

基于 TOPSIS 法的地区电网黑启动方案评估

马成廉^{1 2} 朱国栋³ 孙 黎^{1 2}

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 昌平 102206; 3. 吉林电力股份有限公司 四平热电公司生产计划科, 吉林 四平 136000)

摘 要: 地区电网黑启动辅助决策系统的开发对辅助调度人员制订黑启动方案、实现系统全停后的快速恢复具有重要作用。主要研究了黑启动方案评估, 并将其应用于黑启动辅助决策支持系统中。利用 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 法分析评估黑启动初始方案组, 建立数据库并进行分析推理, 评估各初始方案的优劣, 从而选择出最优的黑启动方案。同时探讨了黑启动过程中被启动火电机组的运行特性。

关 键 词: 黑启动; TOPSIS; 地区电网; 评估

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

随着国内电网的日益增大, 电网结构也越来越复杂, 一旦出现故障, 极易造成连锁反应, 导致电网发生联动致大停电事故。为此, 针对自身电网条件和特点, 制订合理的黑启动预案成为各级电网必须切实完成的工作。

对于地区电网来说, 电网管辖范围以城区为主, 一般没有或很少有大型水电厂或者大容量燃煤机组, 主要是小容量燃煤电厂和小容量水电厂, 地区电网的黑启动能力与这些机组的启动能力有很大关系。地区电网的黑启动涉及发电、输电和配电等多个环节, 设备多、电压等级多, 不同电压等级设备的调度权限也有所不同, 这些都使得地区电网黑启动存在一定的困难。

地区电网黑启动方案的制定需综合考虑各方面的因素, 中依靠人工对初始方案进行分析对比, 其过程复杂, 人为因素影响较大, 很难得到最优的黑启动方案。所以, 对地区电网黑启动方案进行科学合理的评估, 以便在大停电后为运行人员提供科学、客观的决策依据。文献[1]提出了一种基于关联矩阵的评估法, 对多目标系统方案从多个因素出发综合评价优劣。文献[2]将数据包络分析法(简称 DEA)应用到黑启动方案评估中, 提出了一种基于数据包络分析的相对有效评估法。文献[3]讨论了地方电厂启动的相关问题及调研时应注意的问题, 指出了黑启动过程中一些容易被忽略的问题, 并对解决措施进行了分析。文献[4]提出了利用图形建模系统形成网络的拓扑关系, 采用了基于规则的深度优先搜索技术形成黑启动初始方案的方法。文献[5]讨论利用网络拓扑分析技术、层次分析法和专家系统对黑启动方案生成进行研究。文献[6]提出一种基于群决策特征根对应的特征向量, 即可得到理想黑启动决策专家的综合评估值向量, 之后利用数值代数中的幂法来求解该优化决策问题。文献[7]提出了一种基于模糊区间数的黑启动方案评估层次分析法。

收稿日期: 2014-03-10

作者简介: 马成廉(1983-), 男, 吉林省吉林市人, 东北电力大学输变电技术学院讲师, 华北电力大学电气与电子工程学院在读博士研究生, 主要研究方向: 为电力系统安全风险评估、电力系统防灾减灾、智能电网。

1 黑启动方案评估

1.1 黑启动方案原则

黑启动方案在制定时应遵循以下基本原则^[5]:

(1) 启动路径中电压转换的次数要尽量少。电压转换次数的增加将会造成黑启动初始阶段空载线路电压是否会越限,这关系到黑启动的成功与否。

(2) 每个黑启动方案路径长度尽可能地短。黑启动过程中空载线路很容易引起操作过电压、发电机自励磁等问题。

(3) 尽量先启动离重要负荷近的机组。

(4) 每个方案的启动时间要尽量短。黑启动过程中要充分考虑到被启动火电机组的机组特性,且系统恢复过程中尽量选择所经变电站次数少的黑启动路径。

(5) 每个方案中在启动容量允许的前提下选择的被启动机组的容量要尽可能大。

基于上述原则生成的黑启动初始方案后,要对黑启动方案进行综合排序或择优,即综合评价。从数学的角度看综合评价,是指通过一定的数学模型或算法将多个指标评价“合成”为一个整体性的综合评价。到目前为止,已有多种综合评价方法,常见的有简单加权法、层次分析法、TOPSIS 法及灰色关联法等。本文选择 TOPSIS 方法分析评估黑启动方案。

