

DOI: 10.7667/PSPC151156

考虑线路操作时限和恢复概率的机组启动路径优化

刘翔宇, 胡雪凯, 胡文平, 梁纪峰, 马慧卓

(国网河北省电力公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021)

摘要: 研究了考虑线路投运时限、投运失败和机组投运时限的发电机启动路径优化问题。首先考虑线路远程操作和投运成功概率,建立了线路投运时限模型,求取了线路投运的时间期望作为线路的权值。然后研究了机组的启动时限、出力特点和进相运行能力,提出了机组在黑启动过程中的限制因素。接着以迪克拉斯算法计算最短路径,定义了机组综合优先级指标。算法实时考虑线路投运状况以贪心思想为指导提出了以迅速投运发电机组为目标的机组投运优化算法求取最优启动路径。最后应用 IEEE39 节点算例对所提出方法进行了分析验证。所得的研究成果对电力系统黑启动预案的制定和在线决策系统的开发具备参考价值 and 积极意义。

关键词: 黑启动; 电力系统恢复; 机组启动; 迪克拉斯算法; 启动时限

Optimization of unit restoration sequence considering line start-up time and restoration probability

LIU Xiangyu, HU Xuekai, HU Wenping, LIANG Jifeng, MA Huizhuo

(State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Optimization of unit start-up sequence is studied considering line start-up time, switch line failure and unit start-up time. Firstly, line start-up time model is built based on line remote operation and probability of success operation, and line start-up time expectation is calculated as line weights. Secondly, unit start-up time, output characteristic and phase operation capability are studied to propose unit limit factor in the restoration. Then, Dijkstra algorithm is used to calculate the shortest path, unit comprehensive priority index is defined. Aiming at units rapidly start up, the units restoration optimization algorithm is put forward guiding by greedy thought to calculate the best restoration sequence, considering real-time line operation condition. At last, the proposed method is validated on the IEEE 39-bus power system. The achievements obtained in this paper have reference value and active meaning to the preplan formulation of black start and its online decision-making system development.

Key words: black start; power system restoration; units start-up; Dijkstra algorithm; start-up time

0 引言

随着大停电事故的频繁发生^[1-4],电网停电事故后,如何安全、快速恢复电网运行,减少经济损失已经逐渐成为人们关注和研究的课题。一般将黑启动过程分为相互联系和衔接的三个阶段^[5-7]:黑启动、网络重构和负荷恢复。在整个恢复过程中,发电机组的恢复是十分重要的基础,决定了整个系统恢复过程的关键因素,也成为研究的重点内容。

文献[8-10]考虑机组的启动时限和爬坡特性,综合考虑启动成本问题,提出了机组启动的优化方法;文献[11]采用二元整数规划法提出了机组启动的优化顺序;文献[12-13]考虑更多的实际运行问题,将

调度管理特点和更多机组技术特性纳入考虑范围;文献[14-16]为加快系统恢复速度,进行了并行恢复机组和线路的研究;文献[17-18]考虑了系统恢复过程中线路投运失败的问题。考虑更多电力系统实际问题,制定更符合运行实际的方案对黑启动问题的研究具有重要意义。

随着电网的发展和运行模式的逐渐改进,我国已经逐渐实现了 500 kV 及以下变电站无人值守模式。调控一体的融合使远程操作技术不断应用于实际生产,目前我国江苏、河北等省份已经陆续推广试行断路器和隔离开关远程操作,变电站的操控进入新的发展形势。远程操控技术的实现使电网应急处理能力实现跃升,本文在考虑变电站远程操作时

限和线路启动成功概率的条件下, 研究了电网大停电时, 发电机组启动顺序和骨架网的重构问题, 提出更加切合实际生产的投运方法, 对黑启动方案制定和在线决策均有参考价值。

1 线路启动时限建模

变电站失去站用电时, 在 UPS(不间断电源)供电下依旧可保持通信和远程操作能力 2 h 左右, 随着断路器和隔离开关遥控操作的逐渐应用, 制定黑启动预案中考虑这一因素是更切合实际的。

1.1 线路遥控操作简介

线路遥控操作是调控员在调控中心, 通过远程遥控实施断路器和隔离开关拉合, 操作便捷迅速, 操作一条线路的拉合往往在 1 min 内可以实现, 但由于通信可靠性等问题, 虽然成功率很高(98%以上)但尚不能保证远程操作 100%成功, 在远程操作不成功时需运维人员到站现场操作。运维人员驻守于中心站, 去往受控站所需时间受距离、天气、交通状况影响。变电站远程控制示意图如图 1 所示。

