

华北电力大学

硕士学位论文

电网解列后系统恢复控制策略研究

Study on System Recovery Strategy after Power
System Islanding

徐伟

2018年6月

国内图书分类号：TM74
国际图书分类号：621.3

学校代码：10079
密级：公开

硕士学位论文

电网解列后系统恢复控制策略研究

硕士研究生：徐伟
导师：刘崇茹 教授
企业导师：伍双喜 高工
申请学位：工程硕士
学科：电气工程
培养方式：全日制
所在学院：电气与电子工程学院
答辩日期：2018年6月
授予学位单位：华北电力大学

Classified Index: TM74

U.D.C: 621.3

Thesis for the Master Degree

**Study on System Recovery Strategy after Power
System Islanding**

Candidate:	Xu Wei
Supervisor:	Prof. Liu Chongru
School:	School of Electrical and Electronic Engineering
Date of Defence:	June, 2018
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

摘 要

目前我国经济发展迅速,全国的用电量与日俱增,我国的电网规模日益庞大。虽然目前采取了一系列的安稳措施来防止发生大规模停电事故,但仍然不可避免。对于含有多回直流系统的交直流混合输电网络,某一局部故障或极端恶劣天气可能导致整个电网的解列甚至是完全停电。如何在发生大面积停电后,实现系统故障后的迅速恢复,是现代电力系统运行和规划面临的重大课题。因此电网解列后恢复策略研究具有重要的意义。

系统发生故障导致电网解列到电网恢复供电全过程包括两个主要亟待解决的问题,一是如何使电网解列后存活更多的孤网,二是如何利用残存的孤网和黑启动机组完成电网的快速恢复。两方面是有机统一的,只有尽可能多地保存孤网,系统的恢复速度才能提高,也是保证重要负荷的持续供电,减少停电带来经济损失的根本途径。

本文首先建立了孤网的数学模型,从理论上分析出孤网模式下系统运行方式的特点,并推导其传递函数,采用主导极值点和根轨迹的方法获得发电机组在孤网运行模式下的各项最优参数范围,从而可以在事前筛选出电网解列后能够存活的孤网。其次,以存活的孤网为启动电源,建立电网恢复过程中发电机和支路的详细模型,并采用迪杰斯特拉算法求解最优送电路径。以每步恢复时间最短为目标函数,采用原对偶内点法求解最优潮流,求解完整的电网恢复策略。既能完成从系统全黑情况下进行电网恢复,也能从孤网模式下进行电网的恢复。最后,建立了极端天气情况下的电网恢复模型,使电网恢复方案更加合理。采用 IEEE30 节点标准系统证明了恢复策略的合理性,并以广东省实际电网作为算例,验证本文方法的有效性。

关键词: 电网解列; 孤网稳定控制; 恢复策略; 原对偶内点法; 极端天气

Abstract

At present, due to the rapid economic development in our country, electricity consumption is also increasing day by day. As a result, the size of China's power grid has become increasingly large. Although a series of safeguards measures have been taken to prevent the occurrence of a major blackout, the power system is the acknowledged and most complex man-made system. A partial failure or extremely bad weather can lead to the entire grid solution or even a complete power outage. How to recover rapidly after a system outage in the event of a large-scale power outage is a major issue for the operation and planning of modern power systems. Therefore, it is of great significance to study the isolated network stability and recovery strategy after grid disconnection.

There are two main problems in the process of the system being decomposed into power restoration: one is the stable control of isolated grids and the other is the rapid recovery of grids. These two aspects are organically unified. Only the more isolated networks survive and the speed of system recovery can be improved. This is also the fundamental way to ensure the continued power-off of some important loads and reduce the economic losses caused by power outages. In this paper, firstly, the mathematical model of isolated grid is established. The characteristics of the system operating mode in isolated grid mode are deduced theoretically. The transfer function is derived and the optimal parameter range of generator is obtained by using the method of leading extreme point and root locus. Second, after the emergency control of the isolated network, a detailed model of various types of generators and branches in the grid recovery process is established. Dijkstra's algorithm is used to solve the optimal power transmission path, and the objective function is taken as the shortest recovery time of each step. The original dual current interior point method is used to solve the optimal power flow, and a complete power grid recovery process is designed. It can not only recover from the grid when the system is completely black, but also recover the grid from the stand-alone mode. Finally, a grid recovery model under extreme weather conditions was established to make the grid recovery plan more reasonable. The IEEE 30-bus standard system is used to prove the rationality of the recovery strategy. The actual power grid in Guangdong Province is used as an example to verify the effectiveness of this method.

Keywords: Grid solution column; Isolated network stability control; Recovery strategy; Original dual interior point method; Extreme weather

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
目 录.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及选题意义.....	1
1.2 电网解列后系统恢复问题概述.....	2
1.3 国内外研究动态.....	2
1.4 本文主要工作.....	4
第 2 章 孤网稳定控制策略研究.....	5
2.1 孤网运行的基本特点.....	5
2.2 孤网通用模型的建立.....	6
2.3 调速器参数对调频性能影响分析.....	8
2.4 广东省电网中的孤网现状.....	12
2.5 本章小结.....	13
第 3 章 电网解列后系统自愈恢复策略.....	14
3.1 发电机模型建立.....	14
3.1.1 水电机组建模.....	14
3.1.2 火电机组建模.....	15
3.1.3 机组启动特性.....	18
3.2 支路模型建立.....	19
3.3 解列后电网恢复策略.....	20
3.3.1 约束条件.....	20
3.3.2 目标函数.....	21
3.3.3 暂态校验.....	25
3.3.4 恢复策略流程.....	27
3.4 算例分析.....	28
3.4.1 IEEE30 节点系统算例分析.....	28
3.4.2 实际系统算例分析.....	29
3.5 本章小结.....	32
第 4 章 极端天气对系统自愈恢复的影响.....	33
4.1 极端天气对电网恢复的影响.....	33

4.2 极端天气下支路模型的建立.....	34
4.3 算例分析.....	35
4.4 本章小结.....	38
第 5 章 总结与展望.....	39
参考文献.....	40
攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果.....	43
攻读硕士学位期间参加的科研工作.....	44
致 谢.....	45

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及选题意义

随着世界经济的快速发展,电力需求不断增加,为了更好地提高系统输送容量,满足用户要求,使得电网互联成为了发展趋势。互联电网带来巨大输送能力的同时,也使得电网稳定问题变得更加严峻。我国电网已经形成多回超高压交直流大通道,输电能力和实际送电规模均位于世界前列,成为世界上最复杂的交直流混合大电网之一^[1]。但是,随着电网复杂程度的提高以及负荷的不断加重,电网稳定运行的裕度减小。同时,由于网内存在多馈入直流系统安全性问题,局部地区电压调控困难,受端网无功支撑能力不足,系统阻尼相对较弱,一旦发生诸如多重复杂故障、受端失去大电源或者重要线路安全自动装置拒动和误动等严重故障,大面积停电事故发生的可能性还是存在的。

虽然世界各国在防止大电网发生大规模停电事故上做了许多研究,采取了各种安稳措施,但是世界上的大规模停电事故依然时有发生^[2-5]。在电力网络发生大停电事故后,快速有效的系统恢复方案将极大地减少系统经济损失。据美国能源部的研究数据显示,实现电网快速恢复,将每年挽回美国电网用户约 1000 亿美元的损失^[6]。可以预见,作为用电大国的中国实现电网解列后系统快速恢复,将带来巨大的直接和间接的经济效益。

目前,针对电网发生事故后的快速恢复供电问题,国内外学者已经做了许多研究,也取得了相当的成果。在我国,电力部门根据调度人员的经验都相应制定了完善的系统恢复方案,在一些重要的场站通过增设紧急电源或引进具备快速切回(Fast Cut Back, FCB)机组等来保证供电的可靠性^[7]。但是,目前制定的绝大多数的系统恢复方案是以系统全黑的状态为起始条件,没有充分发挥解列后存活的孤网能够快速恢复出力的优势,也不能适应局部停电后的恢复情况。电网解列后孤网的存活不仅能够减少发电机停机带来的损失,而且能够加快电网恢复的速度,大大减小停电时间。

另外,根据世界上发生大规模停电事故的统计表明,大部分停电事故是由于高温、暴雪、飓风等极端天气引起的^[8-10]。极端天气条件下,由于局部地区冰雪或者线路的特殊条件,事先制定的电网恢复方案可能无法执行。因此,在电网恢复阶段,建立极端天气影响下的发电机及支路模型,能够保证系统恢复方案的最合理化,避免了在电网恢复过程中发生二次事故,造成对电网的再一次冲击。

本文从电网解列后孤网的稳定控制,到电网的快速恢复,并考虑极端天气条

件的影响,根据待启动网的边界条件和特征因素,制定电网恢复方案,不仅能够避免单独考虑某一方面而引起的方案不合理,而且能够从根本上充分利用现有的条件来加快电网恢复的速度,对电网恢复实施方案具有重要的现实意义。

1.2 电网解列后系统恢复问题概述

系统发生复杂故障后,从电网解列后的孤网稳定控制到大面积停电后的网络有序恢复是十分复杂的过程。但是根据系统在这一过程中各个时期主要目标的不同可以将其分为四个阶段:孤网稳定控制,黑启动准备阶段,系统恢复阶段和负荷恢复阶段。这四个阶段在实际操作中是相互联系,相互影响的。

将电网解列后系统恢复划分为四个主要的阶段主要是为了将复杂的多目标的问题转换为阶段性单目标的简单问题。

孤网稳定控制阶段主要是通过调整发电机组的运行参数,使其在孤网内达到功率平衡,从而维持孤网的稳定,以便加快后期系统恢复的速度。这一阶段主要是确定孤网模式下的发电机调速系统的各参数对孤网稳定的影响,以及设计调速系统的附加控制器,以便满足其快速响应的能力。

黑启动准备阶段的主要目标是搜索网内残存的孤网及具备自启动能力的机组,通过这些机组对无自启动能力的机组充电,使其恢复发电,并形成小的网络。这一阶段的主要研究内容为:多种类型发电机的详细建模、极端天气对路径恢复的影响、负荷的投入、发电机启动顺序。同时需要注意的问题包括:向空载线路和变压器充电引起的自励磁问题等。

网架恢复阶段主要目标是通过已经启动的发电机组对线路充电,建立网络的主网架,在此同时,线路的充电必须伴随着负荷的投入,来满足系统功率的平衡,从而保证系统的频率及电压稳定。

负荷恢复阶段是电网恢复的后期,此时网内所有发电机已经全部启动,网架也已经成型,此时主要目标是恢复网内所有失电的负荷,需要保证系统的频率、电压稳定,避免安稳措施频繁动作,造成二次停电事故。

1.3 国内外研究动态

造成电网故障的原因有很多,就目前国内外发生大规模停电事故分析来看,主要是极端天气原因,同时人为操作失误以及局部电网故障使得系统发生连锁故障也是一方面原因。然而,相较于大型互联电网来说,系统解列后残存孤网的频率稳定问题更加尖锐^[11]。同时,因为孤网的运行方式较大电网有明显不同,孤网模式下的稳定控制技术成为了解决频率稳定的关键^[12-13]。

在系统发生故障导致解列后,面临的重大难题是如何在最短的时间内恢复网络供电。从以往各国发生的大停电事故分析可总结出,事故前预先制定切实有效的电网恢复策略能够提高系统恢复速度,减小停电损失。国外学者自从20世纪70年代就已经开始了电网恢复的研究,我国起步较晚,但已经取得了切实有效的成果,并在实践中证明应用。在电网故障导致系统解列到最终的全网恢复供电这个过程中,从数学角度来看,是一个多目标、多约束条件的优化问题,根据每个阶段目标的不同可以将其简单划分为4个阶段:解列后孤网稳定阶段,黑启动阶段,网架恢复阶段及负荷恢复阶段^[14]。

前两个阶段是系统恢复的关键,决定着后续恢复速度的快慢,但在目前的相关研究成果中,基本都是将这两个阶段割裂开来,没有做到很好的统一协调。如果能够在电网发生故障前筛选出可能存活的一些小的孤网,并制定相应的稳定控制措施,这样就能在事故发生时主动断开与大网的联络线,做到自身带一部分重要负荷稳定运行。同时发电机的持续运行可以大大减少从停机到向外出力的准备时间,能够做到随时向外部提供功率输出,从而减少停电损失。

在孤网稳定控制方面,文献[11]通过仿真手段及现场经验定性分析了孤网的运行特点,总结孤网种类及形成的原因。文献[15]在此基础上重点研究发电机汽轮机调速器环节对孤网稳定的影响,提出改善方法及注意事项。文献[16]总结微电网与孤网的相同之处,从储能参与快速调频方面提出动作时机与深度的容量配制方法。

针对电网恢复的阶段的研究目前学者更多是关注如何利用新技术提高系统恢复速度,文献[6]首次提出电网恢复过程的分段解耦的思想,将一个多目标、多约束的复杂问题化简成不同的阶段,在某一阶段仅需关心一个重点问题,特别是电网恢复初期,重点关注目标是尽可能恢复网内所有发电机的对外出力。文献[17]提出“向上恢复”和“向下恢复”两种恢复策略。在电网恢复初期阶段采用“向上恢复”策略能够更快地实现发电机带电运行,当网络已经形成一定的规模时,“向下恢复”策略可以实现更多的负荷恢复。文献[18]以相同时间内系统发电恢复最大为目标,采用避免回溯的算法,求得发电机的最优启动顺序。文献[19]深入研究提出一个黑启动电源可以同时启动多台发电机的并行策略,采用深度优先算法,开发了一套系统恢复的新策略。文献[20]分析了造成恢复过程延误的主要原因,提出避免此类延误的办法。文献[21]讨论了黑启动过程中电磁暂态不满足约束的可能性,对同步发电机自励磁现象和由于操作不当造成的过电压等现象进行了仿真分析。文献[22]对当前恢复电厂的厂用负荷启动过程中的电压稳定和频率稳定问题进行了计算分析,校验整个方案启动过程是否能够满足约束。