1.2 TOPSIS 法

TOPSIS 法是系统工程中有限方案多目标决策分析的一种常用的决策技术,它是一种逼近理想解的排序法,其中“正理想解”和“负理想解”是 TOPSIS 的 2 个基本概念,即通过设计各个指标的正理想解和负理想解,建立评价指标与正理想解和负理想解之间距离的二维数据空间,在此基础上对评价方案与正理想解和负理想解作比较,若最接近于正理想解,同时又最远离负理想解,则该方案是被选方案中最好的方案^[8]。TOPSIS 具有直观的几何意义,对原始数据的利用比较充分,信息损失比较少,应用范围广,具有一定的客观性,是一种有效的多属性决策方法^[9-12]。其计算步骤是:

第一步,数据规范化处理。对原始决策矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 进行规范化处理,得规范化决策矩阵 $Y = (y_{ij})_{m \times n}$,采用极差变换法,即用评价指标的实际值和该指标的最低值之差与该指标的极差的比值来表示,反映指标实际值在该指标权重中所处的位置。极差变换法计算公式为:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}, \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为第 i 条黑启动路径的 j 项指标的实际值; $\min x_{ij}$ 是最小值; $\max x_{ij}$ 是最大值; 经过指标标准化后,构建决策矩阵 Y 。

黑启动初始方案中选择时间准则、可靠性准则、调整系数指标来评价黑启动路径。时间准则主要考虑黑启动方案中一次设备的操作次数,尤其是刀闸和开关的操作次数,一次设备的操作次数的多少将关系到黑启动的恢复时间。可靠性准则

考虑的主要因素是每个黑启动方案的线路长度及一次设备的操作次数。与调整系数相关的是该黑启动方案周边负荷的重要性等级。例如表 1 所列举的黑启动方案。

由表 1 可得到原始决策矩阵 X ,采用极差变换法,进行规范化处理,从而得到规范化决策矩阵 Y 。

$$\text{注: } X = \begin{pmatrix} 4 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 3 & 3 & 1 \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \end{pmatrix}。$$

表 1 黑启动方案

路径	时间准则	可靠性准则	调整系数
1	4	2	1
2	2	4	2
3	3	3	1

第二步,确定指标权重,构建加权规范化决策矩阵。确立黑启动方案中各个指标的权重 $W = (w_1, w_2, \dots, w_j)$, 建立加权规范化决策矩阵:

$$Z = (z_{ij})_{m \times n}, \quad (2)$$

$$Z = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1j} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2j} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ z_{j1} & z_{j2} & \cdots & z_{jj} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

由表 1 可知各指标权重 $w = (0.412 \quad 0.530 \quad 0.059)$ 。基于上述方法,由公式(2)可得到规范化决策矩阵 $Z = \begin{pmatrix} 0.412 & 0 & 0 \\ 0 & 0.530 & 0.059 \\ 0.206 & 0.265 & 0 \end{pmatrix}$ 。

第三步,确定正理想解 Z^+ 和负理想解 Z^- 的 2 个人造黑启动方案,即正理想黑启动方案和负理想黑启动方案。

正理想解:

$$Z^+ = (z_1^+, z_2^+, \dots, z_n^+) = w, \quad (4)$$

负理想解:

$$Z^- = (z_1^-, z_2^-, \dots, z_n^-) = 0, \quad (5)$$

其中

$$z_j^+ = \max z_{ij} = w_j, \quad (6)$$

$$z_j^- = \min z_{ij} = 0, \quad (7)$$

由公式(4)、(5),可得到表 1 的正理想解 $z^+ = (0.412 \quad 0.530 \quad 0.059)$ 和负理想解 $z^- = (0 \quad 0 \quad 0)$ 。

第四步,计算距离。分别计算各黑启动方案与正理想解和负理想解的距离,到正理想解的距离 d^+ 和负理想解的距离 d^- :

$$d^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - z_j^+)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (8)$$

$$d^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - z_j^-)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (9)$$

