

# Application of Parallel Computing in the Black Start of Smart Grid

Biguang Kong<sup>1</sup>, Youming She<sup>1</sup>, Zicai Ying<sup>1</sup>, Xiaoxin Liu<sup>1</sup>, Zhijian Liu<sup>2</sup>, Boqian Zhang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Nujiang Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Corporation of China Southern Power Grid, Nujiang Yunnan

<sup>2</sup>Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan

Email: 248400248@qq.com

Received: Nov. 6<sup>th</sup>, 2018; accepted: Nov. 17<sup>th</sup>, 2018; published: Nov. 29<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Application of big data techniques, based on parallel computing, in power system will contribute to the establishment of strong smart grid. This paper introduced the generational relationship of generation and discipline among smart grid, cloud computing and big data, based on the analysis of the relationships of smart grid, parallel computing and black start. Finally, the paper presented two examples of the application of the concept and technology of parallel computing in the black start. The application of parallel computing technology in the black start process will bring great changes to the important topics of the power system.

## Keywords

Smart Grid, Black Start, Parallel Computing, Cloud Computing, Big Data

---

# 并行计算在智能电网黑启动中的应用研究

孔碧光<sup>1</sup>, 余有明<sup>1</sup>, 英自才<sup>1</sup>, 刘晓欣<sup>1</sup>, 刘志坚<sup>2</sup>, 张伯谦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国南方电网云南电网公司怒江供电局, 云南 怒江

<sup>2</sup>昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明

Email: 248400248@qq.com

收稿日期: 2018年11月6日; 录用日期: 2018年11月17日; 发布日期: 2018年11月29日

---

## 摘要

以并行计算为基础的大数据技术为智能电网的发展注入了新的活力, 掌握大数据的关键技术对智能电网的建立具有重大意义。本文分析了智能电网、并行计算与黑启动之间的关系, 并且给出了智能电网、云

**文章引用:** 孔碧光, 余有明, 英自才, 刘晓欣, 刘志坚, 张伯谦. 并行计算在智能电网黑启动中的应用研究[J]. 智能电网, 2018, 8(6): 538-546. DOI: 10.12677/sg.2018.86059

计算与大数据技术的代际传承关系。最后通过两个例子，阐述了并行计算的理念与技术在黑启动方面的应用。并行计算技术在黑启动过程中的应用将为这个电力系统的重要课题带来重大转机。

## 关键词

智能电网，黑启动，并行计算，云计算，大数据

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着中国的不断富强，各个地区经济的飞速发展带动了电力负荷的增加，并促使电网规模不断增大。

“远距离大容量送电、区域大电网互联”已成为现代电网发展的主题。大电网的互联，使得电网运行变得更加可靠，但局部系统的故障也可能导致大面积停电事故，甚至使整个电力系统崩溃瓦解，给国民经济带来巨大损失。近年来，因此局部地区故障导致的大电网崩溃时有发生。2003年发生在美国、加拿大的“8.14”停电事故，时间长达29小时，波及地域2.4万平方公里，影响5000万人口，造成的经济损失高达300亿美元，是有史以来影响范围最广，损失最严重的大停电事故[1]。

大停电事故是一种难以避免的威胁与隐患，其原因大多是过负荷、输变电设备故障、监控及其保护系统的缺陷。它往往影响范围广，波及众多人口，造成极为严重的社会影响与经济损失。尽管经过几十年发展，电网安全稳定技术领域取得了很大进步，却依然存在一些如自然灾害、人为误操作、设备故障等不可抗拒的因素，影响着电力系统的安全稳定运行。

电力系统的恢复，其总目标是在系统全黑或部分停电的情况下安全、快速地恢复电网供电，最大限度地减少电网大停电的影响[2]。而黑启动作为大停电事故后快速恢复电力系统的第一步，一直是电力系统研究领域的重要课题。狭义的黑启动单纯指电网停电后，利用区域内现存的有着自启能力的电源，通过输电线路恢复附近发电机组的发电能力，形成小系统的过程。不过广义的黑启动过程实际上也包括了网架重构与负荷恢复阶段，基本等同于电力系统的恢复过程。