极端天气是造成电网事故的主要原因,但是针对此方面的研究相对较少,文献[23]将线路的恢复时间考虑了进来,同时结合发电机的启动特型,以恢复时间

最短为目标对发电机的启动次序及路径进行求解，但是忽略了线路过电压、输电元件恢复成功率等多方面因素；文献[24]在此基础上，设计了计及线路投运风险的最优恢复路径恢复优化模型，避免了故障风险过高的输电元件被选中，但是仅仅考虑了线路充电电容引起的过电压对恢复时间的影响，忽略了极端天气和操作人员等的影响。

1.4 本文主要工作

本文主要致力于通过建立合理的电网优化模型，建立一套系统解列后电网的快速恢复策略。主要包括：理论推导利于孤网存活的各项参数的范围，筛选出可能存活的孤网。利用系统中残存的孤网和黑启动机组制定电网的最优恢复方案。在此期间，考虑了极端天气对电网恢复进程的影响，保证了启动方案的合理化。各章主要内容如下：

第2章，孤网稳定控制策略的研究。首先建立孤网的详细模型，分析了孤网与大电网运行方式的不同，总结了孤网运行的主要特点，推导出其传递函数。在此基础上，利用主导极值和根轨迹的方法，分析各个主要参数对孤网稳定的影响，从理论上得到有利于孤网稳定的各项措施。通过主动解列或者各电厂采取紧急控制措施保存一部分孤网，作为电网恢复的启动电源，能从根本上加快电网恢复的进程。

第3章，电网解列后系统自愈恢复策略的研究。在系统发生故障后，采用第2章提出的一系列控制措施来使尽可能多的孤网存活。在此基础上，建立了完善的发电机模型，将现阶段国内投入使用的主要机组类型囊括，并建立了考虑多种影响因素的支路模型，以每阶段系统恢复所需时间最短为目标函数，确定最优的系统恢复方案。分别以IEEE30节点的标准系统和广东省的实际电网算例做了验证，证明了电网解列后孤网的稳定对电网快速恢复的促进性。

第4章，建立受极端天气影响的输电元件恢复模型。介绍了极端天气对电网恢复过程的影响，并建立受极端天气影响的输电元件恢复模型，以潜在损坏概率的形式表示出支路受极端天气影响的严重程度。保证每个阶段中的送电路径合理化，避免了二次事故的发生。以IEEE30节点的标准系统算例做了验证，证明了极端天气情景下电网恢复策略的合理性。

第5章，对本文所做的工作及其创新点进行了总结。

第2章 孤网稳定控制策略研究

大面积停电后的电网恢复是一个复杂的过程。在黑启动准备阶段,首先应考虑黑启动电源的选择,一般而言,黑启动电源主要包括三类:第一类是本身就具有黑启动能力的机组,比如水轮机、燃气轮机,这一类型的机组不需要外界对其提供启动功率,它们能在相对较短的时间内实现自启动,同时并网向其它机组提供出力;第二类是事故后残存的机组或“孤岛”,这些机组在事故发生以后不跳闸,可以带自身厂用电孤岛运行,并逐渐的恢复其它的一些机组,带动整个系统恢复;第三类是相邻系统的支援,比如一些联络线。就目前而言,在制定恢复计划中第一类电源利用较多,但是相较于第一类,第二类电源能够在系统恢复初期提供更多的功率输出,从而加快系统的恢复速度。

因此在电网解列之前筛选出可能存活的孤网,能最大限度的加快电网恢复进程。由于孤网与大电网的运行方式有较大不同,本章详细分析孤网运行的特点,并建立其传递函数,利用根轨迹的方法分析各参数调整对孤网稳定的影响,最终得出利于孤网稳定的各种控制措施。

2.1 孤网运行的基本特点

在我国电力建设规程中指出,电网中单机容量应不大于电网总容量的8%,以满足当机组发生故障与电网解列时,不影响大电网的正常运行。

文献[11]提出了一种通过判断网内发电机输出功率与负荷受电功率之间差值占总网络容量比重的方法来确定孤网。简单来说,孤网就是指大电网解列后仍然能够稳定运行的容量相对较小的电力网络,按照网内机组的数量及所带负荷性质可以大致分为三类^[15]:

- (1)系统内存在多台并列机组,但是每台机组容量都能超过电网总容量的8%;
- (2)系统中只有一台机组,所带负荷为厂用电之外的负荷;
- (3)针对最新FCB技术提出的一种发电机甩负荷后仅带厂用电运行。

电网解列后,在孤网刚形成时,网内发电机输出的有功功率与网内所有负荷的受电功率必定存在一定的不平衡功率,根据其差值的大小可以划分为两种类型:一种是网内不平衡功率很小或接近于零,不需要采取额外措施网络就可以达到稳定;另一种情况就是不平衡功率较大,必须采取一系列的稳定措施才能够使孤网存活。第二种情况又包含两个方面:一是发电机输出功率大于网内负荷的受电功率,这种情况下给孤网带来的稳定问题主要是高频问题,必须对发电机调速系统采取转速以减小出力;二是网内受电功率大于发电机的输出功率,主要稳定问题是频率电压跌落,主要解决办法是切负荷并避免发电机转速飞升。

2.2 孤网通用模型的建立

大电网解列后形成的孤网与大电网本身的运行方式有较大不同，较小的负荷干扰就能够对孤网的稳定产生很大的影响。

目前调速系统主要是由调速器、发电机组和电网环节组成。其数学模型如下图所示：

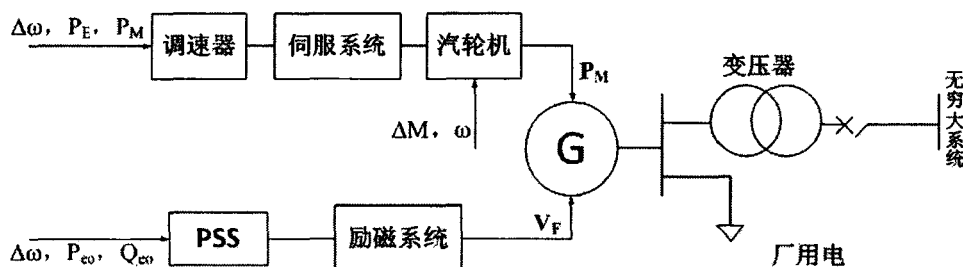


图 2-1 孤网系统通用数学模型

从图 2-1 中可以得知，孤网系统主要包括发电机、调速器、汽轮机及其连接装置伺服结构。本文主要针对孤网的频率稳定问题展开研究，因此，本文不对 PSS 和发电机的励磁装置系统进行深入讨论。汽轮机、调速器及电液伺服系统的具体模型如下。

1. 汽轮机模型

本文采用了国内某电厂正在投产使用的完整的汽轮机模型，并全面考虑高、中、低压缸的串联组合效果。汽轮机本体模型如图 2-2 所示。

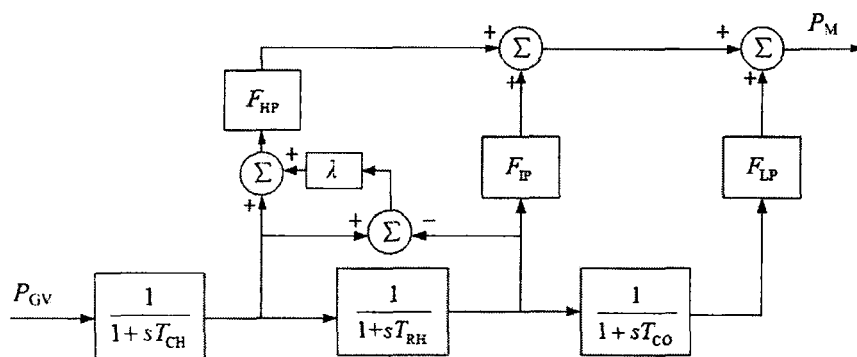


图 2-2 串联组合汽轮机模型框图

从图中可以得到汽轮机的传递函数为：

$$G_{tur}(s) = \frac{\lambda F_{HP}}{(1+sT_{CH})} + \frac{F_{IP}}{(1+sT_{RH})(1+sT_{CO})} \quad (2-1)$$

其中， F_{HP} 为高压缸功率比例， T_{CH} 为蒸汽容积时间常数， T_{RH} 为再热器时间常数， F_{IP} 为中压缸比例系数， T_{CO} 为交叉管时间常数。

2. 调速器模型

本文采用某电厂正在使用的调速器系统模型，如图 2-3 所示。

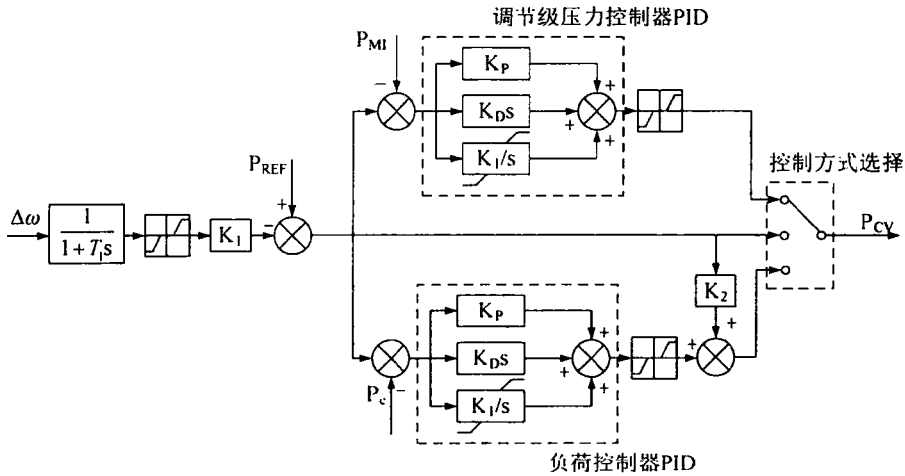


图 2-3 汽轮机调速器模型

从图中可以看出，该模型中的控制方式选择有三类，即：

(1)调节级压力控制器 PID 反馈控制；

(2)纯转速调节，此种情况适应于发电机突然与主网解列，导致发电机输出功率与所带负荷的不平衡功率较大时；

(3)负荷反馈 PID 模式控制，此种情况适应于正常工作情况下。

当大电网发生故障导致联络线断开，造成孤网甩去部分负荷时，调速器采用发电机的纯转速控制模式。因此由图可知调速器的传递函数为：

$$G_{\text{gov}}(s) = \frac{K_1}{1 + sT_1} \quad (2-2)$$

其中， K_1 为调差系数， T_1 为调速器控制时间常数。

3. 电液伺服系统模型

电液伺服机构的主要作用是连接汽轮机和调速器，其主要功能是将调速器的电信号转换为汽轮机液压信号，以便能准确调整汽门开度，使得汽轮机转速达到事先给定值，从而使网络重新进入到稳定状态。

本文采用某电厂实际运行机组的调速器电液伺服机构模型，如下图 2-4 所示。

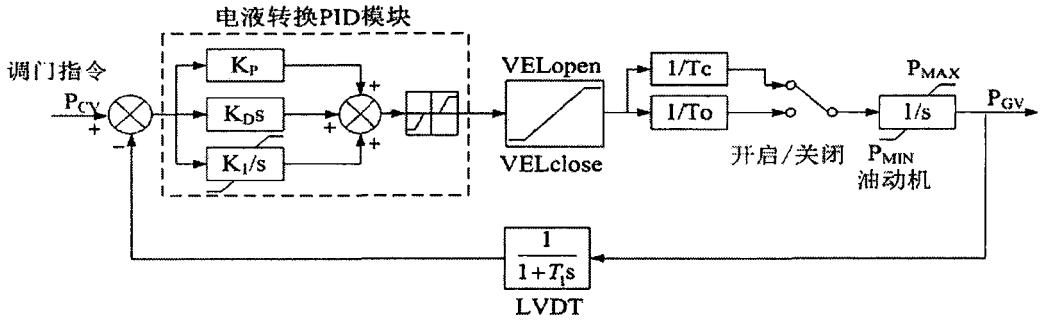


图 2-4 调速器电液伺服机构模型

从图中可以得知电液伺服机构有一负反馈环节，能够保证电信号到液压信号的转换合理化。因此可以得到调速器电液伺服机构的传递函数为：

$$G_{ser}(s) = \frac{K_p + K_D s + \frac{1}{K_I s}}{1 + \frac{1}{1 + K_I s} (K_p + K_D s + \frac{1}{K_I s})} \cdot \frac{1}{T_o} \quad (2-3)$$

其中， T_o 为油动机开启时间常数（秒）， K_I 为油动机行程反馈环节（LVDT）时间（秒）， K_D 为 PID 模块微分环节倍数， K_I 为 PID 模块积分环节倍数， K_p 为 PID 模块比例放大环节倍数。

因此可以得到孤网调频模型的传递函数为：

$$\Delta F(s) = \frac{G_{gen}(s)}{1 + G_{tur}(s)G_{gov}(s)G_{ser}(s)G_{gen}(s)} \quad (2-4)$$

其中， $G_{gen}(s)$ 为发电机环节传递函数， $G_{tur}(s)$ 为汽轮机环节传递函数， $G_{gov}(s)$ 为调速器环节传递函数， $G_{ser}(s)$ 为电液伺服机构环节传递函数。

从形式上来说，式（2-4）所示的孤网传递函数，具有高阶及多参数特性，时域表达式复杂且难以写出。高阶系统的曲线特点主要是由离虚轴较近的极点决定。因此，可以采用离虚轴最近的一对共轭复数作为高阶系统的主导极点，根据这一对极点确定函数的根轨迹的变化情况，获得传递函数中的参数对系统稳定性的影响。

2.3 调速器参数对调频性能影响分析

针对 $\Delta F(s)$ 的静态特性，可以通过终值定理得：

$$\Delta f = \lim_{s \rightarrow 0} [s \Delta F(s)] = -\frac{\Delta P_L}{K_L + \alpha/R} \quad (2-6)$$