由公式(8)、(9)分别计算各黑启动方案的正理想解的距离 d^+ 和负理想解的距离 d^- ,可得到 $d^+ = (0.759 \quad 0.709 \quad 0.675)$ 和 $d^- = (0.412 \quad 0.533 \quad 0.336)$ 。

第五步,计算黑启动方案与最优方案的接近程度 C_i 。

$$C_i = \frac{d^+}{d^+ + d^-}, \quad (10)$$

C_i 越大,表明第 i 个黑启动方案越接近最优。显然贴近度 C_i 的值是介于 0 到 1 之间的。当 $C_i = 1$ 时,黑启动方案所求为最优路径;当 $C_i = 0$ 时,黑启动方案无用。

由公式(10)可得到各黑启动方案的接近程度 C_i , $C_i = (0.648 \quad 0.571 \quad 0.668)$ 。

第六步,排列黑启动方案的优先序,按 C_i 由大到小排序。从所得数据可以看到方案 3 是最优路径。

1.3 障碍度模型

黑启动方案评估既在于对黑启动初始方案进行评价,另一个原因是理清影响黑启动方案的障碍因子,以便有针对性地对黑启动方案的路径进行调整,因此需进一步对黑启动方案进行病理诊断。具体方法是引入因子贡献度 F_j (单因素对总目标的权重)、指标偏离度 I_j (单因素指标与黑启动方案评估目标之间的差距,即单项指标因素评估值与 100% 之差)、障碍度 (O_j, U_i) (分别表示单项指标和分类指标对黑启动方案评估的影响程度)对 3 个指标进行分析诊断。具体计算公式:

$$F_j = R_i \times W_j , \tag{11}$$

$$I_j = 1 - X_j , \tag{12}$$

式中: X_j 为操作层指标的标准化值 ,该处标准化值采用极值标准化法而得 ,第 j 个指标对黑启动方案的障碍度为:

$$O_j = \frac{I_j \times F_j}{\sum_{j=1}^{24} F_j \times I_j} \times 100\% , \tag{13}$$

在分析各单项评价因子限制程度基础上 ,进一步研究各控制层指标对黑启动方案评估的障碍度 ,公式为:

$$U_i = \sum O_{ij} , \tag{14}$$

式中: O_{ij} 是各操作层指标的障碍度。

表 2 黑启动方案评估评判标准

贴近度	0.00 – 0.30	0.31 – 0.60	0.61 – 0.80	0.81 – 1.00
优劣程度	低级	中级	良好	优质

2 黑启动过程中的火电机组特性

黑启动过程的主要任务就是恢复带基础负荷的火电机组的运行。被启动电源是否合适是黑启动过程的一个重要问题 ,而火电机组的运行工况非常复杂 ,影响火电机组恢复的因素也很多 ,选择被启动电源主要从以下 3 类点考虑^[13]:

2.1 火电机组的出力与负荷

机组的额定出力决定了机组启动后能给系统提供多少电力。黑启动过程中火电机组的出力主要与机组当前恢复的时间段及机组升负荷特性有关。

对机组启动时间特性的研究发现 ,机组的累积启动时间相对较长 ,而黑启动的目的是为了以最短的时间恢复更多的机组和负荷。表 3 说明了不同容量火电机组在极热态和热态状态下的负荷与启动时间关系。

表 3 机组启动时间

启动方式	机组类型	启动时间 /min	
		10% 负荷	20% 负荷
极热态启动	125 MW	115	118
	200 MW	115	116
	300 MW (中储)	104	111
热态启动	300 MW (直吹)	105	115
	125 MW	190	229
	200 MW	184	218
	300 MW (中储)	145	154
	300 MW (直吹)	147	157

2.2 火电机组的状态

黑启动过程中被启动电源的启动时间决定了黑启动所需时间的重要部分。被启动的火电机组的状态关系着启动时间。火电机组的状态主要由汽轮机在停运一段时间后的缸温来决定。按照汽轮机高压内缸上缸内壁金属温度可划分为冷态启动 (壁温 < 150 ℃)、温态启动 (壁温为 150 ℃ – 300 ℃)、热态启动 (壁温为 300 ℃ – 400 ℃) 和极热态启动 (壁温 > 400 ℃)。被启动电源以冷态启动或热态启动是被启动电源启动时间的关键^[14,15]。表 4 以 300 MW 亚临界机组为例 ,说明火电机组在不同状态下的启动时间。

