

孤岛启动模式下的预置保护和自动装置研究

陈石通¹, 房鑫炎¹, 胡子珩²

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 深圳供电公司, 广东 深圳 518001)

摘要: 提出了黑启动模式的概念, 介绍了几种黑启动模式。并着重研究了一种新的黑启动模式即基于孤岛启动模式并分析其机组特点。为实现孤岛启动的黑启动模式, 提出了三种保护和自动装置的预置方案以进行孤岛的主动解列。针对单机无穷大系统, 对设计的保护方案进行了仿真校核。证明了主动解列保留孤网, 进而基于孤岛进行黑启动的方法的可行性。

关键词: 黑启动; 孤岛; 主动解列; 自动装置; 保护配置

Study of protection and automation device configuration in the island startup mode

CHENG Shi-tong¹, FANG Xin-yan¹, HU Zi-heng²

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
2. Shenzhen Power Supply Company, Shenzhen 518001, China)

Abstract: The paper introduces the blackstart modes and shows a new blackstart mode which is based on the island startup, and then summaries the characteristics of the generators which can be used in this mode. To make sure the blackstart mode successfully, three protection configurations to island initiatively are proposed. At the end, the simulation analysis is done based on a single machine infinite bus system. The result verifies the protection configurations are effective and the blackstart mode is useful.

This project is supported by Grand Project of National Natural Science Foundation of China(No.90612018).

Key words: black-start; isolated island; initiative separation; automation device; protection configuration

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)13-0053-05

0 引言

近年来大停电事件给各国都敲响了警钟^[1,2], 从而也大力地推进了电力系统黑启动的研究。文献[3~8]表明: 成功的黑启动能够在系统发生灾变的情况下, 尽快恢复电网的正常运行, 将损失降到最低。本文提出几种电力系统黑启动的模式, 并对黑启动中的孤岛启动模式进行分析, 介绍其适用情况、重要性和可行性; 研究电网灾变后孤岛按预案解列孤岛并保持稳定, 应用保护和自动装置将其实现。最后针对单机无穷大的应用实例, 验证孤岛模式黑启动的有效性。

1 黑启动模式分析

所谓黑启动, 是指整个系统因故障停运后, 从局部开始恢复, 并逐渐扩大系统恢复范围, 最终实现整个系统的恢复^[9]。以往的电力系统黑启动研究, 特别是黑启动评估方面的研究, 大多停留在方案的

生成以及比较之上。笔者认为, 电力系统的黑启动评估应该扩大其研究的范围, 首先可以将黑启动的评估分成模式层和方案层两个层次进行考虑, 如图1所示。

进行黑启动的评估, 首先要考虑其归属的黑启动模式, 同一黑启动模式下的黑启动方案相对有效性评估较为简单; 而若方案隶属于不同的黑启动模式, 则其评估更需要考虑到不同模式之下的经济性、有效性之间的差异。例如图1中的方案A和方案I, 由于属于不同的黑启动模式, 故进行有效性评估时需要考虑更多的问题。

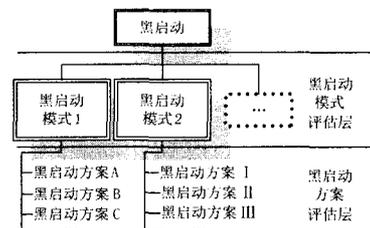


图1 电力系统黑启动评估层次划分

Fig.1 Structure of black-start evaluation

按不同的黑启动电源，可以将黑启动大致分为如下几种模式：

- 1) 水电或抽水蓄能发电站启动模式
- 2) 燃气轮机启动模式
- 3) 外网联络线启动模式
- 4) 孤岛启动模式

水轮机组如抽水蓄能机组用作起动力源最为方便。燃气轮机也具备快速起动的能力，可以在水电资源匮乏的情况下作为黑启动的电源。通过联络线启动需要周边电网支援，如调度成功，启动速度也较快并且启动容量也较大。

此外，事故后与灾变电网解列保持相对稳定的小电网（孤岛）也可以作为启动电源。孤岛作为残存的电源，同样具有启动速度快的特点。若能够在电网事故发生的同时，按事先预定的方式使用保护和自动装置将小电网（孤岛）与灾变电网解列，并保持其稳定，则孤岛启动模式将成为一种非常有效的黑启动模式。