其中, α 表示能够进行调频的机组容量所占所有机组总容量的比重; R 表示发电机的调差系数, K_L 表示发电机频率调节效应系数。

由式(2-6)可知, 频率调整与孤网产生初期的有功不平衡量成正比关系。因为孤网自身容量较小, 相同有功不同衡量的有功差值对孤网的影响远远大于大电网。因此本文采用单机模型, 并采用阶跃型有功模拟孤网模式下的有功不平衡量。

对于孤网频率稳定的评价指标, 采用图 2-5 所示的频率响应曲线来表示。

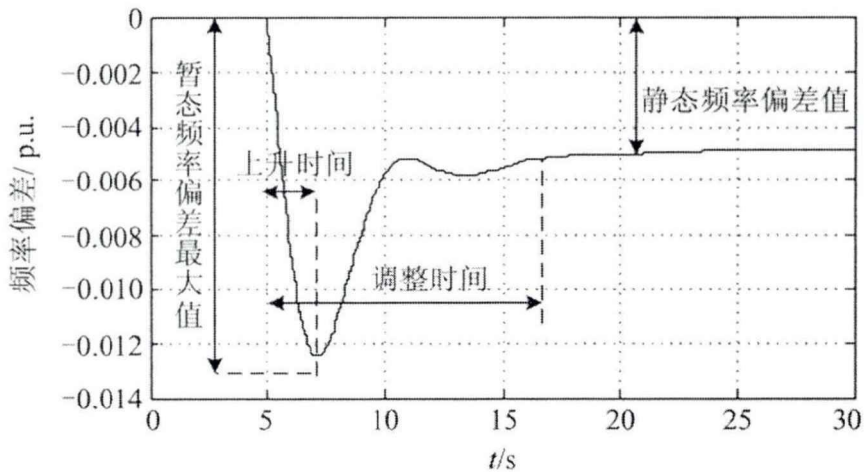


图 2-5 孤网调频响应曲线

其中:

1) 频率最终差值 Δf : 孤网调频稳定后的频率差值的系统频率 (50Hz) 偏差, 能够表征孤网发电机的调频能力。

2) 频率偏差最大值 Δf_{max} : 在孤网调频过程中频率与系统频率的最大偏差值, 当频率偏差最大值过大时为保护发电机的安全必须停机, 与 $\Delta f * (1 + \sigma\%)$ 相对应。

3) 上升时间 t_1 : 从孤网形成开始到频率偏差达到最大值所需要的时间。

4) 调整时间 t_2 : 从孤网形成开始到频率达到新的稳定点所需要的时间。

以 $K_L = \alpha/R$ 为例, 选取发电机的调差系数可变的参数, 此时将其他数据的典型数据带入, 可得:

$$G_L(s) = K_L \frac{265s^5 + 1342.4s^4 + 670.2s^3 + 56}{0.9s^6 + 19.58s^5 + 707.704s^4 + 2348.22s^3 + 408s^2 + 50.4s + 1} \quad (1-23)$$

在 MATLAB 仿真工具中可以得到其根轨迹的变化规律如图 2-6 所示, 图中从左到右为参数 K_L 取值从小变到大过程中根轨迹的改变规律。

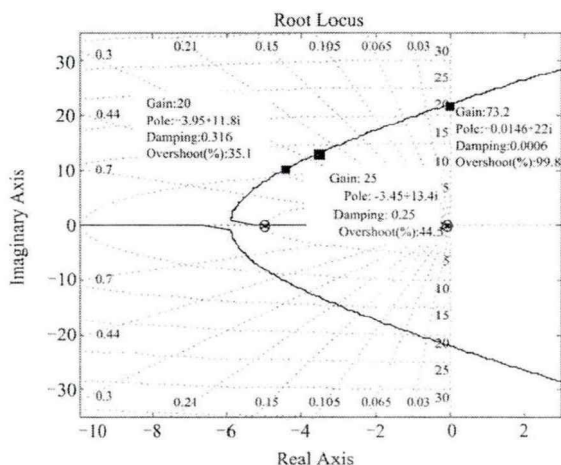


图 2-6 α/R 为可调参数时的根轨迹

从图中可以看出, K_L 取值越小, 系统的频率最大偏差值会越大, 当超过某一值时, 系统就会失去稳定, 导致发电机被迫停机。从图中可以得到系统不会失稳的系统参数取值范围, 图中左侧的两点为合理范围, 对应调差系数为 1%~5%。

同理, 可得其余参数为可变参数时对调频性能的影响, 如图 2-7、图 2-8。

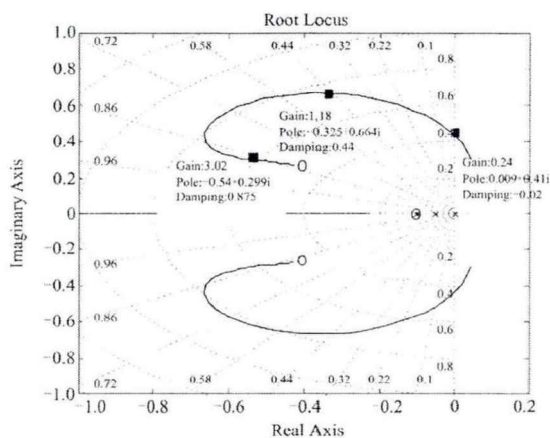


图 2-7 $1/T_s$ 为可调参数时的根轨迹

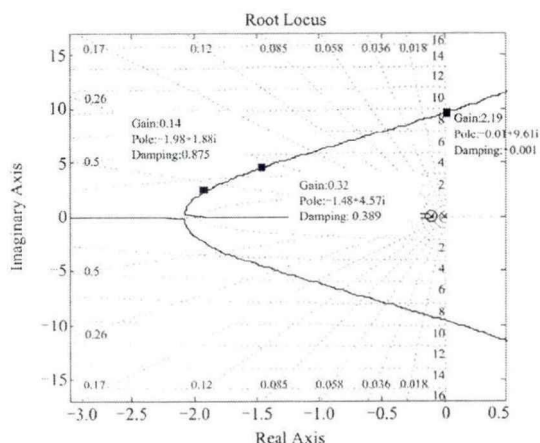


图 2-8 H 为可调参数时的根轨迹

最终得出发电机孤网模式下各参数对调频性能的影响：

表 2-1 发电机孤网模式下各参数对调频性能的影响

	R	α	T_N	H
指标	增大	增大	增大	增大
V_{max}	显著增大	显著减小	增大	较小
M	显著增大	显著减小	无影响	无影响
t	影响很小	影响很小	影响小	增大
t_r	影响很小	影响很小	先小后大	减小
对孤网稳定的影响	不利	有利	不利	有利

针对上述分析结果，本节给出一些参数明确的调整方向如下：

(1) 发电机在进入孤网模式后，其调速器应该立即退出调节级压力控制或负荷控制状态，进入纯转速控制模式，保证汽轮机转速的稳定；

(2) 在孤网模式下，应该投入所有的可以进行频率调整的发电机，并且将其调频系数设置为 4%，保证此时发电机组的油动机性能最好；

(3) 对于死区参数的设置，需要根据实际情况进行调整，过大会导致频率偏差值太大，过小的话会导致调速器的频繁动作，对发电机的使用寿命造成损害；

(4) 对于调频上下限参数设置来说，应该在确保保护的稳定工作的前提下，尽可能放宽其上下值；

(5) 对于 OPC 保护定值的设定应对各个机组采用不同的设定值，或设置延时错开，避免同时动作。

2.4 广东省电网中的孤网现状

广东省电网结构较为复杂，电源与负荷分布不均匀，整体上呈现西电东送的局势，而且广东省内黑启动机组的数量较少，且大多数黑启动机组的出力较小，增加了电网恢复时间。因此，如果能够在电网发生事故解列时，主动采取措施保存一定数量的孤网，能从根本上加快电网恢复的进程。

广东省目前电网的形式是“八交八直”，作为南方电网的最大受端系统，其内部电源的功率输出远小于负荷要求，其省外受电比例超过总负荷的 35%。因此，广东省电网很容易因为外部电网的影响造成功率大的缺额而导致电网发生大规模连锁事故，甚至造成电网解列而大范围停电。

因此，在电网发生大规模连锁故障之前，事前筛选出可能存活的孤网，采取主动解列等措施保存一部分孤网，不仅能够保证一部分重要负荷持续供电，也能加快后期电网恢复的速度。广东电网具有分区供电的电气特性，因此，可以根据区域内发电机的输出功率与负荷的消耗功率的差额来筛选可能存活的孤网，并根据上文提到的孤网控制策略最终选择出能够存活的孤网。

本文采用的数据是 BPA 格式下的广东电网夏大方式下的潮流数据及稳定数据。选择功率不平衡量低于 40% 的网络，将其主网解列，采取上文提到的一系列控制措施，筛选出能够孤网运行的电厂，具体场站如下表 2-2 所示。

表 2-2 广东电网能够孤网运行的场站

广东电网分区	电厂
砚都分区	定能厂、云浮厂、云浮 B 厂
西江分区	新田 B 厂
罗洞分区	连州电厂、螺阳厂、飞来峡、横益厂
碟岭五邑分区	阳西厂
江门分区	洪湾厂、铜锣 A 厂
顺德分区	德胜厂
香山分区	永安厂、横门厂、南朗厂
增城分区	恒运 C 厂
水乡分区	高埗厂
莞城分区	沙角 A 厂
宝安分区	前湾厂
鲲鹏分区	能东厂

2.5 本章小结

本章详细分析了孤网运行与大电网运行方式的不同,总结了孤网运行的主要特点,并建立其详细的模型,总结出传递函数,并在此基础上,利用主导极值和根轨迹的方法,分析各个主要参数对孤网稳定的影响,得到有利于孤网稳定的各项措施。最后,利用广东电网 BPA 格式下的潮流和稳定数据筛选出能够在电网发生解列后孤网运行的电厂,从根本上加快了后期电网恢复速度。

第 3 章 电网解列后系统自愈恢复策略

系统发生复杂故障后,从电网解列后的孤网稳定控制到大面积停电后的网络有序恢复是十分复杂的过程。所谓电网恢复包括了在大电网因为故障停运导致系统解列甚至全黑后,通过电网内残存的孤网或者是具有自启动能力的机组进行启动,选择最优的送电路径对电厂进行厂用电恢复,以便使得更多的发电机完成恢复供电。在此期间投入负荷保证系统的稳定运行,逐步扩大恢复供电区域,完成区域电网的并网,直至实现整个电力系统的恢复。在已有研究中通常根据阶段目标的不同将整个恢复过程划分为三个阶段:黑启动阶段,网架恢复阶段,负荷恢复阶段,如图 3-1 所示:

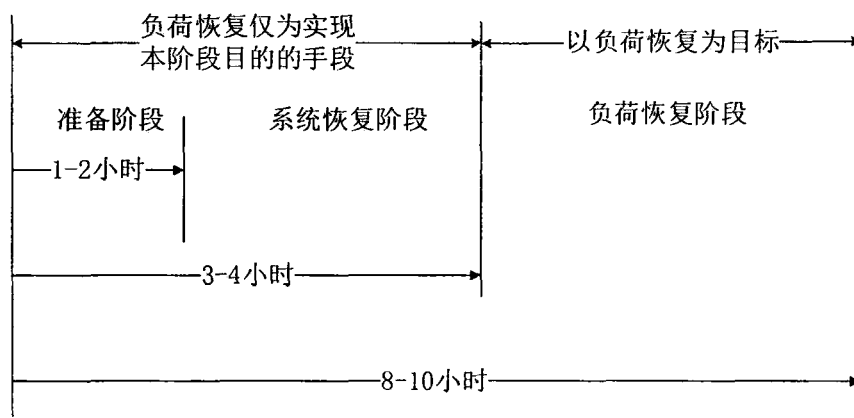


图 3-1 系统恢复的三个阶段

3.1 发电机模型建立

本文分析了各类发电机的运行特点,分别建立其动态模型。根据机组是否具有自启动的能力,将其分为黑启动机组和非黑启动机组。目前国内常用的黑启动机组有水电机组、燃气机组及具有 FCB 功能的机组,而剩余的绝大多数火电机组都为非黑启动机组。

3.1.1 水电机组建模

水电机组作为黑启动电源是目前国内较为常用的手段之一,主要是因为水电厂的功率调节范围是火电厂的 150%,且更易于控制、成本低。

水电机组作为黑启动电源主要有两种启动方式,一种是利用场站内柴油发电机作为备用电源,带动水轮机运转;二是没有备用电源的电站,它一般是利用电

站自身的储存能量进行水电机组的黑启动。

根据水电机组的启动特点，建立起启动时间模型如下图 3-2 所示：

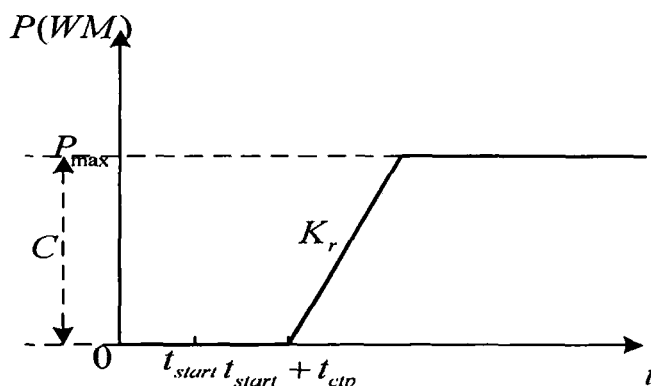


图 3-2 水电机组启动时间模型

上图中， t_{start} 是机组的启动时刻； t_{cip} 是指机组可以向外输出功率的时刻； K_r 是机组的最大爬坡率； P_{max} 是机组的最大出力； C 是机组的容量。

显然从以上的水电机组恢复模型可知，机组在启动过程中的出力水平是一个分段函数，包括初期准备阶段，发电机出力爬坡阶段及最大值稳定输出阶段。因此根据三个不同状态，可以列出其数学方程为：

$$P_{gen}(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_{start} + t_{cip} \\ K_r(t - t_{start} - t_{cip}) & t_{start} + t_{cip} \leq t < t_{start} + t_{cip} + P_{max} / K_r \\ P_{max} & t_{start} + t_{cip} + P_{max} / K_r \leq t < T \end{cases} \quad (3-1)$$