并行计算技术是现今热门的云计算与大数据技术的基础，随着相关技术的普及应用，已经融入到我们生活的方方面面[3]。而电力系统作为人类生活与经济发展所依赖的能量供给系统，也具有大数据的典型特征。云计算技术与大数据技术是智能电网的形成与发展的重要原因之一[4]。而黑启动问题在传统电网时期研究得较为成熟，并未充分利用到智能电网时期的云计算与大数据技术。若将并行计算的技术与理念进一步代入黑启动过程，能对智能电网时期的黑启动过程产生巨大的改善。

## 2. 智能电网、黑启动和并行计算的关系

### 2.1. 智能电网与并行计算的关系

并行计算，简单来说，就是同时使用多个计算资源来解决一个计算问题，可分为时间并行和空间并行，也可分为数据并行与功能并行。近年常常提到的云计算，是一种利用互联网实现随时、随地、按需、便捷地访问共享资源池(如计算设施、应用程序、存储设备等)的计算模式，与并行计算、集群计算、网格计算、分布式计算在概念上存在交叉。实际上，可将云计算视为在并行计算与分布式计算上发展起来的。

智能电网则是运用了通讯技术、信息技术与计算机技术等多种高新技术，高度集成原有的输、配电基础设施而形成的新型电网。与传统电网相比，它对供电安全性与可靠性、能源效率的提升有较大优势，同时还能减弱电力行业对环境的影响，并减少电网电能的损耗等。智能电网的理念是，首先获取更多的用户如何用电、怎样用电的信息，来优化电能的生产、分配及消耗，再利用现代网络、通讯等技术进行用电与发电信息的海量交互，来实现电网设备间的信息交换[5]。在这个过程中，智能电网还能自动完成信息的采集、测量、控制、保护、计量和监测等基本功能，根据用电与发电的需求，来支持电网的实时自动化控制、智能调节、在线分析决策和协同互动等高级功能。

因此电力行业相关的研究者指出：可以抽象的认为，智能电网是云计算与大数据这两个概念在电力行业中的应用。

### 2.2. 黑启动与并行计算的关系

所谓黑启动，是指整个电力系统因故障停运后，处于全“黑”状态，不依赖别的电力网络的帮助，通过系统中具有自启动能力的发电机组启动，带动无自启动能力的发电机组，逐渐扩大系统恢复范围，最终实现整个系统的恢复的过程。整个黑启动过程分为三个部分——自启电源点选择、网架重构和负荷恢复。

目前电力的学术界对传统电网的黑启动问题已开展了相对深入的探索与研究，总结出了黑启动过程中可能面对的各类问题和改良方法。并行计算技术在黑启动方面的使用较为狭窄，主要集中在黑启动恢复策略的优化与评估方面，通过同时对恢复策略几个互不影响的属性进行验证与优化，节省黑启动最优恢复方案的完成时间，进一步将黑启动过程的整体耗时缩短。

不过并行的理念已经应用在黑启动恢复策略的指定上了。现在常见的黑启动恢复的方式，主要可分为串行和并行以及两者混合的策略。相比通过单个黑启动电源逐步恢复电网内负荷的串行方式，同时启动多个具有自启动电源的子系统的并行恢复方式速度更快且路径规划等过程的难度较低，适合于对时间要求较为严苛的大系统。