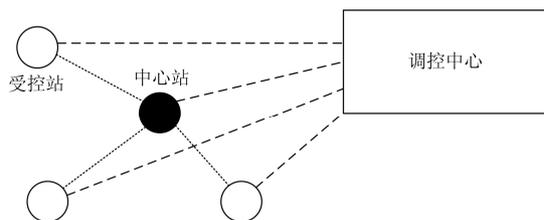


图 1 变电站远程控制示意图

Fig. 1 Substation remote control schematic diagram

1.2 线路操作时限定义

定义远程操作线路所需时间为 t_1 , 现场操作线路所需时间为 t_2 , 如操作不成功对设备检查处理时间为 t_3 , 从中心站到受控站所需时间为 $t_{\text{节点}}$, 变电站恢复有人仍需时间为 t_4 。其中 t_1 、 t_2 、 $t_{\text{节点}}$ 均可由每条线路长期运行数据统计获得, t_3 取经验值。 t_4 定义式如下:

$$t_4 = \begin{cases} t_{\text{节点}} & \text{未派人到站} \\ t_{\text{节点}} - (t - t_0) & (t < t_{\text{节点}} + t_0) \\ 0 & (t \geq t_{\text{节点}} + t_0) \end{cases} \quad t_0 \text{时派人到站} \quad (1)$$

线路可现场操作仍需时间 t_5 取决于两端变电站所需时间, i 、 j 为线路两端变电站编号, 则其定义为

$$t_5 = \max(t_{4i}, t_{4j}) \quad (2)$$

式中, t_{4i} 表示变电站 i 恢复有人所需时间。

1.3 遥控操作覆盖系数

在可遥控操作变电站未达到 100%情况下, 或

个别变电站遥控操作系统不可用时, 变电站的操作方式应根据实际情况加以区分, 故定义线路远方遥控操作覆盖系数 λ 如下:

$$\lambda = \begin{cases} 1 & \text{可遥控操作} \\ 0 & \text{不可遥控操作} \end{cases} \quad (3)$$

线路两端变电站都可实现遥控操作时, 此线路可遥控操作投入, 各线路 λ 系数由电网的即时运行状态决定。

1.4 线路恢复概率

在进行线路投入恢复过程中, 线路的投入存在一定的恢复失败概率^[5], 而通过远方遥控操作投入线路成功概率 P' 要小于变电站现场操作方式线路投入成功概率 P'' , 即 $P'' > P'$ 。这是由于远方遥控操作是通过通信系统调用站内操作机构实现的, 故可靠性要受到通信系统制约。 P' 可通过长期遥控操作统计获得, P'' 主要受限于操作过电压、操作系统可靠性等。

1.5 线路操作时间期望函数

考虑电网实际情况, 设定运行条件如下: 认为可进行遥控操作的线路, 首选遥控操作模式进行线路投入操作, 不可进行远方操作的线路在故障后即刻派人赶往相关线路两侧的变电站; 认为 t_0 时刻远方操作不成功情况下, 则线路的启动方式转化为现场操作, 即刻派人前往两侧变电站; 认为线路远方操作不成功或现场操作不成功情况下, 现场进行一次耗时 t_3 的检查处理后可在下次现场启动时 100% 成功; 认为中心站的恢复有人时间 $t_4=0$ 。

在考虑以上黑启动过程中线路启动时限和启动概率情况下, 针对每条线路建立启动时间的期望函数 $T(t)$ 如下:

$$T(t) = \lambda[t_1 P' + (1 - P')(t_1 + t_2 + t_3 + t_5)] + |\lambda - 1|[(t_2 + t_5) P'' + (1 - P'')(2t_2 + t_3 + t_5)] \quad (4)$$

应用期望函数 $T(t)$ 即可判别 t 时刻线路的启动成本。如果首次启动失败, 则令 P'' 、 P' 为零, 其再次启动成本为

$$T'(t) = \lambda(t_1 + t_2 + t_3 + t_5) + |\lambda - 1|(2t_2 + t_3 + t_5) \quad (5)$$

2 发电机启动时限建模

经过简化的单台机组最大出力能力的时间函数如式(6)所示, 出力示意图意如图 2 所示, T_{si} 表示机组 i 获得启动电源时刻, T_{li} 为机组 i 出力所需准备时间, T_{2i} 为机组 i 的爬坡时间, P_{Mi} 为机组 i 的最大出力能力, K_i 为机组 i 的爬坡速率。

$$P_i = \begin{cases} 0 & 0 \leq T_{si} + T_{li} \\ K_i(t - T_{si} - T_{li}) & T_{si} + T_{li} < t \leq T_{si} + T_{li} + T_{2i} \\ P_{Mi} & T_{si} + T_{li} + T_{2i} < t \end{cases} \quad (6)$$