在系统恢复初始阶段，水电机组可以通过自身的启动最快的完成功率输出，合理地恢复其厂用电。随后可以在此基础上将功率对外传送，进一步恢复其它不具有黑启动能力的机组或者一些重要负荷。当然除了水电机组以外，一些燃汽轮机组也是可以实现相似的功能。虽然其在电网恢复中处于最基础的阶段，但却能对全网的恢复起到非常重要的作用。

3.1.2 火电机组建模

3.1.2.1 常规火电机组

在我国，除了水轮机组被用于作为黑启动电源外，部分火电机组特别是燃气

机组也常常被用来作为黑启动机组。但是此类机组的总容量较小，并且需要一定的启动容量，总体恢复速度较慢。在出力方面与水电机组不同的是，因为锅炉燃烧的不稳定性，火电机组需要达到最小技术出力后才能够稳定输出。

由以上分析可知，对于常规火电机组，可以将其启动时间模型表示成如下图 3-3 所示：

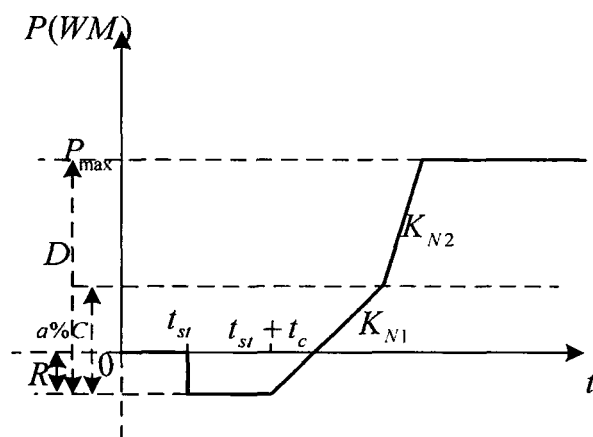


图 3-3 常规火电机组启动时间模型

上图中， t_{st} 为锅炉点火，机组开始启动的时刻； $t_{st} + t_c$ 为机组启动完成并开始对外输出功率的时刻； D 是机组自身所能发出的最大有功功率，但是并不代表全部用于外部电网； P_{max} 为机组可以对外部系统发出的最大有功功率； R 是常用电功率，也就是发电机启动阶段的启动功率， $a\%C$ 表示发电机输出的最小有功功率，在此之前发电机不能维持某一有功恒定输出，达到此最小值后才能维持在某一恒定值； K_{N1} 与 K_{N2} 分别表示发电机爬坡的这两个阶段的爬坡率。

从上述常规发电机启动模型中可以总结出，机组从点火状态到达到最大出力可以划分为 4 个阶段：机组点火前准备阶段、发电机启动阶段、机组爬坡对外输出功率阶段、有功输出保持最大阶段。根据每个阶段的机组出力特点，可以列出其数学表达式为：

$$P_{gen}(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_s \\ -R & t_s \leq t \leq t_s + t_c \\ K_{N1}(t - t_s - t_c) - R & t_s + t_c \leq t \leq t_q + t_c + \frac{a\%C}{K_{V1}} \\ a\%C + K_{N2} \left(t - t_s - t_c - \frac{(a\%C + R)}{K_{N1}} \right) & t_s + t_c + \frac{a\%C}{K_{V1}} \leq t \leq t_q + t_c + \frac{a\%C}{K_{V1}} + \frac{(P_{max} - a\%C)}{K_{N2}} \\ P_{max} & t_s + t_c + \frac{a\%C}{K_{V1}} + \frac{(P_{max} - a\%C)}{K_{N2}} \leq t \leq T \end{cases} \quad (3-2)$$

常规火电机组，除去一部分容量不大的燃气机组外，大部分不具备自启动能力，并且其需要的启动容量能够占到机组总容量的8%，因此启动时间慢，操作复杂，对系统恢复的初期阶段支持有限。

3.1.2.2 具有FCB功能的火电机组

随着现代技术的不断进步，目前国内小规模已经投产使用具有快速甩负荷功能的机组，也就是FCB机组。所谓的FCB机组就是，在大电网发生故障导致与电厂的连接线路断开时，机组能够主动甩去部分负荷，做到带厂用电稳定运行，目前技术上已经能够做到既不停机也不停炉，即使汽轮机停止运行，锅炉也能通过将蒸汽排到附加通道的措施做到不停炉运行。这样能大大加快机组启动速度。

在系统恢复阶段，对具有 FCB 功能的机组建立以下模型，如下图 3-4 所示：

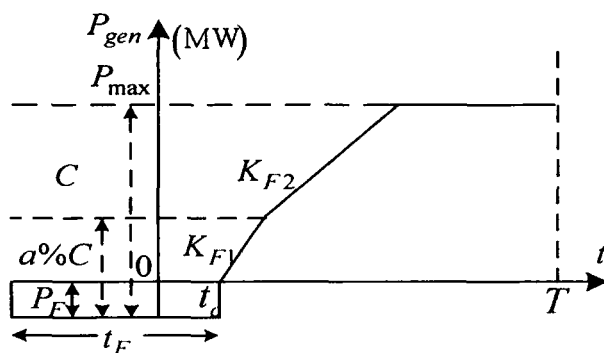


图 3-4 FCB 机组启动时间模型

与常规火电机组不同的是， P_F 是FCB机组带厂用电稳定运行的有功功率， t_F 为FCB机组能够在甩去负荷稳定运行的最大时间；与常规火电机组相同的是，FCB机组同样有一最小有功出力，在此之前不能在维持在某一点稳定输出； K_{F1} 和 K_{F2} 是机组在这两个阶段的爬坡率。

从上图可以总结出，FCB 机组的启动过程是分阶段的：带厂用电孤网运行阶

段, 机组爬坡出力阶段, 有功输出保持最大阶段。根据每个阶段的机组出力特点, 可以列出其数学表达式为:

$$P_{gen}(t) = \begin{cases} K_{F1}(t-t_c) & t_c \leq t \leq t_c + \frac{a\%C - P_F}{K_{F1}} \\ K_{F2}(t-t_c + \frac{a\%C - P_F}{K_{F1}}) + (a\%C - P_F) & t_c + \frac{a\%C - P_F}{K_{F1}} \leq t < t_c + \frac{a\%C - P_F}{K_{F1}} + \frac{P_{max} - P_F}{K_{F2}} \\ P_{max} & t_c + \frac{a\%C - P_F}{K_{F1}} + \frac{P_{max} - P_F}{K_{F2}} \leq t < T \end{cases} \quad (3-3)$$

3.1.3 机组启动特性

通过上面对三种类型机组启动特点的总结分析, 可以得到其主要启动特性如下表 3-1 所示:

表 3-1 不同机组类型启动特点对比

机组类型	启动性能	启动容量	机组出力	爬坡能力
水电机组	能自启动	1%	较大	强
火电机组	不能自启动	8%	大	一般
FCB 机组	可带厂用电运行	不需要	大	强

除了考虑因为发电机类型所导致的启动时间有差异外, 对于火电机组还需特殊考虑由于停电时间过长导致的汽轮机汽缸温度下降造成的启动准备时间过长的影响。对于一台完全冷却的机组, 其启动时间最大可能达到刚停机机组启动时间的 4 倍。根据机组冷却时间的不同可以简单将其划分为几个阶段, 每个阶段对应的启动时间如下图 3-5 所示。从图中可以总结出, 随着汽轮机汽缸冷却时间的增加其温度降低的速率变小, 机组启动时间增大。

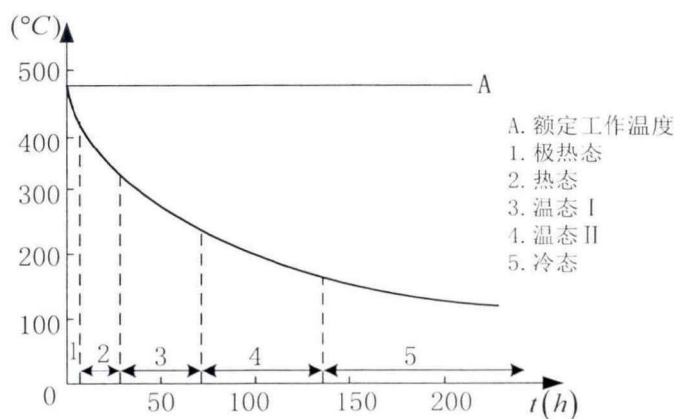


图 3-5 机组停机后汽轮机汽缸温度变化曲线

因此,在考虑常规火电机组的启动时间特性是,需要考虑其当时所处的状态,如上图所示如果机组不能再汽缸热态时进行启动,其启动时间只能按照稳态或冷态方式启动,这样一来,无疑错过了最佳启动时间。因此,在系统恢复初期,优先恢复机组容量大、缸温变化速率大的机组。本文主要将机组的汽缸温度划分两个等级:根据每个阶段的机组出力特点,可以列出其数学表达式为:“热启动最大时间”和“冷启动最小时间”。

1) 热启动最大时间(t_i^{max})的约束:

$$0 < t_{ist} \leq t_i^{max} \quad (3-4)$$

其中, t_{ist} 机组停机时间,当其小于热启动最大时间时可以采取热启动方式,如果超过机组就只能采取冷启动。

2) 冷启动时间 (t_i^{min}) 约束:

$$t_i^{min} \leq t_{ist} \leq T \quad (3-5)$$

当机组的停机时间在此区间,机组只能采取冷启动方式,因为冷启动所需消耗的时间多,因此尽量避免机组停机时间过长。

3.2 支路模型建立

为了加快系统恢复速度,应该优先恢复电网内所有的发电机,以便能够尽快恢复系统供电能力。在恢复机组的同时不可避免的会碰到最优充电路径的选择问题,本文采用经典的最短路径寻优算法——迪杰斯特拉算法来解决这一问题。使用该算法最主要的问题是支路权重的设置。支路在充电过程除了充电并网所需要的时间外,其开关动作时间和空充线路产生的自励磁问题也同样影响着支路恢复供电速度。

运行规划人员可以根据不同的偏重选择选择不同的优化目标,本文主要分为四个优化目标:

1) 开关数:认为每条支路都包含两个开关,开关次数越多,启动所需时间越长。以开关数为支路权重,搜索所需开关次数最少的送电路径。

2) 支路充电时间:输电线路和变压器充电并网都需要一定的时间,一般来说,输电线路和变压器充电并网所需的时间不同。以支路充电时间为支路权重,搜索所需充电时间最短的送电路径。

3) 支路充电无功功率:空载线路,尤其是高压空载线路充电时会产生大量感性无功功率,这会导致电网无功功率过剩,线路末端电压过高;系统无功过剩还可能导致发电机自励磁,导致系统电压水平进一步恶化。以支路充电无功功率为支路权重,搜索充电无功最小的送电路径,最大程度避免系统电压过高。

4) 支路充电时间权重+支路充电无功功率-高压电抗器容量:支路充电时间权重的数量级比支路充电无功功率(标么值)和高压电抗器容量(标么值)的数量级大得多,以此为支路权重,在充电时间权重相同的情况下,选择充电无功最小的送电路径。

本文主要以第四种方法作为送电路径的时间模型加以说明,如式(3-6)所示:

$$T_{Fi} = mT_i + (Q_{ci} - Q_{Li}) \quad (3-6)$$

式中, T_{Fi} 为支路的综合时间权重, T_i 为支路的充电时间, Q_{ci} 为支路的充电功率(标么值), Q_{Li} 为支路的高压电抗器容量(标么值)。

3.3 解列后电网恢复策略

本节详细说明电网解列后的系统恢复策略,在计及各种约束条件的前提下,以系统恢复时间最短为目标函数,充分考虑了发电机的运行状态,得到最优的系统恢复策略。

3.3.1 约束条件

系统方程的约束条件按照形式的分类可以划分为两大类:等式约束、不等式约束。

等式约束主要是系统恢复的各个阶段必须满足节点的功率平衡,公式如下:

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^{j=n} [e_i (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j)] = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j=1}^{j=n} [f_i (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j)] = 0 \end{cases} \quad (3-7)$$

其中, P_{Gi} 为发电机有功出力, Q_{Gi} 为发电机的无功出力, P_{Di} 为有功负荷的投入, Q_{Di} 为无功负荷的投入, G_{ij} 和 B_{ij} 为网络的电导和电纳, e_i 和 f_i 为网络节点电压的实部和虚部。

不等式约束:

$$\begin{cases} U_{\min} \leq e^2 + f^2 \leq U_{\max} \\ P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max} \\ Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max} \\ t \geq \left| \frac{P_k - P_{0k}}{rp_k} \right| \quad k = 1, 2, \dots, g \end{cases} \quad (3-8)$$

其中 U_{\min} 和 U_{\max} 为节点电压的上下限, P_{\min} 和 P_{\max} 为节点有功功率的上下限, Q_{\min} 和 Q_{\max} 为节点无功功率的上下限, n 为节点数, P_{0k} 为上一步节点的有功功率, rp_k 为发电机的爬坡率。

但是在原对偶内点法中处理的约束要求是同时具有上下限, 所以, 不等式约束修改为:

$$\begin{cases} U_{\min} \leq e^2 + f^2 \leq U_{\max} \\ P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max} \\ Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max} \\ -M \leq \left(\frac{P_k - P_{0k}}{rp_k} \right)^2 - t^2 \leq 0 \quad k = 1, 2, \dots, g \end{cases} \quad (3-9)$$

其中, M 为一数值特别大的正整数。

3.3.2 目标函数

本文采用文献[30]提出的方法, 将最有潮流的目标函数设置为: 在启动下一台不带机组时, 保证已带机组的调整时间中最长的一台时间最短, 从而确保整体时间最优。避免了仅仅采用某几台发电机进行单独调节, 而其余发电机处在能够继续爬坡, 但并不参与的状态。具体为:

设网络中已经有 k 台发电机已经能够对外送出, 因此第 $k+1$ 台启动时的目标函数为:

$$\min f(x) = \max_{i=1}^k \left\{ t_i = \left| \frac{P_i - P_0^i}{r_{pi}} \right| \right\} \quad (3-10)$$