### 2.3. 智能电网、黑启动、并行计算的相互关系

图 1 简要描述了智能电网、黑启动、并行计算三者之间的关系。

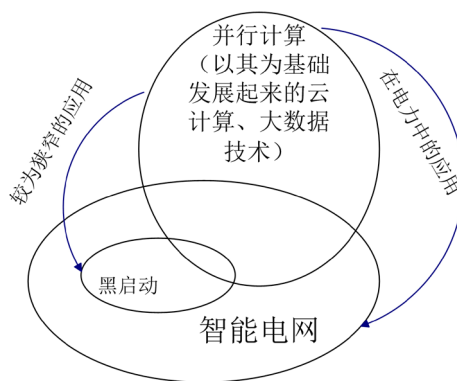


Figure 1. Relationships among parallel computing, smart grid and black start

图 1. 并行计算、智能电网与黑启动三者之间的关系

以并行计算、分布式计算技术发展起来的云计算，以及更进一步的大数据技术，能够对智能电网系

统内部的计算处理与存储资源进行整合，让电网的处理与交互能力得到巨大的提升，是智能电网强有力的组成部分；并行计算在电网黑启动方面暂时只有较为狭窄的应用，前景值得期待；电网黑启动虽然根植于传统电网，但随着时代的发展，也已经被智能电网囊括其中。三者之间如图所示，是互有交集的关系。

实际上，并行计算作为一个较为基础的概念，已经深深融入智能电网的方方面面，很难将它单独与黑启动或者智能电网建立关系。现在，它以云计算与大数据的方式更直观的与囊括了黑启动的智能电网产生联系。而智能电网、云计算、大数据三者之间的关系，从更加深层次来讲，是电力系统发展到不同阶段的产物，具有代际传承的特点。图2从代际传承的角度描述了三者之间的相互关系。

智能电网是对传统电网的继承与发扬，它应用了计算机技术、通讯技术与信息技术等在传统电网上验证成熟的结果，满足了如电网清洁化、信息化、智能化等更高层次的管理运营需求。因此，智能电网的发展会随着新技术的研发与普及同步进行。而云计算技术和大数据技术，作为计算机和信息技术领域最前沿的产物，对于智能电网，是在技术与应用层面的两个具有重大意义的高新技术[6]。

云计算技术中的并行计算技术与分布式储存技术，能够满足电网海量数据的计算与储存需求，相信以后的应用会越发广阔，并推动智能电网的进一步发展。依托于云计算技术而发展起来的电力大数据技术，更是其在智能电网中，高级业务需求的实现过程[7]。

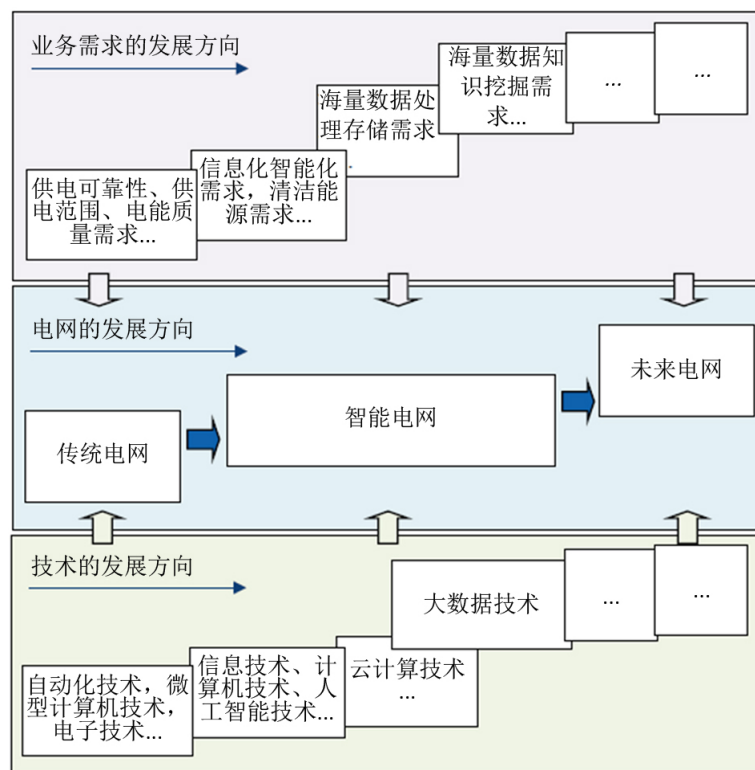


Figure 2. Evolution relationships among big data, cloud computing and smart grid  
图2. 大数据技术，云计算，智能电网的代际传承关系