表 4 300MW 亚临界机组停机时间与启动时间关系

启动类型	停机时间 (h)	启动时间 (h)
极热态启动	< 1	< 1
热态启动	1 – 10	1 – 1.5
温态启动	10 – 72	2 – 3
冷态启动	> 72	5 – 6

在黑启动过程中还要充分考虑被启动火电机组的厂用电供电方式及厂用电率。黑启动电源能为被启动火电机组提供厂用电及部分地区负荷的恢复。

3 应用实例

本文按照上述方法在黑启动辅助决策支持系统中构建数据库和编程,对甘肃省某地区电网进行了黑启动方案的搜索和评估。

甘肃某地区电力系统以 330 kV 线路为骨干,各级电网为经络,形成一张坚强有力的大电网,现已成为河西电网的主要组成部分。首先根据黑启动电源、网架结构和被启动机组状况进行分区,实现多个子系统的独立并行恢复,其中,小孤山电站担任甘肃某地区的黑启动机组。子系统恢复的初始阶段,小孤山电站水电机组成功黑启动后,需向张掖火电机组提供厂用电,其形成的部分黑启动初始方案,见表 5。

表 5 黑启动初始方案

序号	黑启动初始方案路径
1	小孤山电站→黑开变→龙渠二级→龙渠三级→小满变→新墩变→张掖变→张掖电厂
2	小孤山电站→黑开变→清泉变→山丹变→张掖变→张掖电厂
3	小孤山电站→黑开变→清泉变→清泉变→山丹牵引变→张掖变→张掖电厂
4	小孤山电站→黑开变→龙渠一级→盈科电站→新墩变→张掖变→张掖电厂
5	小孤山电站→黑开变→清泉变→四坝变→新墩变→上秦变→火车站变→张掖变→张掖电厂
6	小孤山电站→黑开变→龙渠一级→盈科电站→新墩变→上秦变→火车站变→张掖变→张掖电厂
7	小孤山电站→黑开变→清泉变→四坝变→新墩变→上秦变→火车站变→张掖变→张掖电厂
8	小孤山电站→黑开变→清泉变→四坝变→新墩变→平原堡变→临泽变→张掖变→张掖电厂
9	小孤山电站→黑开变→张掖变→张掖电厂
10	小孤山电站→黑开变→清泉变→四坝变→位齐变→北滩变→新墩变→张掖变→张掖电厂

表 5 中的黑启动路径,仅为小孤山电站到张掖电厂间的部分路径。对于系统自动生成的所有黑启动路径,利用 TOPSIS 法对所有黑启动路径进行评估,黑启动路径的排序结果,见表 6。

表 6 系统自动生成的黑启动路径排序方案结果

序号	黑启动初始方案路径
1	小孤山电站→黑开变→张掖变→张掖电厂
2	小孤山电站→黑开变→清泉变→山丹变→张掖变→张掖电厂
3	小孤山电站→黑开变→清泉变→山丹牵引变→山丹变→张掖变→张掖电厂
4	小孤山电站→黑开变→清泉变→四坝变→新墩变→张掖变→张掖电厂
5	小孤山电站→黑开变→龙渠一级→盈科电站→新墩变→张掖变→张掖电厂
6	小孤山电站→黑开变→清泉变→四坝变→新墩变→上秦变→火车站变→张掖变→张掖电厂
7	小孤山电站→黑开变→清泉变→四坝变→新墩变→平原堡变→临泽变→张掖变→张掖电厂
8	小孤山电站→黑开变→清泉变→四坝变→位齐变→北滩变→山丹变→张掖变→张掖电厂
9	小孤山电站→黑开变→清泉变→六坝变→民乐变→城南变→新墩变→张掖变→张掖电厂
10	小孤山电站→黑开变→龙渠一级→龙渠二级→龙渠三级→小满变→新墩变→张掖变→张掖电厂
11	小孤山电站→黑开变→龙渠一级→盈科电站→新墩变→上秦变→火车站变→张掖变→张掖电厂
12	小孤山电站→黑开变→龙渠一级→盈科电站→新墩变→平原堡变→临泽变→张掖变→张掖电厂
13	小孤山电站→黑开变→清泉变→山丹变→北滩变→位齐变→四坝变→新墩变→张掖变→张掖电厂
14	小孤山电站→黑开变→清泉变→四坝变→新墩变→上秦变→火车站变→张掖变→张掖电厂
15	小孤山电站→黑开变→清泉变→四坝变→新墩变→平原堡变→沙井变→临泽变→张掖变→张掖电厂