其中, P_i 表示第 i 台机组的待求有功出力, P_0^i 表示目前第 i 台机组的有功出力, t_i 为第 i 台机组调整处理所需要的时间, r_{pi} 是第 i 台机组的爬坡率。

因此,

$$\begin{aligned} \text{obj. } & \min. f(x) \\ \text{s.t. } & h(x) = 0 \\ & \underline{g} \leq g(x) \leq \bar{g} \end{aligned} \quad (3-11)$$

求解此类问题首先需要转化成标准形式,也就是不能有不等式约束,因此需要引入松弛变量来扩大求解可行域,如式(3-12)所示:

$$\begin{aligned} \text{obj. } & \min. f(x) - \mu \left(\sum_{j=1}^c \ln l_j + \sum_{j=1}^c \ln u_j \right) \\ \text{s.t. } & h(x) = 0 \\ & g(x) + u - \bar{g} = 0 \\ & g(x) - l - \underline{g} = 0 \end{aligned} \quad (3-12)$$

其中, l 、 u 均为非负变量, μ 为障碍参数。

由此可得拉格朗日函数为:

$$L = f(x) - y^T h(x) - z^T [g(x) - l - \underline{g}] - w^T [g(x) + u - \bar{g}] - \mu \left(\sum_{j=1}^c \ln l_j + \sum_{j=1}^c \ln u_j \right) \quad (3-13)$$

其中 y 、 z 和 w 为拉格朗日乘子。

因此,需要计算拉格朗日函数对所有变量及乘子的偏导数,并令其等于 0 求解最后结果。

即:

$$\begin{aligned}
 L_x &= \frac{\partial L}{\partial x} \equiv \nabla_x f(x) - \nabla_x h(x) \cdot y - \nabla_x g(x) \cdot (z + w) = 0 \\
 L_y &= \frac{\partial L}{\partial y} \equiv h(x) = 0 \\
 L_z &= \frac{\partial L}{\partial z} \equiv g(x) - l - \underline{g} = 0 \\
 L_w &= \frac{\partial L}{\partial w} \equiv g(x) + u - \bar{g} = 0 \\
 L_l &= \frac{\partial L}{\partial l} \equiv z - \mu L^{-1} e \Rightarrow L_l^\mu = LZ e - \mu e = 0 \\
 L_u &= \frac{\partial L}{\partial u} \equiv -w - \mu U^{-1} e \Rightarrow L_u^\mu = UW e + \mu e = 0
 \end{aligned} \tag{3-14}$$

其中, $\nabla_x h(x)$ 和 $\nabla_x g(x)$ 分别为等式约束和不等式约束的雅克比矩阵的转置。线性化, 可得:

$$\begin{aligned}
 & \left[\nabla_x^2 f(x) - \nabla_x (\nabla_x h(x) \cdot y) - \nabla_x (\nabla_x g(x) \cdot (z + w)) \right] \Delta x - \\
 & \nabla_x h(x) \cdot \Delta y - \nabla_x g(x) \cdot (\Delta z + \Delta w) = -L_x \\
 & \nabla_x^T h(x) \cdot \Delta x = -L_y \\
 & \nabla_x^T g(x) \cdot \Delta x - \Delta l = -L_z \\
 & \nabla_x^T g(x) \cdot \Delta x + \Delta u = -L_w \\
 & Z \cdot \Delta l + L \cdot \Delta z = -L_l^\mu \\
 & W \cdot \Delta u + U \cdot \Delta w = -L_u^\mu
 \end{aligned} \tag{3-15}$$

写成矩阵形式 (即原对偶内点法的修正方程):

$$\begin{bmatrix}
 H & -\nabla_x h(x) & -\nabla_x g(x) & -\nabla_x g(x) & 0 & 0 \\
 \nabla_x^T h(x) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \nabla_x^T g(x) & 0 & 0 & 0 & -I & 0 \\
 \nabla_x^T g(x) & 0 & 0 & 0 & 0 & I \\
 0 & 0 & L & 0 & Z & 0 \\
 0 & 0 & 0 & U & 0 & W
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \Delta x \\
 \Delta y \\
 \Delta z \\
 \Delta w \\
 \Delta l \\
 \Delta u
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 -L_x \\
 -L_y \\
 -L_z \\
 -L_w \\
 -L_l^\mu \\
 -L_u^\mu
 \end{bmatrix} \tag{3-16}$$

其中:

$$\begin{aligned}
 H &= -\left[\nabla_x^2 f(x) - \nabla_x (\nabla_x h(x) \cdot y) - \nabla_x (\nabla_x g(x) \cdot (z + w)) \right] \\
 L_x &= \nabla_x f(x) - \nabla_x h(x) \cdot y - \nabla_x g(x) \cdot (z + w)
 \end{aligned} \tag{3-17}$$

因此，在获得修正量后，能够不断迭代出新的最优解：

$$\begin{aligned}
 \mathbf{x}^{(k+1)} &= \mathbf{x}^k + \alpha_p \cdot \Delta \mathbf{x} \\
 \mathbf{y}^{(k+1)} &= \mathbf{y}^k + \alpha_d \cdot \Delta \mathbf{y} \\
 \mathbf{l}^{(k+1)} &= \mathbf{l}^k + \alpha_p \cdot \Delta \mathbf{l} \\
 \mathbf{u}^{(k+1)} &= \mathbf{u}^k + \alpha_p \cdot \Delta \mathbf{u} \\
 \mathbf{z}^{(k+1)} &= \mathbf{z}^k + \alpha_d \cdot \Delta \mathbf{z} \\
 \mathbf{w}^{(k+1)} &= \mathbf{w}^k + \alpha_d \cdot \Delta \mathbf{w}
 \end{aligned} \tag{3-18}$$

式中：k 为迭代次数； α_p 和 α_d 为步长，其计算公式为：

$$\begin{aligned}
 \alpha_p &= 0.9995 \min \left\{ \min \left(\frac{-l_i}{\Delta l_i}, \Delta l_i < 0; \frac{-u_i}{\Delta u_i}, \Delta u_i < 0 \right), 1 \right\} \\
 \alpha_d &= 0.9995 \min \left\{ \min \left(\frac{-z_i}{\Delta z_i}, \Delta z_i < 0; \frac{-w_i}{\Delta w_i}, \Delta w_i > 0 \right), 1 \right\}
 \end{aligned} \tag{3-19}$$

其中，l、u、z、w 取值必须大于 0。

但实在是计算过程中，可能会出现电网节点数较多，导致矩阵维数太大，造成计算量过大，计算速度太低的现象。因此，本文使用以下方法减小矩阵维数。

$$\Delta \mathbf{l} = \mathbf{L}_z + \nabla_x^T \mathbf{g}(\mathbf{x}) \cdot \Delta \mathbf{x} \tag{3-20}$$

$$\Delta \mathbf{u} = -\mathbf{L}_w - \nabla_x^T \mathbf{g}(\mathbf{x}) \cdot \Delta \mathbf{x} \tag{3-21}$$

$$\Delta \mathbf{z} = -\mathbf{L}^{-1} \cdot \mathbf{Z} \cdot \nabla_x^T \mathbf{g}(\mathbf{x}) \cdot \Delta \mathbf{x} - \mathbf{L}^{-1} (\mathbf{Z} \cdot \mathbf{L}_z + \mathbf{L}_l^\mu) \tag{3-22}$$

$$\Delta \mathbf{w} = \mathbf{U}^{-1} \cdot \mathbf{W} \cdot \nabla_x^T \mathbf{g}(\mathbf{x}) \cdot \Delta \mathbf{x} + \mathbf{U}^{-1} (\mathbf{W} \cdot \mathbf{L}_w - \mathbf{L}_u^\mu) \tag{3-23}$$

继而，

$$\mathbf{H}' \cdot \Delta \mathbf{x} + \nabla_x \mathbf{h}(\mathbf{x}) \cdot \Delta \mathbf{y} = \mathbf{L}'_x \tag{3-24}$$

$$\mathbf{H}' = -[\nabla_x^2 f(\mathbf{x}) - \nabla_x (\nabla_x \mathbf{h}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{y}) - \nabla_x (\nabla_x \mathbf{g}(\mathbf{x}) \cdot (\mathbf{z} + \mathbf{w}))] + \nabla_x \mathbf{g}(\mathbf{x}) \cdot [\mathbf{U}^{-1} \mathbf{W} - \mathbf{L}^{-1} \mathbf{Z}] \cdot \nabla_x^T \mathbf{g}(\mathbf{x})$$

$$\mathbf{L}'_x = \mathbf{L}_x + \nabla_x \mathbf{g}(\mathbf{x}) \cdot [\mathbf{L}^{-1} (\mathbf{Z} \cdot \mathbf{L}_z + \mathbf{L}_l^\mu) - \mathbf{U}^{-1} (\mathbf{W} \cdot \mathbf{L}_w - \mathbf{L}_u^\mu)]$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}' & \nabla_x \mathbf{h}(\mathbf{x}) \\ \nabla_x^T \mathbf{h}(\mathbf{x}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}'_x \\ -\mathbf{L}_y \end{bmatrix} \tag{3-25}$$

最终可以解出 Δx 、 Δy ，带入到(3-20) - (3-23)即可得到 Δl 、 Δu 、 Δz 、 Δw 。
 本文采用的原对偶内点法求解最优潮流，其具体流程如下图 3-6 所示

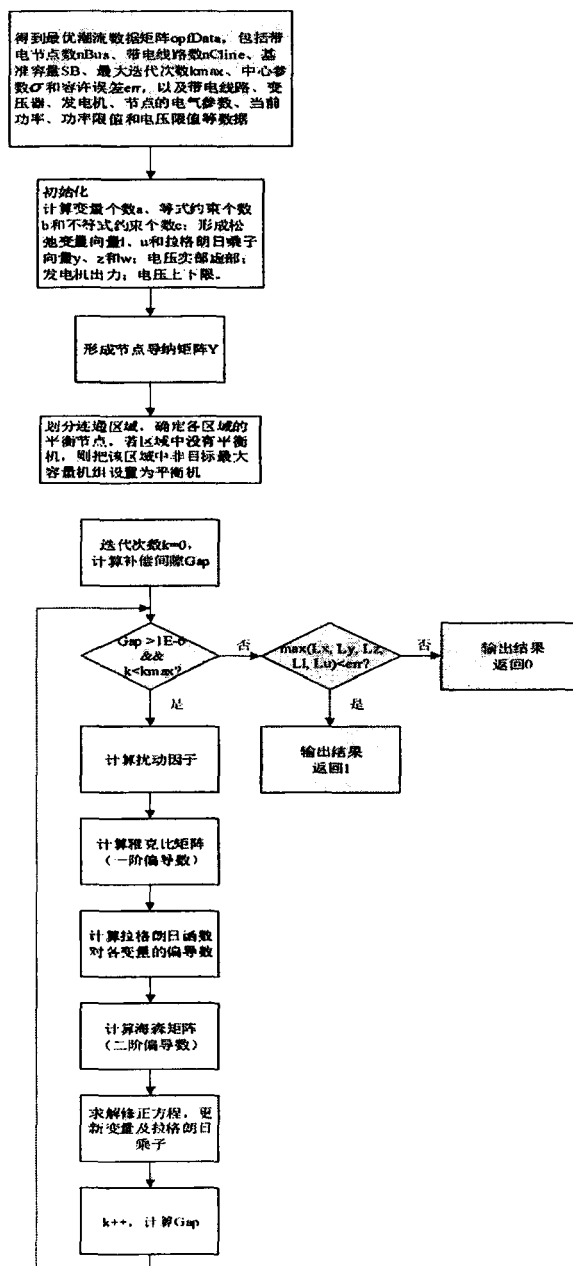


图 3-6 原对偶内点法求解最优潮流流程图

3.3.3 暂态校验

由于在电网自愈初期，发电机组需对空载输电线路进行充电。此工况与正常

工况不同，机组往往有功出力极低但容性无功出力较大。若设备参数配合不当，则具有助磁作用的容性电流将与机端电压形成正反馈，导致发电机端的电压迅速增大，造成自励磁事故，严重时损坏设备。因此对每一步可行操作进行自励磁校验显得尤为重要。

综合反应同步自励磁、推斥同步自励磁、异步自励磁的自励磁边界，可知自励磁的发生区域如下图 3-7 所示。

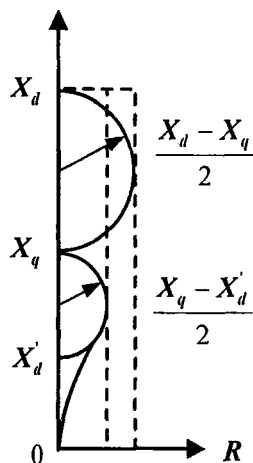


图 3-7 发电机自励磁区域

由上图所示自励磁区域可得机组自励磁判据如下：

$$X_c > X_d \text{ 或 } R > \max \left\{ \frac{X_d - X_q}{2}, \frac{X_q - X'_d}{2} \right\} \quad (3-26)$$