### 3. 并行计算技术与理念在黑启动中的应用

电力大数据的应用场合涵盖发、输、变、配、用、调等电力行业的各个环节，在风电场选址、降低网损、风电并网、电网安全监测、大灾难预警、电力企业精细化运营、电力设备状态监测等领域都有非

常强的可实现性。随着智能电网建设的进一步推进，大数据技术在智能电网中将发挥越来越大的作用。

黑启动是指电力系统因故障导致全网停电后，仅依靠停电区域内能够自启动的发电机组带动其他无自启动能力的发电机组，逐渐以点带面，逐步恢复系统供电的过程，广义上讲，在自启动发电机组快速启动后，恢复附近的重要负荷，维持重要负荷的稳定运行，也称为黑启动过程[8]。

黑启动过程可以简单分为三个阶段，即黑启动电源点选择、网架重构、负荷恢复[9]。因此在制定黑启动恢复策略时也需要经过以下几个步骤：

1) 确定黑启动电源。黑启动过程中所要用到的电源可以分为两批，分别为第一批的自启动电源与第二批被启动电源。第一批启动电源必须是能够快速实现自启动的机组，通常选择具有优异的自启动能力的水轮机组、柴油机组和燃气轮机等。第二批启动电源为因故障而停运的大型电厂，不具有自启动能力，通过第一批启动电源的带动而恢复。第二批启动电源恢复后，在电网中形成分散的“孤点电源”，为后续的网架重构与负荷恢复奠定能源保障，完成黑启动过程中电网的“点”复原。

2) 确定网架重构方案。网架重构即是电网中的“孤点电源”相互链接的过程。通过系统内主要的发电机组，向重要的输电线路进行充电，恢复骨干输电线路，逐步重构电网网架，与此同时，向重要性高的负荷供电，恢复枢纽负荷节点，保障社会的正常运作，实现黑启动过程中的“线”复原。

3) 确定负荷恢复方案。网架重构后，系统的可靠性和稳定性有了一定的基础，大范围的负荷恢复成为首要目标。尽量以最短的时间恢复符合供电，减少停电时间，降低停电所带来的经济损失和社会危害，实现黑启动过程中的“面”复原。

4) 黑启动方案技术校验。在黑启动的过程中，电力系统大面积停运，与正常运行时的状态有很大的不同，电网处于一种较脆弱的状态，而黑启动过程又受线路操作过电压和变压器励磁涌流等多个技术问题的影响，在黑启动的过程中稍有不慎就可能造成黑启动的失败。因此，无论是在黑启动方案的研讨制订阶段，还是在现场调度人员根据实际情况进行方案的优化选取，都必须进行变压器励磁涌流、输电线路合闸过电压等问题的幅值校验，以确保黑启动方案的可行性。目前，常采用手动建模的方式，采用电磁暂态仿真软件 PSCAD 或 EMTP 进行建模，通过仿真的方式进行技术校验。

5) 黑启动方案优化评估。在经过上述四个步骤后，会形成一定数量的可行黑启动方案，需要进行黑启动方案的优劣排序，以便现场调度人员根据实际情况选择合适的黑启动方案。

### 3.1. 并行理念在黑启动恢复策略中的体现

针对黑启动恢复策略方面的研究，主要可分为串行恢复和并行恢复及两者混合的恢复策略。串行恢复策略是指通过单个黑启动电源逐步恢复电网内负荷的方式；并行恢复策略是指多个具有黑启动电源的子系统同时启动，运行稳定后再同步并网[10]。