2 基于孤岛启动的黑启动模式

2.1 电网孤岛概述

孤岛是孤立电网的简称，一般泛指脱离大电网的小容量电网。机网容量比大于8%的电网，统称为小网，孤立运行的小网，称为孤岛^[10]。大停电事故中的孤岛，可分为两级——电厂级和变电站级。电厂级孤岛(mini island)为包含一个或一组分散电源及其周边负荷的功率基本平衡区域。变电站级孤岛(substation island)为包含配电站部分或全部负荷及其下级所有分散电源的功率基本平衡区域。一个变电站级孤岛可以包含多个电厂级孤岛^[11]。

2.2 孤岛启动的可行性与必要性

虽然水电或抽水蓄能机组是黑启动的首选，但对于上海、香港、深圳等水电资源匮乏的大城市，只能采用具有快速启动能力的燃气轮机机组及孤岛启动模式的黑启动方法。而燃机需要大功率柴油发电机组提供其启动功率，且需要定期开机进行维护，故在初投资和维护成本上较大。相比较而言孤岛启动的投资较小，是一种新的黑启动模式。

对重要大城市而言，在系统内合理地配置若干个按孤岛设计运行的机组是非常必要的。即使水电和燃气轮机能在黑启动成功后向各电厂提供厂用电，电网的实际恢复时间还要取决于发电机公用系统如循环水系统、辅助蒸汽系统等的恢复时间。如果在电网崩溃后，部分机组能够实现自保厂用电并维持发电机公用系统，则能立即进行供电，依靠这些机组直接往电网供电，迅速解决重点部门的用电

需求并逐步扩大恢复范围，从而极大地缩短电网恢复时间、减少经济损失和社会影响。

文献[12]中列举了如“8.14”美加大停电、1996年美国西部大停电及上世纪70年代日本关西大停电中孤岛能够加速系统恢复速度的事实。

2.3 孤岛启动电源的特征

孤岛启动运行功能的设置必须从全局性电网整体规划的角度来进行考虑，在电厂建造前的初步设计中就应予以确定。机组具备带厂用电运行的能力是该机组进行孤岛运行的基础，但能带厂用电运行的机组不一定能够符合孤岛启动要求。对于大容量的机组而言，在紧急甩负荷时带厂用电较长时间运行是非常困难的。在理论上，也根本没有必要每台机组都有独立孤岛运行的功能。

通过对国内外成功承担孤岛任务的机组情况的调研，孤岛启动机组需要具备如下的标准：

1) 机组在正常运行情况下，不带较大负荷。从而在进入孤岛运行方式紧急甩负荷时，不至失稳。

2) 机组能够在短时间内低压并网。这对机组的地理位置要求较高，最好与一些需要辅助启动的机组电气距离较短。

3) 机组有承担黑启动的事故备用负荷的能力。这要求机组在承担自己的厂用电负荷后，有能力供应重要负荷或提供其他电厂的启动容量。

4) 机组能够与大系统解列运行。这要求机组在某些特定情况下能够由自身的自动装置与大系统解列，并稳定运行。

2.4 孤岛启动电源举例

分布式电源可以作为良好的孤岛启动电源。分布式电源往往具备容量小，可不并网运行等特点，可以满足孤岛启动电源的要求，如垃圾焚烧电厂。以深圳南山垃圾焚烧电厂为例，其能与大电网并列运行或孤岛运行，在电网发生灾变的情况下，通过联络线能够为附近的燃气轮机机组提供厂用电，辅助燃机进行启动，从而进行进一步的系统恢复。这样可以节省为燃气轮机配备大型柴油发电机组的投资，且同样具备启动速度快的特点。

3 电网灾变后按预定方式保留孤岛的保护和自动装置配置方法

3.1 电网灾变后的孤网主动解列

孤岛启动作为一种黑启动模式，要求孤网在任何情况下均能够稳定运行。这也就意味着如果在整个电力系统设立孤岛启动方案，则当大系统出现任何灾变、故障或扰动时，按事先预定的方式由保护和自动装置将机组与灾变系统解列形成孤岛。若问

题解决, 则将孤岛重新与大电网并列运行; 一旦发生大停电则依靠该孤岛进行进一步的恢复。其流程如图2所示。

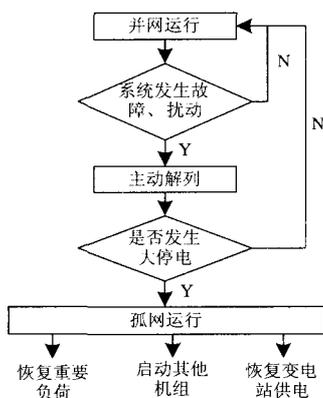


图2 孤岛启动模式黑启动流程图

Fig.2 Flow chart of the black-start based on the island startup mode

3.2 按预定方式保留孤岛的保护和自动装置配置原则

在系统发生灾变时, 按计划保留孤岛的动作主要依靠保护和自动装置来完成。其配置需要遵循如下原则: 在整个电力系统设立孤岛启动方案时, 不能将该小机组单纯视为一个独立的普通发电单元, 应将其视为一个辅助电网大系统在全黑后恢复的恢复电源来进行其保护和自动装置的配置。具体如下:

1) 在电网大系统出现故障、灾变和大的电压波动时, 小机组需立即与大系统解列, 通过母线侧设置的保护动作来实现。

2) 在小机组与大系统解列形成孤岛后, 为了做到负荷供需均衡, 基于发电机出力控制器的保护和自动装置需要动作进行切负荷等操作。

3.3 电网灾变后按预定方式主动保留孤网的保护配置方案

在电网发生任何灾变、故障或扰动情况下, 为了确保机组均能跳开形成孤岛, 可以对保护装置进行一些预配置。在本文中, 所研究的对象为需主动解列的小机组, 其简化接线图如图3所示。

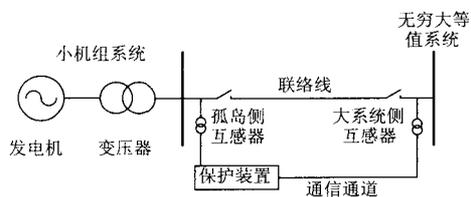


图3 孤岛启动简化系统图

Fig.3 Simplified system diagram of the black-start based on the island startup mode

如图所示取得小系统侧电压、频率及相角数据, 对侧数据经通信信道(如光纤)传递到本侧在保护装置中进行处理。本文提出如下三种保护方案。

方案一: 失步保护

系统稳定破坏(暂态失稳或动态失稳)开始阶段的直接表现一般是2个同调机群之间相对公角差不断增大而失去同步。城市电网大系统的故障和灾变表现特征要比一般系统振荡失步时更剧烈和显著, 可将灵敏度较高的系统同步标准引入, 即利用联络线上的并列检同期装置逆向使用, 具体可以将得到的联络线两侧电压、频率及检测机组进行比较, 则可以判别与网络是否同步, 则从而判定是否需要解列。其参考流程图如图4所示。

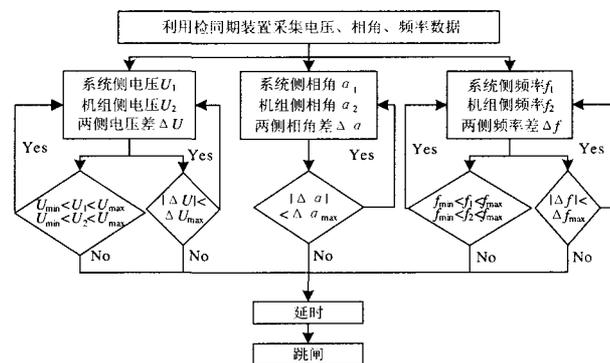


图4 保护方案一流程图

Fig.4 Flow chart of the protection scheme I

方案二: 系统失压保护

当系统内部发生故障、灾变扰动时电压一般会瞬时降低, 利用失压保护检测小机组与大系统关联母线处的电压变化, 一旦因电网故障、灾变引起小机组母线或系统关联母线电压下降, 保护装置得到母线电压小于电压阈值, 则跳开联络线开关, 主动进行孤岛解列。其保护流程如图5所示。

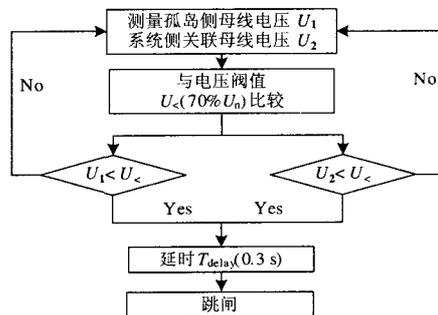


图5 保护方案二流程图

Fig.5 Flow chart of the protection scheme II

方案三: 小机组母线失压保护

在解决主动解列的问题时，同样可以将重点放在待保留小机组的母线上。在此母线处配置母线失压保护，同样能够在系统发生灾变、扰动、故障的情况下，将小机组解列以形成孤岛。其保护方案流程图如图 6 所示。