式中， X_d 为发电机的直轴同步电抗， X_q 为发电机的交轴同步电抗， X'_d 为电机直轴暂态电抗。

当然，若有 $X_c < 0$ 成立，即外部等值电抗实际呈感性，则自励磁亦不会发生。

本文采用工程实用判据，在稳态模型中进行自励磁校验。采用容量比较法研究某省电网自励磁发生可能性，只要系统产生无功小于发电机容量与短路比之积，则不会发生自励磁，如式 3-27 所示。

$$\sum_{j=1}^{nl} Q_{Lj} < \sum_{r=1}^{nB} K_{CB_r} S_{Br} \quad (3-27)$$

式中： K_{CB_r} 为黑启动机组 r 的短路比； S_{Br} 为黑启动机组 r 的额定容量； Q_{Lj} 为线路 j 产生的无功功率。

3.3.4 恢复策略流程

本节提出的电网解列后系统恢复策略流程如下图 3-8 所示：

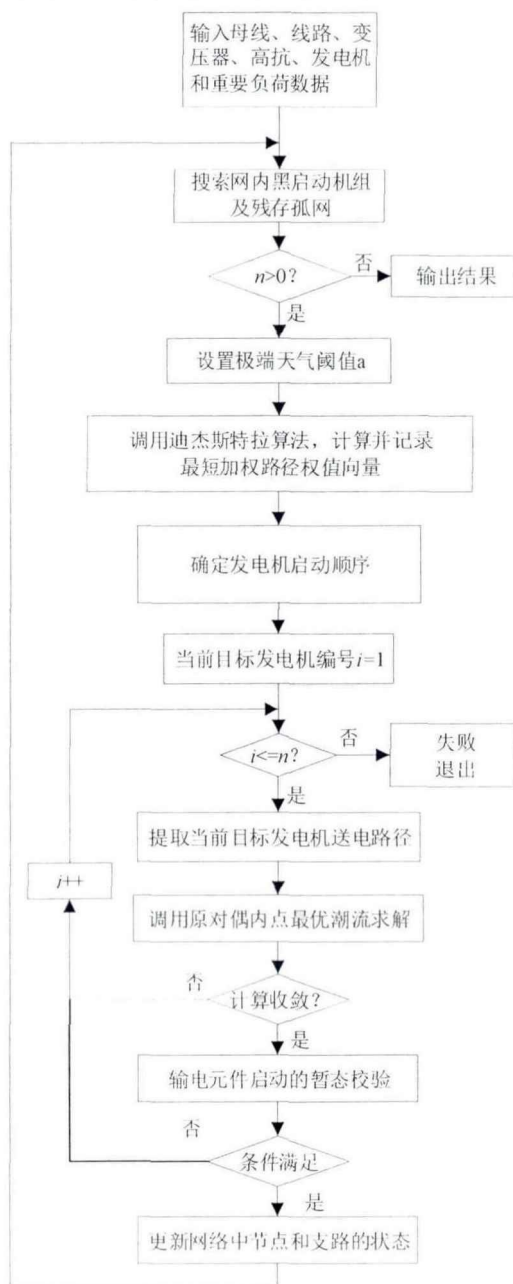


图 3-8 电网解列后系统恢复策略流程图

步骤 1：建立计及发电机组状态的详细发电机时间模型以及确定作为黑启动电源的发电机组并在网内搜索残存的孤网；

步骤2: 建立支路启动时间模型, 在考虑支路的启动时间的前提下, 加入支路的充电功率、高压电抗器容量来表征无功功率对高压线路充电的影响;

步骤3: 通过迪杰斯特拉算法搜索出所有发电机的最优启动路径, 然后对所有未启动的发电机组进行排序, 确定目标发电机;

步骤4: 确定目标函数, 保证每一步中启动发电机所需时间最长的机组的时间最小;

步骤5: 利用原对偶内点最优潮流算法求解目标函数, 如果结果收敛, 则表示目标发电机可以启动;

步骤6: 发电机启动路径的暂态校验, 主要是过励磁校验;

步骤7: 将刚刚启动的发电机组从未启动发电机组中删除, 并将带电输电线路的权重值修改为原来的五分之一, 并增加已启动发电机之间的虚拟支路, 然后重复步骤3-7;

步骤8: 根据优化目标的不同选择最终的启动方案。

3.4 算例分析

本节以 IEEE30 节点标准系统及广东省实际运行电网作为算例, 说明电网解列后系统快速恢复方法的流程及有效性。

3.4.1 IEEE30 节点系统算例分析

采用 IEEE-30 节点标准系统 (如图3-9) 对本文提出的恢复方法进行测试。此图中可以看出, 该系统包括30个带电节点, 其中发电机节点有6个, 变压器节点有4个, 输电支路有37条。

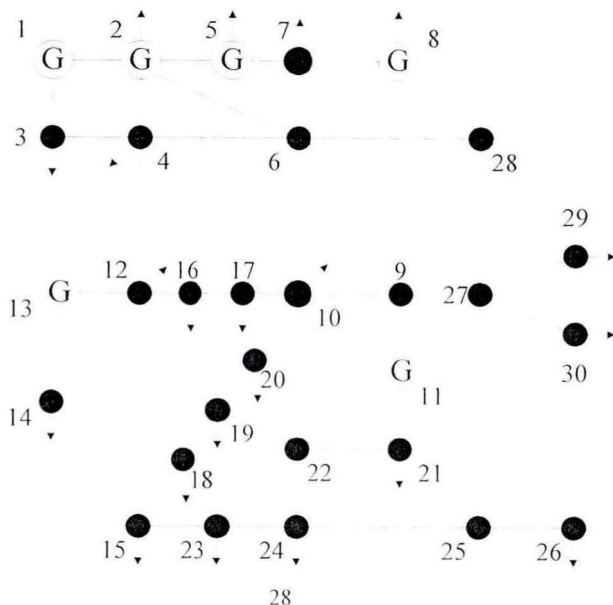


图 3-9 IEEE30 节点标准系统的电网结构图

系统中节点 1 位置的发电机组的爬坡率较高,因此被选为黑启动机组,其余 5 台机组均为常规火电机组,发电机组的各项启动特征参数如下表 3-2 所示。

表 3-2 发电机的启动特征参数

发电机编号	节点	容量/pu	启动容量/pu	爬坡率/pu
G1	1	2.61	0.261	1.50
G2	2	0.40	0.036	0.21
G3	5	0.20	0.014	0.09
G4	8	0.20	0.010	0.10
G5	11	0.20	0.016	0.08
G6	13	0.20	0.018	0.15

根据本章提出的电网恢复策略,能够计算出各阶段发电机组的恢复顺序、送电路径及所需的恢复时间,如下表 3-3 所示。

表 3-3 各阶段计算结果

阶段	待启动发电机	送电路径	负荷功率 有功/无功	恢复耗时 min
1	G4	1-2-6-8	0.142/0.083	30
2	G2	2	0.172/0.101	35
3	G3	2-5	0.216/0.126	40
4	G5	6-9-11	0.293/0.143	50
5	G6	2-4-12-13	0.216/0.126	60

由表 3-3 可以看出,本文所提出的方法能够充分利用网内的黑启动电源及已恢复的发电机,做到网络的快速恢复,达到文献[18]所提出的在系统全黑时的扩展黑启动效果,证明了此种电网恢复方法的可行性。

3.4.2 实际系统算例分析

江中珠分区,包括江门、中山、珠海三市,总计节点 280 个、发电机 18 台、线路 155 条、变压器 213 台。其电气接线图如图 3-10 所示。

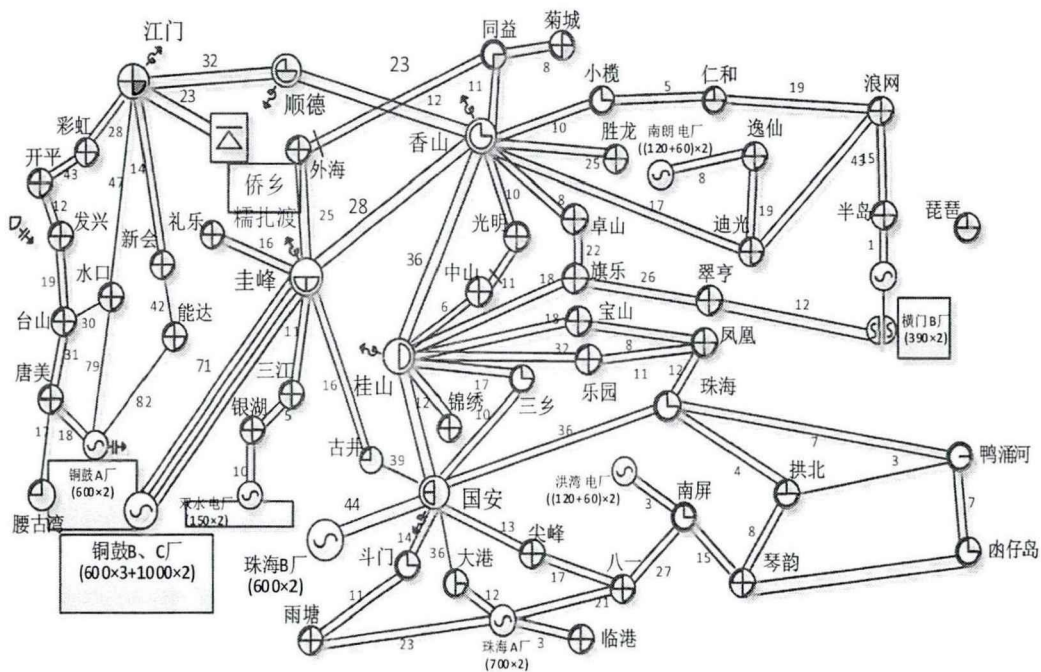


图 3-10 江中珠分区示意图

本地区所在的黑启动机组为铜鼓厂，采用本文提出的恢复策略得到其启动方案，如图 3-11 所示，所用时间为 322 分钟。

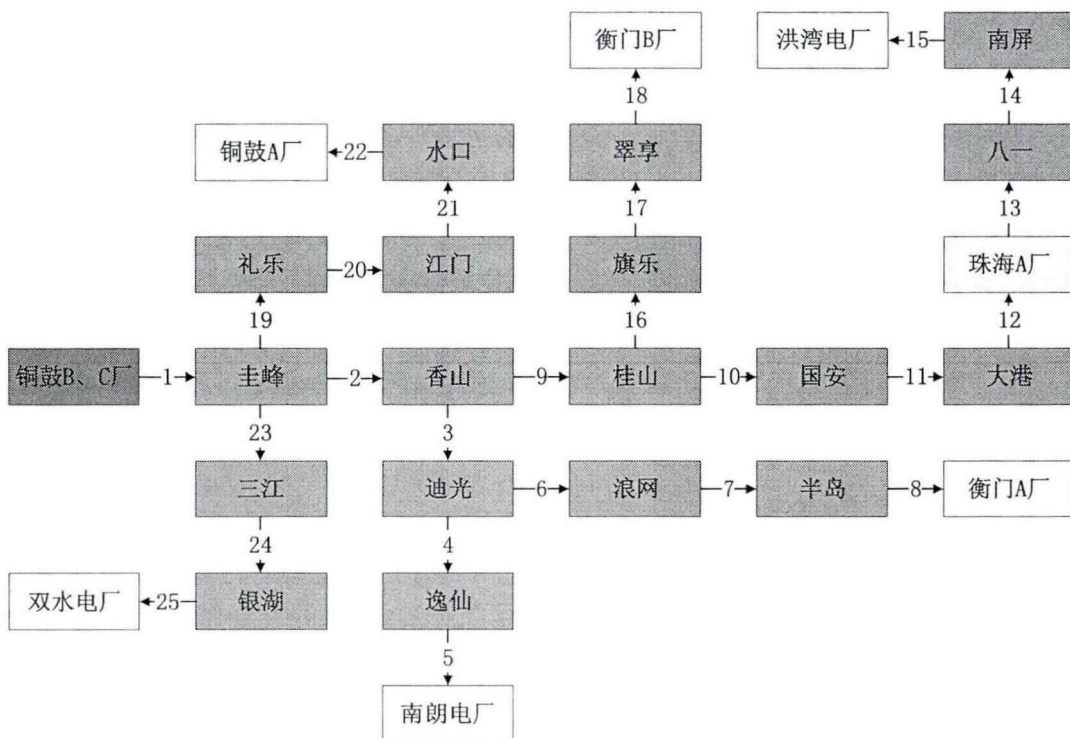


图 3-11 铜鼓 B、C 厂作为黑启动电源时电网恢复方案

但是，根据本文第 2 章的描述，可以筛选出洪湾电厂与南屏站所组成孤网的不平衡功率低于 30%，能够在电网发生故障时，主动解列，做到稳定运行。因此，洪湾电厂可以作为黑启动电源来进行电网恢复，下图 3-12 为电网恢复方案，恢复所用时间为 285 分钟，节省时间百分比超过 11.4%。

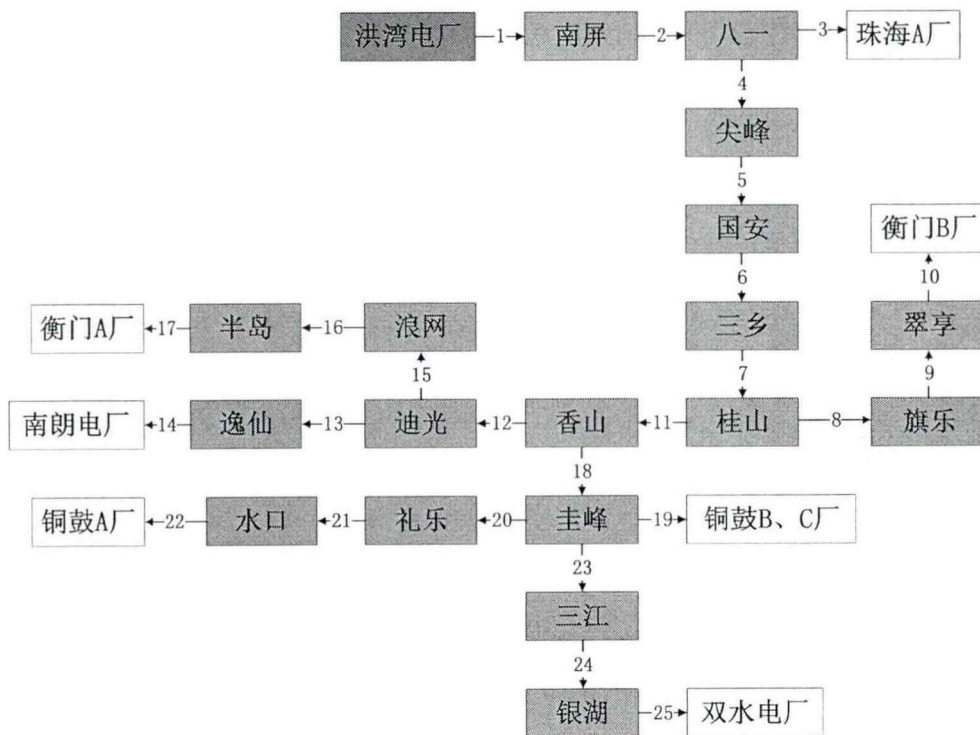


图 3-12 洪湾孤网作为黑启动机组时电网恢复方案

当然，因为铜鼓电厂自身可以作为黑启动电源，洪湾电厂可以主动与大电网解列孤网运行，因此这个两个都可以作为启动电源，下图 3-13 为恢复方案，恢复时间为 197 分钟，节省时间百分比超过 38.8%。