串行恢复策略，也可称为向下恢复，或“自上而下”恢复。依靠相邻系统的功率支援或系统内具有较大无功调节能力的机组，首先恢复主干网架，依托长距离超高压输电通道，向分布在各地的发电厂提供启动功率，并使带电范围逐渐向低电压等级延伸，最终实现全网恢复。“自上而下”恢复适用于黑启动电源较为匮乏但系统主干网架比较强壮的地区。在发生局部停电、主要依靠外部电源进行恢复时，也应首先考虑该策略。如图 3 所示，串行恢复策略由于是一种从单个黑启动电源逐步恢复电网内负荷的方式，因此无需准备同期并列装置，较为简单，调度人员可以利用超高压输电网络，对有限的资源进行快速、统一的部署。但它无法充分利用系统内各个电源的黑启动能力，无法保证负荷的供电可靠性，且由于将整个停电区域看做一个整体，控制过程更为复杂，决策难度较高。

并行恢复策略，可称为向上恢复，或“自下而上”恢复。该方法根据黑启动电源和待恢复电厂的分布情况，将整个停电区域划分为若干个子区域，各子区域利用其内部的黑启动电源进行独立并行恢复(图 4)。

待各子系统恢复到一定程度后，通过事先选定的同期点进行并列，最终实现各子系统的同步运行。向上恢复适用于黑启动电源较为充足且无外部功率支援的情况。通过对系统分区，可以实现多进程并行操作和对恢复的分散化管理，从而提高系统恢复效率。停电区域越大、分区数量越多，其对恢复效率的提升就越明显。另一方面，采用分区恢复方式后，单个分区的系统规模有限，因此相关优化问题的建模和求解会变得相对容易，降低了恢复决策的难度。当然，如果采用这种恢复策略，对所需要恢复电网的各独立子系统并联组网方面需要满足一定的同步要求。

