关动作集合，得到最终大范围负荷安全转移的断开开关集合和闭合开关集合。按照“先分闸后合闸”的原则，可以将各负荷转移区中的负荷安全转移至其他电源，实现电源侧故障下大范围负荷的安全转移。

## 4 结语

母线失压、主变故障等电源侧故障下的大范围负荷安全转移优化策略及实现技术对于提高配电网调度管理水平和提高供电可靠性具有重要意义。然而，相对于馈线故障供电恢复，大范围负荷安全转移优化策略自动生成技术难度大，尚未达到实用化水平。本文将电源侧故障下的大范围负荷安全转移问题最终分解成了站内负荷转移和等效馈线故障恢复问题，提出了解决问题的新思路和新方法，使大范围负荷安全转移优化策略的自动生成技术可以达到实用化水平，具有重要理论和工程应用价值。

### 参考文献

[1] 徐丙垠, 李天友, 薛永端. 智能配电网与配电自动化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 38-41, 55.  
XU Bing-yin, LI Tian-you, XUE Yong-duan. Smart distribution grid and distribution automation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17):

- 38-41, 55.
- [2] 吴国沛, 刘育权. 智能配电网技术支持系统的研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 162-166, 172.  
WU Guo-pei, LIU Yu-qian. Research and application of technology support system for smart distributed grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 162-166, 172.
- [3] 袁鹏, 郭创新, 王康元, 等. 调控一体化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 regulation & control integration mode[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22): 150-154.
- [4] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 继电保护与配电自动化配合的配电网故障处理[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 53-57, 113.  
LIU Jian, ZHANG Zhi-hua, ZHANG Xiao-qing, et al. Relay protection and distribution automation based fault allocation and restoration for distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 53-57, 113.
- [5] 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.  
ZHANG Hao, HE Jing-han, BO Zhi-qian, et al. Service restoration based on dynamic programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 162-167.
- [6] 邹必昌, 龚庆武, 李勋. 基于负荷平衡的配电网重构遗传算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 80-83, 111.  
ZOU Bi-chang, GONG Qing-wu, LI Xun. Research on network reconfiguration GA in distribution system based on load balancing[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 80-83, 111.
- [7] 卢志刚, 董玉香. 基于改进二进制粒子群算法的配电网故障恢复[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(24): 39-43.  
LU Zhi-gang, DONG Yu-xiang. Distribution system restoration based on improved binary particle swarm optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(24): 39-43.
- [8] 陈小平, 顾雪平. 基于遗传模拟退火算法的负荷恢复计划制定[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 171-175, 182.  
CHEN Xiao-ping, GU Xue-ping. Determination of the load restoration plans based on genetic simulated annealing algorithms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 171-175, 182.
- [9] 翁蓝天, 刘开培, 刘晓莉, 等. 复杂配电网故障定位的链表法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 190-196.  
WENG Lan-tian, LIU Kai-pei, LIU Xiao-li, et al. Chain table algorithm for fault location of complicated distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 190-196.
- [10] TOUNE S, FUDO H, GENJI T, et al. Comparative study of modern heuristic algorithms to service restoration in distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(1): 173-181.
- [11] LIM Seong-il, LEE Seung-jae, CHOI Myeon-song, et al. Service restoration methodology for multiple fault case in distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(4): 1638-1622.
- [12] KUMAR Y, DAS B, SHARMA J. Multiobjective, multiconstraint service restoration of electric power distribution system with priority customers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(1): 261-270.
- [13] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 配电网模式化故障处理方法研究[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 98-102.  
LIU Jian, ZHANG Zhi-hua, ZHANG Xiao-qing, et al. Modeled fault isolation and restoration for distribution systems[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 98-102.
- [14] 庞清乐, 高厚磊, 李天友. 基于负荷均衡的智能配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 341-347.  
PANG Qing-le, GAO Hou-lei, LI Tian-you. Load balancing based fault service restoration for smart distribution grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 341-347.
- [15] 吕浩, 何胜利, 龚志辉. 各自投组在 110 kV 扩大外桥和 10 kV 单母 IV 分段主接线变电站中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 81-83, 102.  
Lü Hao, HE Sheng-li, GONG Zhi-hui. Application of back-up switching equipments in 110 kV enlarged external bridge and 10 kV single busbar with IV segments connection substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(5): 81-83, 102.

收稿日期: 2013-09-01; 修回日期: 2014-01-06

#### 作者简介:

朱国防(1975-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为智能配电网保护与自动化; E-mail: zgf@sdu.edu.cn

高厚磊(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护、广域同步测量、数字化变电站等;

徐丙垠(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为配电网自动化、智能配电网保护与控制、行波测距等。