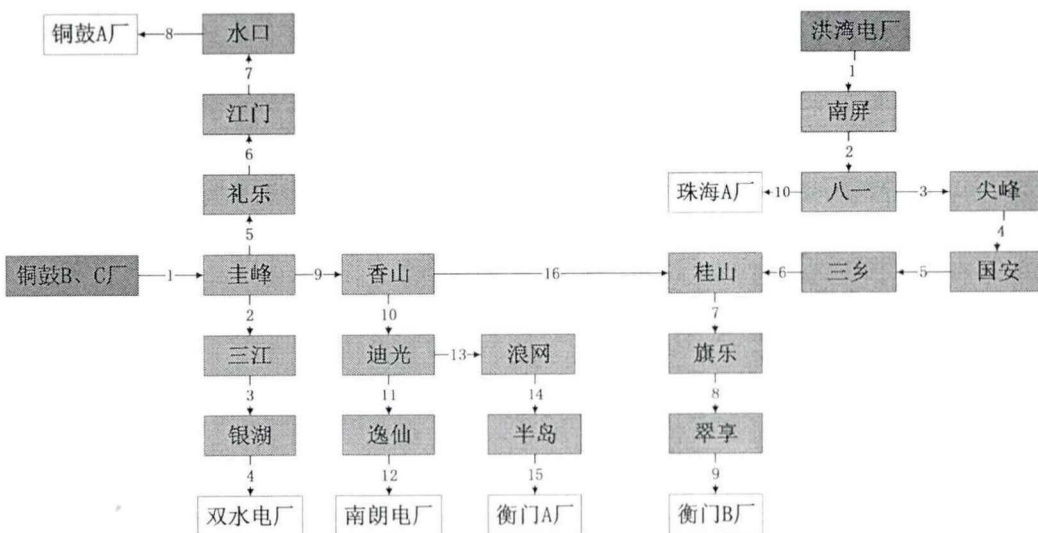


图 3-13 铜鼓电厂和洪湾孤网同时作为黑启动电源的电网恢复方案

目前,江中珠分区黑启动机组仅洪湾电厂,其他机组均不具备黑启动能力,在电网事故发生后,采取主动解列及孤网控稳措施后,洪湾电厂能够存活,带厂用电继续运行,不仅能够增加黑启动电源的数量,而且因为其能够迅速送出功率,所以大大加快了整个电网的恢复速度。因此,两个电厂同时作为黑启动电源,能够做到电网恢复的最优化。

通过上述分析可以看出,本文所提出的电网解列后的电网恢复策略,不仅适应于电网全黑的情况,也充分考虑了残存的孤网对电网恢复的贡献,较大地缩短了系统恢复所用时间,做到了电网恢复速度的最优化,减少了停电带来的经济损失。

3.5 本章小结

在系统发生故障后,采用第 2 章提出的一系列控制措施来使尽可能多的孤网存活。在此基础上,建立了完善的发电机模型,将现阶段国内投入使用的主要机组类型囊括,并建立了考虑多种影响因素的支路模型,以每阶段系统恢复所需时间最短为目标函数,确定最优的系统恢复方案,最后分别以 IEEE30 节点的标准系统和广东省的实际电网算例做了验证,证明了电网解列后孤网的稳定对电网快速恢复的促进性。

第 4 章 极端天气对系统自愈恢复的影响

导致电网解列甚至造成全黑的因素有很多，但其中极端天气所占比重最大，因此，考虑极端天气对电网恢复过程的影响，不仅能够使得电网恢复方案更合理化，而且能够避免二次事故的发生。

4.1 极端天气对电网恢复的影响

虽然现代电网为了提高自身安全稳定性，采取了一系列的安稳措施，但是由于互联电网的复杂性以及极端天气等一些不可抗因素的存在，导致电网存在发生大停电事故的可能性。2008 年由于低温冰雪灾害造成我国南方电网大面积停电^[25]，2009 年 11 月由于雷电暴雨天气造成巴西国内损失 40% 的负荷，2012 年由于高温天气导致了输电线路超负荷，随后发生连锁故障，造成了印度全国近一半的地区停电，超 6.7 亿人受到影响^[26]。极端天气引起的电网事故，常常会伴随着系统内电力元件不同程度的损坏，以往按正常状态制定的恢复策略不再适应^[27-28]。因此制定极端天气情况下的电网恢复策略是很有必要的。

在孤网稳定后的电网恢复阶段，可以根据关注目标的不同划分为 3 个阶段：机组启动阶段（1-2 小时）、网络恢复阶段（3-4 小时）和负荷恢复阶段（8-10 小时）^[29-30]。本文关注电网解列后的机组启动和网络恢复阶段，其主要为系统快速恢复方案的规划设计。合理的发电机启动顺序及其最优送电路径可以充分利用网内发电机的启动特性，最大程度发挥其发电能力，对整个系统恢复有很大影响。文献[31]在肯定发电机排序的重要性的同时，给出了在这个过程中需要遵循的一系列原则。文献[32-33]将系统发电量作为最大目标函数，并采用快速非支配排序算法进行发电机启动顺序的优化。文献[34]在此基础上将机组恢复问题分层处理，提出协调恢复优化方法。

在机组启动顺序确定的前提下，能否顺利启动还受到送电路径选择及其输电元件可靠性的影响，同时发电机的启动顺序也会受到其送电路径选择的影响，即两个主要的关注问题是相互契合的。文献[35]系统地研究了网络恢复阶段的路径寻优问题，利用多项式时间算法分别给出了“串行”和“并行”送电阶段的寻优策略。

从上述分析可以看出，现阶段针对网络恢复阶段的研究没有很好的考虑到暴雪、低温、飓风等极端天气对发电机及输电元件启动的影响。本文针对这一问题，考虑到极端天气对发电机启动过程及输电元件充电过程的影响，把送电路径以时间权重值的形式考虑到发电机的顺序优化过程中，使两者更好地关联起来，得到

最合理的网架时序恢复方案。

4.2 极端天气下支路模型的建立

输电线路能否能够安全投运的风险主要是受外部气象环境的影响，特别是极端气象灾害的冲击作用而导致的电气或物理失效。学者们针对低温、暴风、雷电、冻雨等极端天气引起的输电线路及变压器的停运及损坏率模型做了大量的研究。

文献[36]利用模糊数学上的if-then规则分析气候对线路的影响概率，并计算出其停止运行的概率。文献[37]采用区间概率的方法，制定输电元件的非精确可靠性判断标准。文献[38]在上述研究基础上运用联系数理论，采用深度优化算法计算得到该天气状态下的输电元件可靠性指标。

本文采用了降半 τ 型分布作为输电元件（输电线路和变压器）的受极端天气影响损坏概率，如图4-1所示。

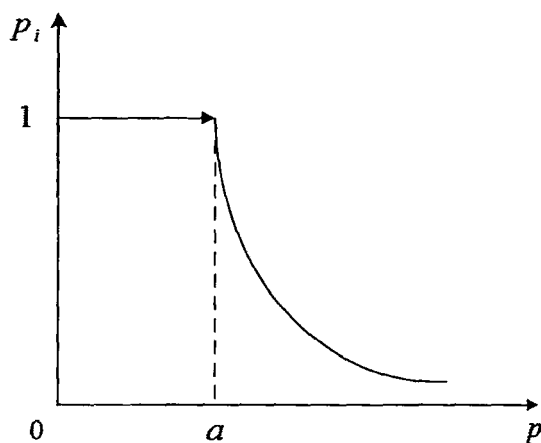


图 4-1 输电元件受极端天气影响损坏概率

其中，横坐标 p 为输电元件受极端天气影响下的可能损坏概率，纵坐标 P_i 为输电元件受极端天气影响的指标函数值。由图4-8可知，当输电元件的损坏概率小于某一给定的阈值 a 时，其受极端天气影响的指标函数值 P_i 恒为1，当超过阈值 a 时，其受极端天气影响的指标函数值随着损坏概率的增加而减小。

本文定义受极端天气影响的指标函数为式(4-1)，其函数值的倒数表示了输电元件的可能损坏概率对路径启动时间权重值的影响程度。

$$P_i = \begin{cases} 1 & (p < a) \\ \exp[-(p-a)] & (p > a) \end{cases} \quad (4-1)$$

其中， a 表示选择阈值，调度人员可以根据经验设置。本文选择 $a=0.3$ ，表示当输电元件受极端天气影响的可能损坏概率小于0.3时，认为其启动过程没有受到影响；当其概率大于0.3时，在恢复启动阶段会尽量避免选择该元件。

本文除了考虑极端天气对输电元件恢复带来的影响,还将线路电容和高压电抗器的因素计及进来。在输电线路充电启动环节,由于线路自身充电电容的存在,将会产生大量的无功功率,造成系统某些区域电压升高,从而导致系统恢复时间的增加。因此,在线路启动过程中会优先选择充电功率较小的线路。同样地,装有电抗器补偿装置的线路在启动时会消耗无功功率,从而解决了无功功率过剩的问题。另一方面,在实际电网操作中,相较于输电线路,变压器的启动过程更为复杂,不仅需要一些保护装置的检查,而且需要进行冲击合闸的试验,因此,变压器的启动时间会大于输电线路。

根据上述分析,本文采用的支路时间模型为:

$$W_i = \frac{mT_i + (Q_{Ci} - Q_{Li})}{P_i} \quad (4-2)$$

式中, W_i 为极端天气情况下支路的启动时间权重值; T_i 为正常启动情况下支路的启动时间; m 为一正整数,表示时间权重值的比例系数,用来保证变压器的启动时间要大于输电线路; Q_{Ci} 和 Q_{Li} 分别表示线路 i 的充电功率和所配置的高压电抗器容量; P_i 表示输电元件受到极端天气影响的严重程度,由式(4-2)得到。

4.3 算例分析

本节以 IEEE30 节点标准系统作为算例,说明极端天气下电网解列后系统快速恢复方法的流程及有效性。

采用 IEEE-30 节点标准系统(如图4-2)对本文提出的恢复方法进行测试。此图中可以看出,该系统包括30个带电节点,其中发电机节点有6个,变压器节点有4个,输电支路有37条。假定图中的圆形区域受到极端天气影响,主要包含了1台发电机组,2台变压器和8条输电线路。

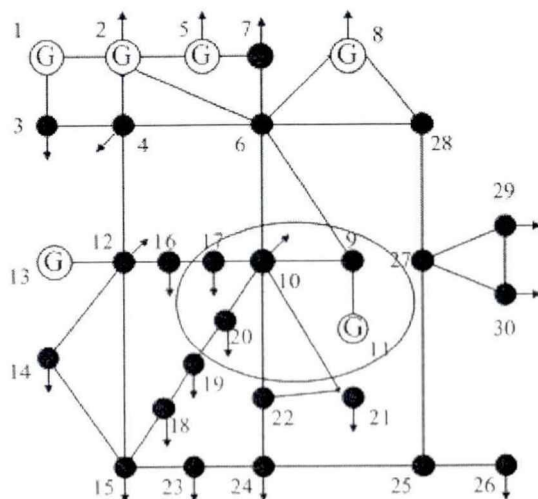


图 4-2 IEEE30 节点标准系统的电网结构图

IEEE30节点标准系统所包含的输电线路和变压器在考虑充电电容和高压电抗器容量后的支路启动时间权重值如表4-1所示（其中，支路权重值为10的四条支路是变压器支路）。

表 4-1 输电线路和变压器的启动时间权重值

始端节点	末端节点	支路权重值	始端节点	末端节点	支路权重值
1	2	5.2	18	19	5.2
1	3	5.3	19	20	5.2
2	4	5.3	10	20	5.2
3	4	5.2	10	17	5.1
2	5	5.6	10	21	5.1
2	6	5.2	10	22	5.3
4	6	6	21	22	5.1
5	7	5.4	15	23	5.1
6	7	5.5	22	24	5.2
6	8	6	23	24	5.2
6	28	5.3	24	25	5.3
8	28	5.8	25	26	5.2
9	11	5.3	25	27	5.5
9	10	5.3	27	29	5.4
12	13	5.3	27	30	5.1
12	14	5.5	29	30	5.2
12	15	5.2	4	12	10
12	16	5.1	6	10	10
14	15	5.3	6	9	10
15	18	5.2	28	27	10
16	17	5.1			

在受到极端天气影响后，输电线路可能损坏概率采用文献[35]提出的可能损坏概率值，并且将阈值设置为0.3，也就是当其概率小于0.3时不予考虑，仅当正常元件处理；大于0.3时将会影响其启动时间。阈值 a 的大小可以根据调度人员的经验自行设置。受极端天气影响的区域内的输电元件的可能损坏概率如表4-2所示。

表 4-2 受极端天气影响后的输电元件可能损坏概率

首端节点	末端节点	可能损坏概率 P_i
6	10	0.15
6	9	0.35
9	10	0.45
10	17	0.50
10	20	0.50
19	20	0.25

9	11	0.55
10	21	0.60

接下来调用迪杰斯特拉算法找到所有未启动的发电机的最优送电路径,如表4-3所示。

表 4-3 目标发电机的最优送电路径及其权重值

发电机节点编号	路径权重 D	送电路径
2	10.2	1-2
5	10.6	1-2-5
8	35.2	2-6-8
11	126.5	2-6-9-11
13	35.6	2-4-12-13

综合考虑发电机自身启动特性后,得到的最终的所有发电机的启动顺序如表4-4所示。

表 4-4 各节点上发电机的启动顺序

发电机节点编号	路径权重值	发电机权重值	极端天气影响程度	优先级指标
2	0	0.17	0	0.17
5	0.03	0.16	0	0.19
8	0.22	0.1	0	0.32
11	1	0.2	0.5	2
13	0.22	0.12	0	0.33