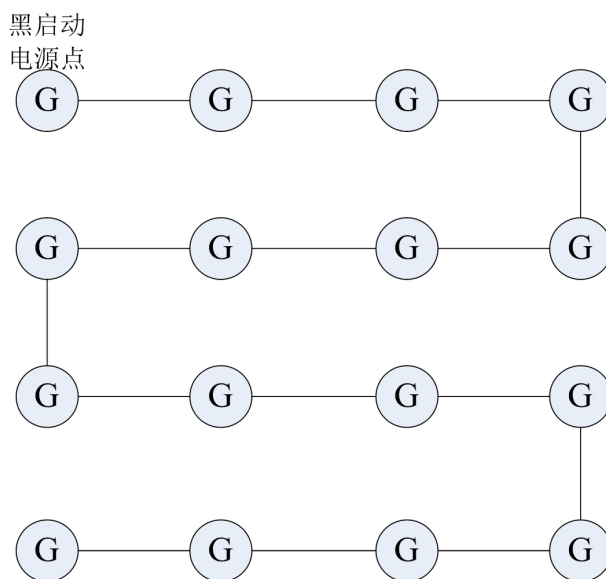


Figure 3. Schematic diagram of serial recovery  
图 3. 串行恢复示意图

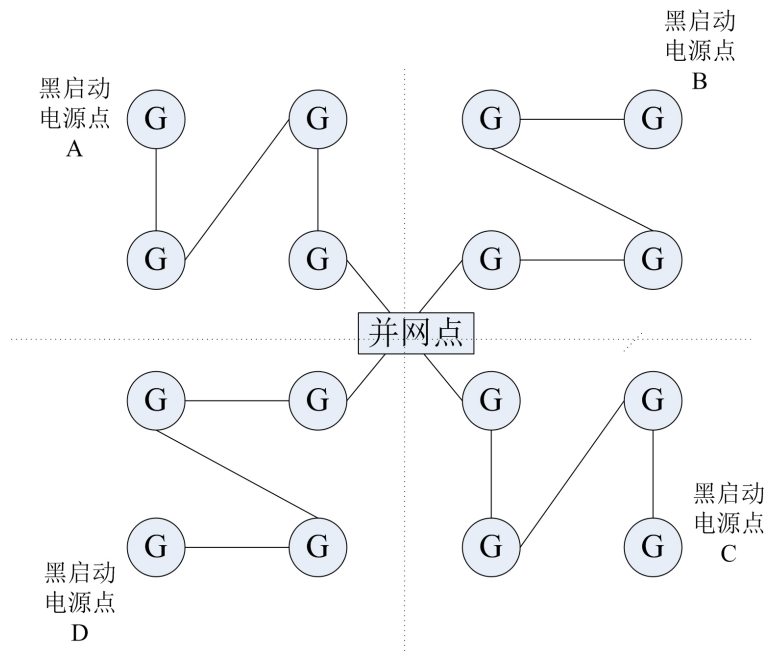


Figure 4. Schematic diagram of parallel recovery  
图 4. 并行恢复示意图

### 3.2. 并行计算在黑启动方案的决策过程中的应用

决策是为了解决某一问题，根据特定的多个目标及客观的实际情况，借用合适的工具、方法和技巧等制定出多个可行的候选方案，然后遵循一定的标准再从候选方案中选取最佳方案的过程。

大面积的停电事故发生的原因和导致的后果是多样且不可预知的，在大停电事故发生后，电网处于一种紧急且脆弱的状态，在系统的整体架构、电气设备的运行方式和负荷的供电状态与电网正常运行时有很大的不同，事先制定的黑启动预案可能无法直接使用，致使系统的恢复被延误。另外，电网中会有新机组和新线路不断地投入，系统的运行方式也会经常性的变化，黑启动预案会因为无法及时根据电网的变化进行更新，导致系统的恢复被延误。对大量的大停电事故进行调查发现，过时的恢复方案是导致黑启动进程被延误的第二关键问题。因此，十分需要一套黑启动决策支持体系，不仅能够有效地制定黑启动预案，还能够帮助调度人员根据实际情况在线快速地更新恢复计划。

根据决策的含义可知，黑启动方案的决策过程即是黑启动方案的优化和评估两个过程的总称。不同的机组在黑启动路径选择、负荷恢复策略等各方面存在一定差异，因此需要建立各自的决策支持体系。

#### 3.2.1. 考虑可靠性与发电量的黑启动决策系统

黑启动恢复方案的决策过程中，需要综合考虑黑启动方案的可靠性与发电量，以系统恢复过程中的电压稳定性和整体发电量为两个优化目标，在优化目标电压稳定性中，同时考虑了各节点的电压水平和合闸空载输电线路产生的操作过电压对黑启动可靠性的影响，然后运用适当的路径搜索与优化算法，得出上述两个目标的最优解集。