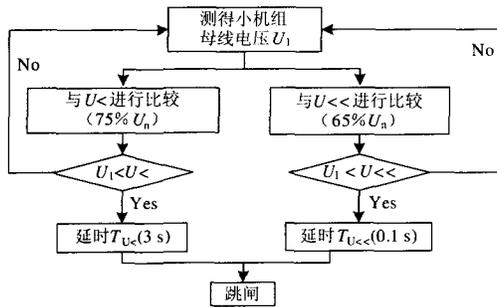


图 6 保护方案三流程图

Fig.6 Flow chart of the protection scheme III

4 仿真试验

4.1 仿真系统

本节以一个单机-无穷大系统为例，通过 ATP 进行仿真来验证在系统发生灾变、故障或扰动时，将小机组主动解列的保护方案配置是否可行。

4.2 仿真校核

假设在 0.071 s 时，小机组到大系统联络线中段发生 A 相单相接地故障，得到小机组升压变高压侧母线出口处电流波形如图 7 所示。母线电压下降超过保护方案二、三的阈值，保护将会动作。小机组能够成功与系统解列形成孤岛，以便下一步的系统恢复。

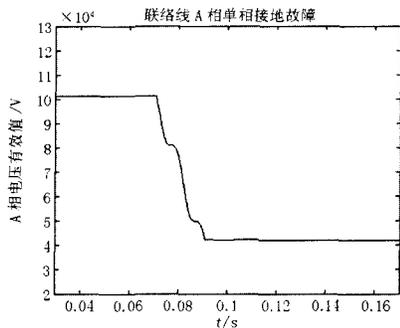


图 7 单相接地故障时 A 相电压有效值

Fig.7 Voltage at bus in RMS (phase A)when a single phase-earth fault

假设在 0.25 s 时，对小机组电厂升压变高压侧加如文献[13]中所述冲击负荷，得到高压侧母线电压波形如图 8 所示：由图可见在承受冲击负荷后，小机组升压变高压侧母线最大压降已达近 35%。同

时测得母线频率下降最多处已达 2.472 Hz。将如上仿真结果带入保护方案进行校核，可知三套保护方案均可正确动作。即验证了保护方案的可行性。

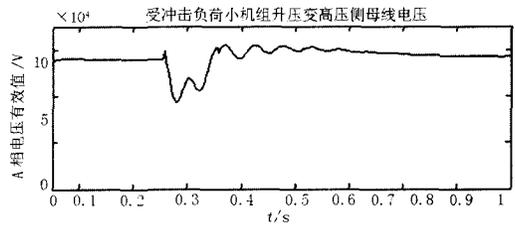


图 8 受冲击负荷 A 相电压有效值

Fig.8 Voltage at bus in RMS (phase A)when an impacting load

综合仿真结果可知，保护方案二、三较适用于系统发生短路等故障的情况，而保护方案一则较适用于系统发生其他扰动或故障的情况。

5 结论

黑启动可以缩短停电时间，综合考虑黑启动的特点，本文在黑启动方案评估的基础之上，提出了黑启动模式概念。而基于孤岛启动模式可以减小停电面积，提高供电可靠性，便于系统恢复。本文提出可以在系统发生灾变、故障或扰动的情况下，按预定方式依靠保护和自动装置将孤岛同故障系统解列，进而利用所保留的孤岛进行系统恢复。文中提出的几种保护配置方案能够确保孤岛与灾变系统的解列。而在解列后，如何保持孤岛的稳定运行，即如何使得小机组仅带厂用电运行而不失稳，是将来需要重点研究的问题。同时也应该对黑启动模式之间的评估做进一步的讨论。

参考文献

- [1] 沈殿凤, 朱正磊. 电网安全管理现状及美加停电事件的启示[J]. 电力安全技术, 2005, (2): 8-9. SHEN Dian-feng, ZHU Zheng-lei. The Status of the Power System Management and the Inspiration of Blackout in the United States and Canada. U.S.-Canada Power System[J]. Electric Safety Technology, 2005,(2) : 8-9.
- [2] 美加联合调查组. 美加大停电最终调查报告[R]. 2004. U.S.-Canada Power System Outage Task Force. Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada[R]. 2004.
- [3] Lindstrom R R. Simulation and Field Tests of the Black Start of a Largecoal-fired Generating Station Utilizing Small Remote Hydrogeneration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(1): 162-168.
- [4] Adibi M M, Fink L H. Power System Restoration Planning[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 22-28.