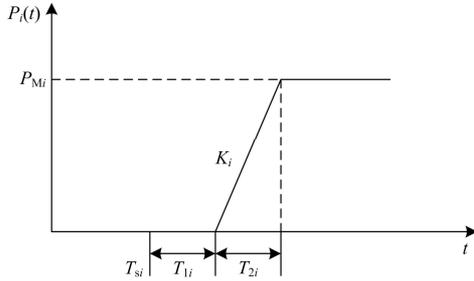


图2 机组出力示意图

Fig. 2 Scheme of generation unit output

对于水电机组而言, 机组爬坡十分迅速, 准备时间 T_1 和爬坡时间 T_2 很小, 机组功率可认为能够瞬时达到额定功率。一般火电机组的爬坡速率运行在每分钟额定功率的 1.2%~1.5% 之间, 机组容量的大小即反映了爬坡速率快慢, 同时机组启动功率常与机组容量相关, 故本文以机组容量单一指标大小反应机组对系统恢复的重要程度。本文统一按照 70 min 考虑火电机组的爬坡时间。

机组进相运行能力示意图如图 3 所示。受机组冷却水温升高等方面限制, 一般随着有功出力增大, 机组进相运行能力减弱, 在额定功率时可吸收无功最小。为简便, 本文统一按照某一固定值考虑机组进相能力。

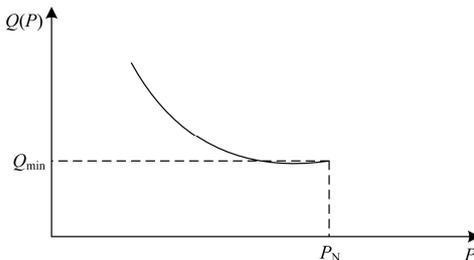


图3 机组进相运行图

Fig. 3 Leading phase operation graph of generator

3 启动过程的限制

3.1 启动功率限制

系统恢复过程中每一步校验投入新的设备均需要满足所有已启动机组的有功出力能力需大于已并网机组的厂用电和已投入负荷之和。即

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi}(t) \geq \sum_{i=1}^n P_{Di}(t) + \sum_{j=1}^m P_j(t) \quad (7)$$

式中: P_{Gi} 表示机组 i 出力能力大小; P_{Di} 表示机组 i 的常用电大小; P_j 表示节点 j 投入负荷大小; n 表示已并网机组数量; m 表示已投入负荷节点数量。

3.2 启动时限限制

热启动火电机组 i 具有最大临界启动时间约束, 即

$$0 < T_{si} \leq T_{CH,i} \quad (8)$$

式中, $T_{CH,i}$ 表示机组 i 最大临界热启动时间。

冷启动火电机组 i 具有最小临界启动时间约束, 即

$$T_{si} \geq T_{CC,i} \quad (9)$$

式中, $T_{CC,i}$ 表示冷启动机组 i 的最小临界启动时间。

3.3 电压和潮流限制

电网恢复过程中的每一时刻, 在已并网机组出力能力范围内, 满足所有节点电压不越限, 所有线路不过载, 即

$$\begin{cases} P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \\ P_i \leq P_{i,\max} \\ U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_{Gi} 、 Q_{Gi} 表示已投入发电机 i 的出力大小; P_i 表示已投入线路 i 输送有功功率大小; U_i 表示已投入节点 i 的电压大小。

4 建立与求解

迪克拉斯算法(Dijkstra 算法)是用逐点增长的方法构造一棵路径树, 从而得到从该树的根节点到其他所有节点的最短路径^[19]。该算法适用于已知电网中线路的权值时, 任意两个节点间最小权值路径的求取。本文利用此算法计算机组的最短启动路径。

定义机组 i 的综合优先级指标为

$$\eta_i = \frac{\varepsilon P_{GMi}}{\sum_{j=1}^l T_j(t)} \quad (11)$$

$$\varepsilon = \begin{cases} 1 & \text{火电机组} \\ \text{大于}1 & \text{水电机组} \end{cases} \quad (12)$$

式中: P_{GMi} 表示机组 i 的额定发电功率; l 表示当前送电路径包含线路数量; $T_j(t)$ 表示线路 j 的启动时间期望。由于水电机组启动后出力迅速, 调节能力强, 定义机组修正系数 ε , 增强水电机组优先级。