4 结 论

本文研究了使用 TOPSIS 方法技术的黑启动评估方法。TOPSIS 法具有直观准确的特点,并且在计算和处理上非常方便,可以有效地进行黑启动方案的评估,提高黑启动方案评估的效率。该方法在一定程度上克服了传统决策方法的缺点,丰富和完善了黑启动决策的理论体系,可以为黑启动方案提供更全

面的决策支持。本文也在一定程度上探讨了关于黑启动过程中被启动机组的选择问题,可以方便工作人员更科学、合理地制定黑启动方案,以保证系统大停电后的快速恢复具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 孟宪朋,么莉,林济铿.基于关联矩阵法的电网黑启动方案评估[J].电工电能新技术,2007,26(4):65-70.
- [2] 刘艳,顾雪平,张丹.基于数据包络分析模型的电力系统黑启动方案相对有效性评估[J].中国电机工程学报,2006,26(5):32-37.
- [3] 蔡述涛,张尧,荆晓霞.地方电网黑启动方案的制定[J].电力系统自动化,2005,29(12):73-76.
- [4] 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.
- [5] 高远望,顾雪平,刘艳.电力系统黑启动方案的自动生成和评估[J].电力系统自动化,2004,28(13):50-54.
- [6] 林振智,文福拴,薛禹胜,等.基于多属性群决策特征根法的智能电网黑启动决策[J].电力系统自动化,2010,34(5):18-22.
- [7] 李秀卿,尚景刚,姜世金,等.基于模糊区间数的黑启动方案评估层次分析法[J].电工电能新技术,2010,29(2):57-61.
- [8] 倪静.基于 TOPSIS 法的黑启动决策方法[J].广东电力,2009,22(12):8-15.
- [9] 钟慧荣,顾雪平.基于模糊层次分析法的黑启动方案评估及灵敏度分析[J].电力系统自动化,2010,34(16):34-37+49.
- [10] 刘连志,顾雪平,刘艳.不同黑启动方案下电网重构效率的评估[J].电力系统自动化,2009,33(5):24-28.
- [11] 林振智,文福拴,周浩.熵权决策理论及其在黑启动决策中的应用[J].电力系统及其自动化学报,2009,21(06):36-33.
- [12] 潘超,马成廉,郑玲峰,等.一种结合模糊 TOPSIS 法和 BP 神经网络的变压器故障诊断方法[J].电力系统保护与控制,2009,37(09):20-24+29.
- [13] 董张卓,焦建林,孙启宏.用层次分析法安排电力系统事故后火电机组恢复的次序[J].电网技术,1997,21(6):48-51.
- [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.
- [15] 瞿寒冰,刘玉田.机组启动过程中的负荷恢复优化[J].电力系统自动化,2011,35(08):16-21.

The Regional Power Grid Black-start Scheme Evaluation Based on TOPSIS

MA Cheng-lian^{1 2}, ZHU Guo-dong³, SUN Li^{1 2}

(1. Electrical Engineering College, Northeast Dianli University, Jilin Jilin 132012; 2. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping Beijing 102206; 3. Producing & Planning Priision, Jilin Power Share Co. LTD Siping Heating and Power Plant, Siping Jilin 136000)

Abstract: The Regional Power Grid development of Black-start decision support system developed for the auxiliary dispatchers Black Start programs to achieve full stop after the system has an important role in the rapid recovery. This paper mainly studies the development of black start scheme evaluation and is applied to black and decision support system. Using TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) method to evaluate black start initial solutions group and to establish the database analysis and reasoning, evaluate each initial Solution quality so as to choose the optimal black start scheme. This paper also discusses the black start is in the process of start the characteristics of thermal power unit.

Key words: Black-start; TOPSIS; The Regional Power Grid; Evaluation