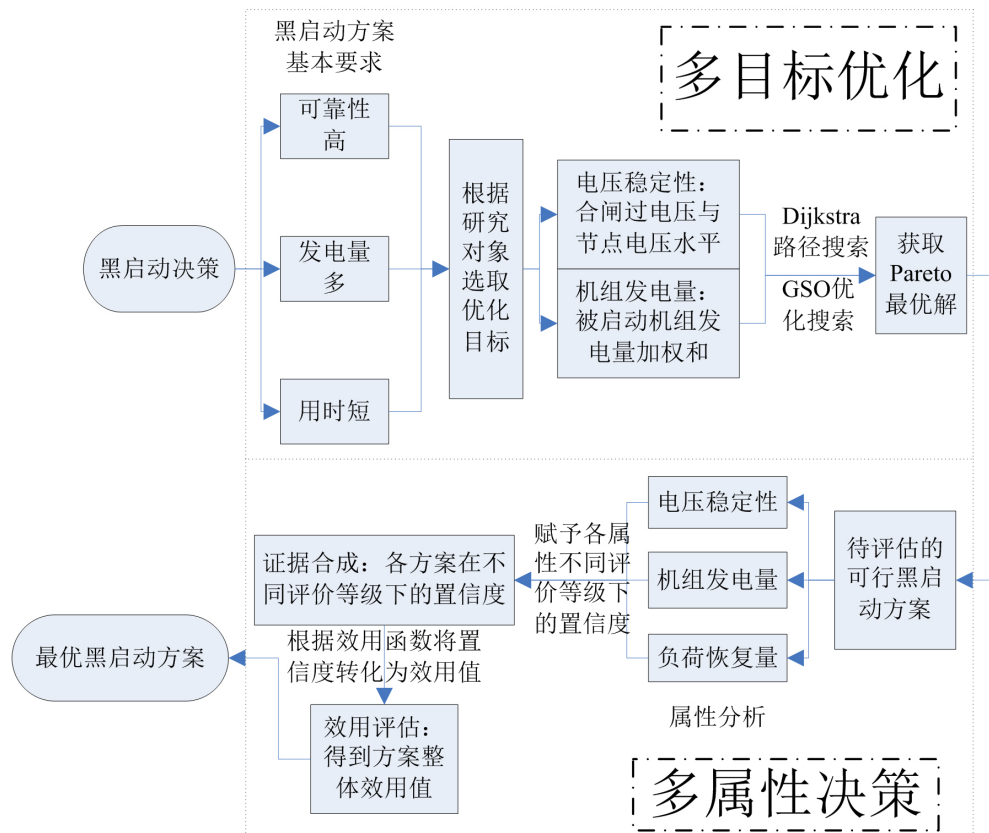


Figure 5. Flow chart of black start method decision system  
图 5. 黑启动方法决策体系流程图

如图 5 所示, 运用路径优化搜索(Dijkstra 法)和群搜索优化算法(Group search optimizer, GSO)获取电压稳定性和整体发电量的帕累托最优解集后, 应用证据推理(Evidential reasoning, ER)的方法合理地将电力工作者的工作经验等融入决策体系, 对帕累托解集中的方案进行多属性决策的体系流程图。

### 3.2.2. 考虑群体决策差异的黑启动决策系统

采用黑启动群体决策是通过专家之间的相互妥协和协商, 达成黑启动决策专家们意见一致的群体决策结果。若专家们的决策意见有较明显的差异, 就需要衡量专家意见之间的差异, 在他们满意的范围内对专家与指标的权重进行调整, 使得最终得出的黑启动群体决策结果具有较好的一致性。通过改善群体决策结果的一致性, 减少专家的主观偏好对黑启动决策结果的不良影响, 增大群体决策的合理性。

用群体决策来评估黑启动方案时, 指标权重和专家权重对最终的决策结果都有很大影响, 因此, 设置权重是十分重要的。主观、客观、主客观结合三种权重设置法中, 主观赋权法得到的主观权重在用于黑启动决策时会让决策结果带有很强的主观随机性; 客观赋权法得到的客观权重用于黑启动决策时可能让决策结果与实际结合得不够紧密; 让主观与客观并行使用的综合权重结合两者的优点, 更适用于实际情况。主客观权重结合的算法有很多, 以乘法合成法为例:

设对于包括  $x$  个评价指标的黑启动决策问题, 代表主观权重的向量为

$$W_{sub} = [w_{sub}(1), w_{sub}(2), \dots, w_{sub}(m)],$$

代表客观权重的向量为

$$W_{obj} = [w_{obj}(1), w_{obj}(2), \dots, w_{obj}(m)],$$

综合权重向量设为  $W = [w(1), w(2), \dots, w(m)]$ ,

$$\text{则有 } w(j) = \frac{w_{sub}(j)w_{obj}(j)}{\sum_{j=1}^m w_{sub}(j)w_{obj}(j)}, j = 1, 2, \dots, m。$$

黑启动决策问题较为复杂, 仅一次的赋权也许难以让绝大部分决策专家们满意。因此, 在决策一致性较差的情况出现时, 就应该先对指标权重和专家权重进行修正, 再利用调整后的权重重新决策。