算法的思想为, 以机组迅速恢复为目标, 采用贪心思想, 时刻选取综合优先级最高且能通过启动校验的机组进行启动。连接待启动机组的线路组成

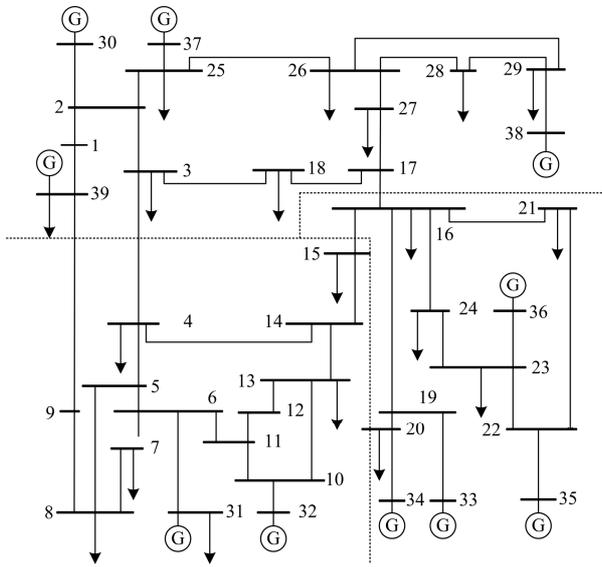


图 5 IEEE39 节点系统

Fig. 5 IEEE 39-bus power system

5.2 结果分析

根据算例信息制定启动预案，在 145 min 内，共有 26 条线路，27 个节点，220 MW 负荷投入，在第 7 步投入 14-13 后，共远程投入 21 条线路，时间达到 2 h，后续 5 条线路转为现场启动，启动方案能够成功实施的概率为 $0.99^{21} \times 0.995^5 = 79.0\%$ 。具体启动方案如表 1 所示，启动完成电网结构图如图 6 所示。

在步骤 2、3、5、7、8 路径投入前，按照算法步骤均校验了 39 节点机组投入路径，由于与 39 节点机组连接线路对地导纳过大，在恢复最后阶段仍未通过启动校验，启动失败。

表 1 发电机启动方案

Table 1 Units start-up scheme

步骤	投入路径	说明
1	30-2-25-37	累计耗时 15 min
2	25-26-29-38	累计耗时 35 min, 投入 26-29 前 26 节点投入负荷 160 MW
3	26-27-17-16-19-33	累计耗时 60 min
4	19-20-34	累计耗时 70 min
5	16-21-22-35	累计耗时 90 min, 投入 21-22 前 16 节点投入负荷 40 MW
6	22-23-36	累计耗时 105 min, 投入 22-23 前 21 节点投入负荷 20 MW
7	16-15-14-13-10-32	累计耗时 130 min
8	10-11-6-31	累计耗时 145 min

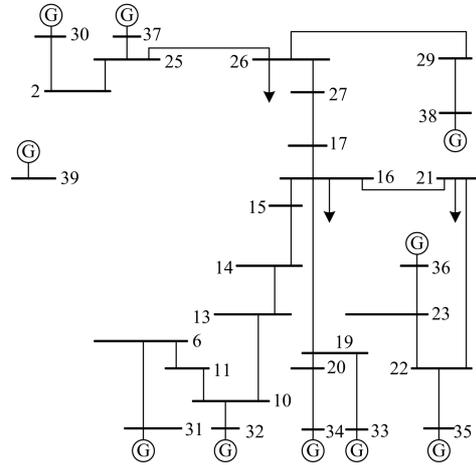


图 6 机组启动路径图

Fig. 6 Scheme of units start-up sequence

6 结语

本文研究了电网运行实际情况，建立了更贴近实际运行方式的线路投运模型，考虑线路投运成功概率问题，建立了线路投运时间成本的期望函数，求取了发电机启动综合优先指标，以及时恢复发电机组为目标提出了机组投运优化方法。提出方法具有以下特点：针对普遍推行的断路器、隔离开关远程操作问题，建立了线路投运时间模型，作为考虑机组启动顺序的指标；将线路权值表示为实时的时间函数，启动过程中可考虑线路权值的变化，根据启动成功或失败实时考虑线路权值变化，改变启动策略。此方法对黑启动方案的制定和在线决策系统的开发具有积极意义和参考价值。

参考文献

- [1] 何大愚. 对于美国西部电力系统 1996 年 7 月 2 日大停电事故的初步认识[J]. 电网技术, 1996, 20(9): 35-39. HE Dayu. A preliminary understanding of WSCC disturbance and separation on July 2, 1996 in the United States[J]. Power System Technology, 1996, 20(9): 35-39.
- [2] 薛禹胜. 综合防御由偶然故障演化为电力灾难——北美“8·14”大停电的警示[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 1-5, 37. XUE Yusheng. The way from a simple contingency to system wide disaster——lesson from the eastern interconnection blackout in 2003[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 1-5, 37.
- [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 Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1922-1928.
- [4] 阮前途, 马若新, 肖飞, 等. 菲律宾吕宋电网系统崩溃及黑启动措施分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4):