由表4-4可得,此时目标发电机排序向量为{2,5,8,13,11},位于2节点的发电机优先级最高。由表4-3可得该发电机的最短送电路径为1-2。

在目标发电机启动之后,更新系统中节点和支路的状态,重新求解系统恢复方案。最后得到各阶段的发电机启动顺序和恢复时间如表4-5所示。

表 4-5 电力系统恢复各阶段发电机启动顺序及恢复时间

阶段	发电机节点编号	送电路径	节点电压最大值	节点电压最小值	恢复时间	是否发生自励磁
1	2	1-2	0.956	0.951	20.2	否
2	8	2-6-8	0.957	0.952	46.4	否
3	5	2-5	0.964	0.957	67	否
4	13	2-4-12-13	0.967	0.959	102.6	否
5	11	6-9-11	0.973	0.952	132.9	否

与本文 3.4 节中所得出的电网恢复结果相比,本节所提出的考虑极端天气的电网恢复方法,充分考虑了各种电力元件的状态,将受极端天气影响的输电元件的恢复时间相应增大,避免表 4-2 中的输电线路在送电路径中被选择上,优先恢

复不受极端天气影响的元件，从而减少了发生二次事故的可能性。对于受极端天气影响最为严重的第 11 节点发电机选择最后启动，在一定程度上虽然增加了电网恢复所需要的时间，但是就恢复风险而言，这是在安全恢复的前提下的最优恢复策略。

4.4 本章小结

本章首先介绍了极端天气对电网恢复过程的影响，并建立受极端天气影响的输电元件恢复模型，以潜在损坏概率的形式表示出支路受极端天气影响的严重程度。保证每个阶段中的送电路径合理化，避免了二次事故的发生。最后，以 IEEE30 节点的标准系统算例做了验证，证明了极端天气情景下网恢复策略的合理性。

第 5 章 总结与展望

目前,我国电网已经形成多回超高压交直流大通道,输电能力和实际送电规模均位于世界前列。但是,随着电网复杂程度的提高以及负荷的不断加重,电网稳定运行的裕度减小。

同时,由于系统的互联性,可能因为局部电网的不稳定,进而造成系统发生大规模连锁故障,同时由于多发的极端天气的影响以及操作人员的失误,也可能导致电网发生停电事故。作为电网的重要组成部分,开展电网解列后的防止大面积停电的电网快速恢复理论和实践研究,有着重要的技术和经济意义。本文对电网解列后系统恢复控制策略进行了深入的研究,完成的主要工作总结如下:

(1) 建立了孤网的详细模型,从理论上分析得到适应于孤网模式下的各项控制措施。

详细分析了孤网运行与大电网运行方式的不同,总结了孤网运行的主要特点,并建立其详细的模型,获得传递函数。并在此基础上,利用主导极值和根轨迹的方法,分析各个主要参数对孤网稳定的影响,得到有利于孤网稳定的各项措施。最后,利用广东电网 BPA 格式下的潮流和稳定数据筛选出能够在电网发生解列后孤网运行的电厂,从根本上加快了后期电网恢复速度。

(2) 建立详细的发电机及支路模型,设计完整的电网恢复策略,确定最优的系统恢复方案。

在系统发生故障后,通过采取主动解列等一系列控制措施来使尽可能多的孤网存活。在此基础上,建立了完善的发电机模型,将现阶段国内投入使用的主要机组类型囊括,并建立了考虑多种影响因素的支路模型,以每阶段系统恢复所需时间最短为目标函数,确定最优的系统恢复方案,最后分别以 IEEE30 节点的标准系统和广东省的实际电网算例做了验证,证明了电网解列后孤网的稳定对电网快速恢复的促进性。

(3) 提出了适应于极端天气情况的电网解列后系统快速恢复方法。

首先介绍了极端天气对电网恢复过程的影响,并建立受极端天气影响的输电元件恢复模型,以潜在损坏概率的形式表示出支路受极端天气影响的严重程度。保证每个阶段中的送电路径合理化,避免了二次事故的发生。最后,以 IEEE30 节点的标准系统算例做了验证,证明了极端天气情景下网恢复策略的合理性。

本文虽然考虑了孤网对电网恢复的促进作用,但是采用的孤网类型大多是单机带厂用电,规模较小,对电网恢复的促进作用有限,下步工作可以集中在孤网的分类及控制上,筛选规模更大的孤网。

参考文献

- [1] 张磊,彭璇,马亚鑫.我国智能电网技术的现状与发展研究[J].中小企业管理与科技(下旬刊),2016(05):151-152
- [2] 伦涛,韩鹏飞,贺静波,冯长友.近年国外大停电事故概述及分析[J].中国能源,2012,34(02):41-43+33
- [3] Andersson G,Donalek P,Farmer R, et al. Causes of the 2003 major grid blackouts in north America and Europe and recommended means to improve system dynamic performance[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 1922-1928
- [4] Liang Z, Ge R, Dong Y, et al. Analysis of large-scale blackout occurred on July 30 and July 31, 2012 in India and its lessons to China's power grid dispatch and operation[J]. Power System Technology, 2013.
- [5] 巴西“2·4”大停电事故及对电网安全稳定运行的启示[J]. 林伟芳,汤涌,孙华东,郭强,赵红光,曾兵. 电力系统自动化. 2011(09)
- [6] Sun W, Liu C C, Zhang L. Optimal Generator Start-Up Strategy for Bulk Power System Restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3):1357-1366
- [7] 王秀明,宋晓刚,李成哲.智能变电站防止大面积停电事故措施[J].哈尔滨理工大学学报,2015,20(04):104-108
- [8] 荣幸.强化电网规划建设应对极端天气对电网的影响[J].科技创新与应用,2016(33):218
- [9] Huang J, Ling R, Jianhui M A, et al. Construction of Intelligent Map Drawing System for Extreme Weather Zones for Power Grids[J]. Power System & Clean Energy, 2014
- [10] 冰雪灾害对电网的影响及防范措施[J]. 吴向东,张国威. 中国电力. 2008(12)
- [11] Zhang J M, Tian-Shu B I, Hui L, et al. Review of frequency stability for islanded power system[J]. Power System Protection & Control, 2011, 39(11):149-154.
- [12] Zhang P, Li X, Wang Y, et al. Research on Frequency Stability in Isolated Power Grid[C]// Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. IEEE, 2012:1-4.
- [13] Wang J, Wang X R, Xie D P, et al. Investigation of under frequency load shedding on an isolated system[J]. Power System Protection & Control, 2010.
- [14] Andersson G,Donalek P,Farmer R, et al. Causes of the 2003 major grid blackouts in north America and Europe and recommended means

- to improve system dynamic performance[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 1922-1928
- [15] 邓婧,李兴源,魏巍. 汽轮机超速保护控制系统的性能优化及其对电网频率的影响分析[J]. 电网技术,2010,34(12):50-56
- [16] Meng J, Shi X, Yi W, et al. Control Strategy of DER Inverter for Improving Frequency Stability of Microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4):70-79
- [17] A. Ketabi, H. Asmar, A. M. Ranjbar, et al. An approach for optimal units start-up during bulk power system restoration[C]. Power Engineering, 2001: 190-194
- [18] Liu C, Deng Y, Lu E, et al. Optimization of generator start-up sequence in power system restoration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18):55-59.
- [19] Gu X, Zhong H, Jia J, et al. Extended black-start schemes of power systems[J]. Proceedings of the Csee, 2011, 31(28):25-32.
- [20] Adibi M M, Borkoski J N, Kafka R J. Power System Restoration - The Second Task Force Report[J]. Power Systems, IEEE Transactions on. 1987, 2(4): 927-932
- [21] 王丹昕, 房鑫炎. MATLAB 在系统灾变恢复相关问题研究中的应用[J]. 继电器, 2002, 04: 22-25
- [22] 杨艳, 赵书强, 顾雪平, 杨兴宇, 魏利民. 黑启动方案中启动厂用负荷时电压与频率的仿真校验[J]. 继电器, 2004, 08: 22-25
- [23] 冯丽, 金黎明, 张同尊, 等. 考虑恢复路径充电时间的机组启动次序决策方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18):4904-4910
- [24] 孙磊, 刘伟佳, 林振智, 等. 计及线路投运风险的电力系统恢复路径优化[J]. 电力系统自动化, 2015(23)
- [25] 张振环. 从南方雪灾事件探讨我国电网建设的完善 [J]. 中国科技论坛, 2008(05):102-106
- [26] 梁志峰, 葛睿, 董昱, 陈刚. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及对我国电网调度运行工作的启示[J]. 电网技术, 2013, 37(07):1841-1848
- [27] 蔡新雷, 范文礼, 张文一, 黄少伟. 考虑连锁故障的广东电网抗毁性分析[J]. 广东电力, 2016, 29(04):73-78
- [28] 刘亚东, 李振强, 刘金环. 电网应对极端天气的预案[J]. 农村电工, 2014, 22(03):6
- [29] Yunhe Hou, Chen-Ching Liu, Kai Sun, et al. Computation of milestones for decision support during system restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1399-1409

- [30] Adibi M, Clelland P, Fink L, et al. Power System Restoration - A Task Force Report[J]. Power Systems, IEEE Transactions on. 1987, 2(2): 271-277.
- [31] 顾雪平, 钟慧荣, 贾京华, 等. 电力系统扩展黑启动方案的研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, (28): 25-32
- [32] 卢恩. 基于大型火电机组 FCB 技术的电力系统智能恢复控制研究与应用[D]. 华南理工大学, 2014
- [33] 朱冬雪. 黑启动恢复中机组启动的分层协调优化[D]. 华北电力大学(保定) 华北电力大学, 2013
- [34] Liu C, Wu M, Xu W, et al. Optimisation model for online generators when a new generator is about to get started during power system restoration process[J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(1):57-63
- [35] Zhou Y H, Liu Y S, Xiang-Yong H U. Power System Network Reconstruction After Blackout[J]. Proceedings of the Csee, 2008, 28(10):32-36
- [36] Sun R, Cheng L, Sun Y. An outage rate model and system adequacy assessment based on adverse weather conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13):7-12
- [37] Xiaoyan L I, Ming D, Xianjun Q I. Interval reliability evaluation and affine arithmetic of transmission network considering weather factors[J]. Power System Protection & Control, 2016
- [38] 汪隆君. 电网可靠性评估方法及可靠性基础理论研究[D]. 华南理工大学, 2010

攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果

学术论文:

- [1] Gang Luo, Wei Xu, Chongru Liu, Feng Qian, Yinguo Yang, Junlei Liu, A method of adapting to grid recovery in extreme weather conditions[C]. The 6th International Conference on Renewable Power Generation, October 19-20, 2017, Wuhan, China
- [2] Chongru Liu, Minhao Wu, Wei Xu, Feng Qian, Gang Luo, Qingang Duan, Haiyang Hu, Jiayu Wang. Optimization model for online generators when a new generator is about to get started during power system restoration process [J]. IET Generation, Transmission & Distribution. 2017, 11(1): 57-63
- [3] Gang Luo, Chongru Liu, Wei Xu, Feng Qian, Yinguo Yang, Junlei Liu, Yunhao Zhao. Modelling and Simulation of HVDC systems Considering the Harmonics of Converter Based on Dynamic Phasors Theory[C].2017 2nd International Conference on Automation, Mechanical and Electrical Engineering, september 17-18, 2017, Shenzhen, China.
- [4] Gang Luo, Chongru Liu, Wei xu, Yinguo Yang, Feng Qian, Qingang Duan, A EMT-DP Hybrid Simulation Method of AC-DC Power System[C].2017 2nd International Conference on Automation, Mechanical and Electrical Engineering, september 17-18, 2017, Shenzhen, China
- [5] Gang Luo, Chongru Liu, Feng Qian, Yinguo Yang, Junlei Liu, Yunhao Zhao, Wei Xu, A Three-Phase Dynamic Phasor Model of HVDC Systems[C]. The 6th International Conference on Renewable Power Generation, October 19-20, 2017, Wuhan, China.

发明专利:

- [1] 罗刚, 刘崇茹, 徐伟, 钱峰, 杨银国, 段秦刚, 谭伟, 易杨, 胡海洋。 “一种适应在极端天气情况下电网快速恢复的方法”, 已受理
- [2] 罗刚, 徐伟, 刘崇茹, 杨银国, 钱峰, 谭伟, 段秦刚, 易杨, 胡海洋。 “一种考虑恢复时间模型的发电机排序方法”, 已受理

软件著作权:

- [1] 刘崇茹, 徐伟, 胡海洋, 郭龙. 考虑发电机详细启动时间模型的电网系统恢复软 V1.0. 已登记。(登记号: 22017R11S481240)

攻读硕士学位期间参加的科研工作

- [1] 广东电网公司电力调度控制中心“交直流混联电网解列控制与自愈恢复技术研究(自愈恢复部分)”，2015.6~2017.11，主要参与人。
- [2] 广东电网公司电力调度控制中心“大电网解列后分区电网稳定分析及控制技术研究”，2016.3-2017.11，主要参与人。

致 谢

衷心感谢导师刘崇茹教授在我读研的三年学习生活中对我的关心、指导与督促。刘老师治学研究严谨求实，待人处事宽容豁达，这些深深地影响了我。平日里，刘老师经常教导我，做任何事情都要严谨细致、一丝不苟，只有自己尽了最大的努力才有资格要求别人尽力。从选题到完成论文，刘老师对我进行了悉心的帮助和指导。刘老师的言传身教将使我终生受益，她宽厚待人的学者风范更是令我无比感动。在此谨向刘崇茹老师致以诚挚的谢意和崇高的敬意。

感谢我的父母，没有你们的关心和爱护就没有我的今天，在这一刻，将最崇高的敬意献给你们！

感谢胡海洋、徐东旭和师弟师妹们，感谢你们在我失落和彷徨时给予我的关心和帮助。

感谢关心和支持我的朋友们，谢谢你们！