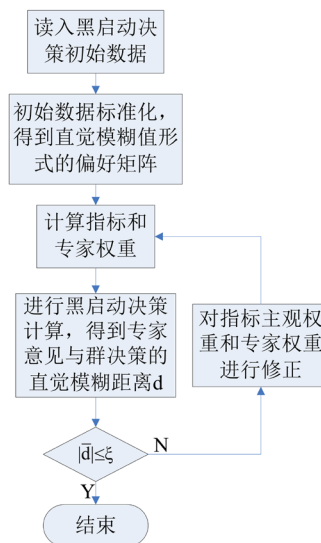


Figure 6. Flow chart of consistency analysis and weight adjustment algorithm for group decision of black start

图 6. 黑启动群体决策一致性分析及权重调整算法流程图



如图 6 所示, 运用直觉模糊集和直觉模糊距离并结合乘法合成法来进行黑启动群体决策一致性的分析与权重调整, 能让黑启动方案决策过程更符合于实际情况。

#### 4. 结论与展望

本文探讨了智能电网、黑启动与并行计算之间的关系, 主要讨论了并行计算在黑启动中理念与技术上的应用, 并给出了以并行计算技术为基础发展起来的云计算技术与大数据技术, 和智能电网的代际传承关系。

黑启动作为智能电网的一部分, 虽然也受到云计算与大数据技术的影响, 最优恢复策略的提出却依然沿用传统电网时期的方法。并行计算技术在黑启动过程中运用得较少。不过黑启动的恢复过程依然有并行理念的存在, 现在黑启动恢复策略中“自下而上”的一类便属于并行理念的应用。该类方式恢复速度较快, 且会降低黑启动网架重构方面的难度, 常应用于对时间要求较为严苛的大系统。黑启动恢复策略的评估与优化是最常用到并行计算技术的, 通过同时对恢复策略几个互不影响的属性进行验证与优化, 节省黑启动最优恢复方案的完成时间, 进一步将黑启动过程的整体耗时缩短。

以并行计算为基础的云计算技术与大数据技术已经在商业领域获得较为广泛的应用并创造出巨大的商业价值, 但是在电力系统中的应用才刚刚起步。随着这两种技术的更新与智能电网的同步进行, 电网的黑启动过程在未来会不断引入新的技术, 这将为略为老旧的我国电网黑启动方面带来新的发展。

#### 参考文献

- [1] 李军徽, 孔明, 穆钢, 等. 电力系统黑启动关键技术研究综述[J]. 南方电网技术, 2017, 11(5): 68-77.
- [2] 张东霞, 苗新, 刘丽萍, 等. 智能电网大数据技术发展研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 2-12.
- [3] 彭小圣, 邓迪元, 程时杰. 面向智能电网应用的电力大数据关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 503-511.
- [4] 李俊. 深圳电网 4·10 大停电事件的处理及启示[J]. 南方电网技术, 2014(1): 015.
- [5] 陈国良, 孙广中, 徐云, 等. 并行计算的一体化研究现状与发展趋势[J]. 科学通报, 2009, 54(8): 1043-1049.
- [6] Adibi, M.M., Borkoski, J.N. and Kafka, R.J. (1987) Power System Restoration—The Second Task Force Report. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2, 927-932. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.1987.4335278>
- [7] 林济铿, 蒋越梅, 郑卫洪, 等. 电力系统黑启动初始方案的自动形成[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 72-75.
- [8] 饶威, 丁坚勇, 路庆凯. 智能电网云计算平台构建[J]. 华东电力, 2011, 39(9): 1493-1496.
- [9] 宋亚奇, 周国亮, 朱永利. 智能电网大数据处理技术现状与挑战[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 927-934.
- [10] 魏巍, 李兴源, 廖萍. 含分布式电源的电力系统多代理故障恢复新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 89-93.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8763, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [sg@hanspub.org](mailto:sg@hanspub.org)