- 82-91.
RUAN Qiantu, MA Ruoxin, XIAO Fei, et al. Blackout and restoration experience in Luzon grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 82-91.
- [5] LESTER H F, LION K L, LIU C C. From generic restoration to specific restoration strategies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 745-752.
- [6] JERRY J A. A framework for power system restoration following a major power failure[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 9(3): 1480-1485.
- [7] 钟慧荣, 顾雪平, 朱玲欣. 黑启动恢复中网架重构阶段的负荷恢复优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 26-32.
ZHONG Huirong, GU Xueping, ZHU Lingxin. Optimization of load restoration during network reconfiguring process of black-start restoration[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 26-32.
- [8] 刘崇茹, 邓应松, 卢恩, 等. 大停电后发电机启动顺序优化方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 55-59.
LIU Chongru, DENG Yingsong, LU En, et al. Optimization of generator start-up sequence in power system restoration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 55-59.
- [9] 朱冬雪, 顾雪平, 钟慧荣. 电力系统大停电后机组恢复的多目标优化方法[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 814-820.
ZHU Dongxue, GU Xueping, ZHONG Huirong. A multi-objective optimization method for post-blackout unit restoration[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 814-820.
- [10] 刘强, 石立宝, 周明, 等. 电力系统恢复中机组恢复的优化选择方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 164-170.
LIU Qiang, SHI Libao, ZHOU Ming, et al. Optimal strategy for units start-up during power system restoration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 164-170.
- [11] 罗宗杰. 基于混合整数二元规划的机组启动次序策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 112-116, 121.
LUO Zongjie. Generator unit startup sequence strategy based on mixed integer dual programming[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 112-116, 121.
- [12] 王洪涛, 刘玉田. 电力系统恢复的主从递阶决策模型及其优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 8-13.
WANG Hongtao, LIU Yutian. Leader-follower hierarchical decision model and optimal method for power system restoration[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 8-13.
- [13] 刘皓明, 丁帅, 卢恩, 等. 含快速切负荷功能火电机组的电力系统黑启动策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 23-28, 116.
LIU Haoming, DING Shuai, LU En, et al. A power system black-start strategy considering thermal power units with FCB function[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 23-28, 116.
- [14] 周敏, 刘艳. 计及火电机组启动过程的网架并行恢复策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(10): 30-34, 93.
ZHOU Min, LIU Yan. A parallel restoration strategy for power network considering the start-up process of thermal units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 30-34, 93.
- [15] 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, 31(28): 25-32.
GU Xueping, ZHONG Huirong, JIA Jinghua, et al. Extended black-start schemes of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 25-32.
- [16] 陈亮, 顾雪平, 贾京华. 基于病毒进化改进 NSGA-II 算法的扩展黑启动多目标优化[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 35-42.
CHEN Liang, GU Xueping, JIA Jinghua. Multi-objective extended black-start schemes optimization based on virus evolution improved NSGA-II algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 35-42.
- [17] 刘艳, 刘国良, 顾雪平. 输电网架恢复方案线路投运风险评估[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(13): 12-16.
LIU Yan, LIU Guoliang, GU Xueping. Line risk assessment in transmission network restoration schemes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13): 12-16.
- [18] 刘国良, 刘艳, 顾雪平. 输电网架恢复方案关键线路辨识[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(1): 23-28.
LIU Guoliang, LIU Yan, GU Xueping. Identification of critical lines in restoration scheme for transmission network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 23-28.
- [19] 刘翔宇, 梁海平, 张凡. 基于负荷恢复的后续网络恢复方法研究[J]. 华北电力大学学报, 2011, 38(4): 33-38.
LIU Xiangyu, LIANG Haiping, ZHANG Fan. Algorithm research of transmission line restoration based on load restoration during subsequent process of black start[J]. Journal of North China Electric Power University, 2011, 38(4): 33-38.

收稿日期: 2015-07-06; 修回日期: 2015-08-17

作者简介:

刘翔宇(1987-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统动态仿真、电力系统安全稳定分析、网源协调; E-mail: liuxiangyu1234@163.com

胡雪凯(1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统计算分析工作;

胡文平(1968-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事新能源发电并网、电网分析工作。

(编辑 魏小丽)