- [5] Boliaris P G, Prousalidis J M, Hatziaargyriou N D, et al. Simulation of Long Transmission Lines Energization for Black Start studies[A]. in: Electrotechnical Conference[C]. Antalya(Turkey): 1994.
- [6] Delfino B, Denegri G B, Invernizzi M, et al. Black-start And restoration of a Part of the Italian HV Network: Modeling and Simulation of a Field Test[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11 (3): 1371-1379.
- [7] Funakoshi T, Furukawa K. Transformer Overvoltage Problems And countermeasures at Black Start[A]. in: IEEE PES General Meeting[C]. Toronto(Canada):2003.
- [8] Sakaguchi T, Matsumoto K. Development of a Knowledge Based System for Power System Restoration[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1983, 102 (2): 320-329.
- [9] 郁惟镛, 房鑫炎, 熊惠敏. 华东电网黑启动方案研究之一[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000,(2): 1-4. YU Wei-yong, FANG Xin-yan, XIONG Hui-min. The First Research of East-China Power System Black-Start Plan [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2000,(2): 1-4.
- [10] 郑良华, 田开禄, 陈西洲, 等. 孤网运行实践[J]. 吉林电力, 2008(2): 26-28. ZHENG Liang-hua, TIAN Kai-lu, CHEN Xi-zhou, et al. Operation Practice of Isolated Power Grid [J]. Jilin Electric Power, 2008(2): 26-28.
- [11] 丁磊, 潘贞存, 苏永智, 等. 并网分散电源的解列与孤岛运行[J]. 电力自动化设备, 2007,27(7): 25-29. DING Lei, PAN Zhen-cun, SU Yong-zhi, et al. Splitting and Islanding of Networked Dispersed Generators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007,27(7): 25-29.
- [12] 孙惟东, 韩天祥. 上海电网岛式运行电厂模式探讨[J]. 中国电力, 2004,24(5): 51-53. SUN Wei-dong, HAN Tian-xiang. Discussion on Isolated Islands Operation Mode in Shanghai Power Network [J]. Electric Power, 2004,24(5): 51-53.
- [13] 顾丹珍, 艾芊, 陈陈, 等. 冲击负荷实用建模新方法[J]. 电力系统自动化, 2006,30(20): 10-14. GU Dan-zhen, AI Qian, CHEN Chen, et al. A General Modeling Method for the Impact Load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(20): 10-14.

收稿日期: 2008-08-12; 修回日期: 2008-11-06

作者简介:

陈石通(1984-), 男, 研究生, 从事电力系统黑启动以及继电保护装置方面研究; E-mail: movingcloud@sjtu.edu.cn

房鑫炎(1963-), 男, 副教授, 博士, 从事电力系统继电保护及系统安全方面的研究;

胡子珩(1963-), 男, 博士, 长期从事电力系统运行与管理工作。

(上接第 18 页 continued from page 18)

- [9] Dorf R C, Bishop R H. Modern Control Systems[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2005.
- [10] Bristow D A, Tharayil M, Alleyne A G. A Survey of Iterative Learning Control: a Learning-based Method for High-performance Tracking Control[J]. IEEE Trans on Control Systems, 2006, 26(3): 96-114.
- [11] 薛定宇, 陈阳泉. 控制数学问题的 MATLAB 求解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. XUE Ding-yu, CHEN Yang-quan. MATLAB Solutions to Mathematical Problems in Control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [12] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [13] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. Theory and Analysis of Dynamic Power System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [14] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003. WANG Xi-fan, FANG Wan-liang, DU Zheng-chun. Modern Power System Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [15] 徐光虎, 苏寅生, 孙衢, 等. 基于特征值分析法的 PSS 最佳安装地点的确定[J]. 继电器, 2004, 32(8): 1-4. XU Guang-hu, SU Yin-sheng, SUN Qu, et al. Identification of PSS Optimum Location Based on Eigenvalue Analysis Method[J]. Relay, 2004, 32(8): 1-4.
- [16] Liang J J, Qin A K. Ponnuthurai Nagaratnam Suganthan, et al. Comprehensive Learning Particle Swarm Optimizer for Global Optimization of Multimodal Functions[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2006, 10(3): 67-82.
- [17] Shi Y, Eberhart R. Empirical Study of Particle Swarm Optimization[A]. in: Proc of the 1999 Congress on Evolutionary Computation[C]. 1999. 1945-1950.

收稿日期: 2008-08-08; 修回日期: 2008-10-29

作者简介:

李奇(1984-), 男, 博士研究生, 研究方向为群体智能算法、电力系统稳定控制等; E-mail: liqi0800@gmail.com

陈维荣(1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能信息处理、智能监测技术等;

段涛(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统无功优化、进化算法等。