

智能电网黑启动群体决策的可靠性分析

林振智¹, 文福拴¹, 薛禹胜², 周 浩¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027;
2. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏省南京市 210003)

摘要: 智能电网要求黑启动决策结果具有高可靠性。在此背景下,提出了基于熵的思想对黑启动群体决策结果的可靠性进行分析,构造了量化黑启动决策可靠性的指标。通过求解每一个决策专家的决策熵,可得到其决策水平,进而得到专家群体的综合决策水平,从而可以了解黑启动群体决策结果的可靠性,为决策专家重新评估各黑启动方案提供帮助,达到提高黑启动决策可靠性的整体水平和优化群体决策结果的目的。分析结果丰富了智能电网黑启动决策支持系统的研究,使得调度人员能够了解黑启动决策结果的可靠性并做出满足可靠性水平要求的最优黑启动决策。通过算例对所提出的方法进行了验证。

关键词: 智能电网; 黑启动; 多属性群体决策; 可靠性分析; 决策熵

0 引言

电力系统黑启动或恢复决策的主要任务是保证电力系统发生大停电后能够快速、安全、经济地恢复供电,最大限度地减小停电损失及恢复控制措施可能造成的失稳风险^[1-2]。黑启动决策的研究目前大多集中于黑启动方案的评估方法^[3-8],即采用适当的评估方法得到黑启动方案的排序。但是,对于得到的黑启动方案排序结果是否合理和可靠,现有文献都未进行深入研究,即在得到黑启动决策结论之后没有对其进行评价和进一步优化调整。正如文献[9-10]所指出的那样,恢复决策中需要考虑不确定性因素,也需要对不同的策略进行优化协调和合理评估。文献[11]针对只有单个决策者参与的黑启动决策方法,分析了黑启动决策的指标值和指标权重,得到了影响黑启动方案排序结果的灵敏度区间,并对黑启动方案排序结果的稳定性进行了分析。但到目前为止,就笔者所知,在黑启动方案排序结果可靠性分析方面尚未有研究报道。事实上,在实际的黑启动决策过程中,往往需要对决策结果进行深入分析和优化。因此,有必要对黑启动决策方案的可靠性进行深入研究。

在实际的黑启动决策过程中,仅仅获得黑启动决策方案往往是不够的,一般还需要知道按其执行后系统恢复的质量,及其对整个黑启动过程的影响

等。文献[12]提出了有多个调度人员和(或)其他电力专家参与黑启动决策的群体决策方法,丰富了智能电网黑启动决策支持系统的理论,得到了由群体专家参与黑启动决策的黑启动方案优劣排序,但从其算例分析结果可以看出,在前一组专家群中,每个专家的个体决策结果与最终得到的群体决策结果差异较大,而在后一组专家群中,有 80% 专家的个体决策结果与最终得到的群体决策结果完全一致。可以看出,对于这 2 组决策专家群体,黑启动群体决策结果的可靠性是不同的,而可靠性水平的高低对整个黑启动过程的恢复速度和最终的恢复质量影响很大。因此,对黑启动群体决策进行可靠性分析也应是智能电网黑启动决策支持系统研究的重要内容。

熵的概念最初产生于热力学,是由法国物理学家 K. Clausius 在 1854 年提出的,用于描述运动过程的一个不可逆现象。后来,在信息论中广泛用熵来表示系统的紊乱程度,即系统的不确定性或无序状态的量度。一个系统有序程度越高,其熵就越小,所含的信息量就越大;反之,无序程度越高,熵就越大,信息量也就越小。按照熵的思想,决策专家在决策过程中获得的信息的多少和质量是影响决策精度和可靠性的决定因素。熵是评价不同决策过程的比较理想的尺度^[13]。因此,在分析黑启动群体决策结果的可靠性时可以借鉴熵的概念。

在上述背景下,本文致力于对黑启动群体决策结果的可靠性进行分析。基于熵的思想提出了衡量黑启动决策专家决策水平的指标,即量化黑启动决策可靠性程度的指标。通过求解每一个黑启动决策专家的决策熵,可以得到其决策水平,进而获得群体

收稿日期: 2009-12-13; 修回日期: 2010-01-30。
“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAA13B10); 中国博士后科学基金资助项目(20090461352)。

专家的整体黑启动决策水平。这样,就可以了解各个黑启动决策专家所做出的黑启动个体决策结果的可靠性,使得决策专家(特别是决策可靠性水平相对较低的专家)了解自己所做的黑启动决策结果与群体决策结果之间的差异,为其调整策略提供参考。

1 黑启动群体决策的可靠性分析

在黑启动群体决策过程中,首先由各个决策者分析该问题,分别根据自己的专业知识、实际经验等对各个黑启动方案进行评价,在此基础上得到黑启动群体决策结果;然后,对黑启动群体决策的结果进行深入分析,即分析决策结果的可靠性^[14-15]。如果决策结果的可靠性不能满足要求,则需要群体决策者重新对该黑启动问题进行分析和研究,调整各自的黑启动决策策略,然后对黑启动方案做出新的评价,直到决策结果的可靠性满足要求为止,此时各黑启动决策者在黑启动方案评价问题上就达成了共识。上述过程可用附录 A 图 A1 所示流程图表示。文献[12]对黑启动群体决策方法进行了探索,本文在此基础上对黑启动群体决策结果的可靠性进行系统的研究。

对于给定的黑启动群体决策问题,假定有 m 个评价指标, n 个待评价的黑启动方案, s 个参与黑启动决策的调度人员和(或)其他电力专家。记 $M = \{1, 2, \dots, m\}$, $N = \{1, 2, \dots, n\}$, $S = \{1, 2, \dots, s\}$ 。设黑启动决策指标集为 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$; 黑启动方案集为 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$; 黑启动群体决策的专家集合为 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_s\}$ 。每个参与黑启动群体决策的专家根据自己的专业知识和实际经验等分别对黑启动决策指标集 C 中的所有指标赋予权重,然后选择适当的个体决策方法来综合评价各个黑启动方案。设 V_{jl} 表示经标准化处理后的黑启动方案 j 对指标 l 的属性值, $V_{jl} \geq 0$, $j \in N$, $l \in M$; 专家 e_i 确定的指标权重向量为 $\omega_i = (\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{im})$, 其中 $\omega_{il} \in [0, 1]$, $i \in S$, $l \in M$, 且 $\sum_{l=1}^m \omega_{il} = 1$ 。不失一般性,这

里假设所有专家都采用简单加权法^[11]作为个体决策方法来得到对黑启动方案集 A 中各个方案的综合评价。当然,在实际决策过程中,专家们可以根据自己的偏好,在保证综合评价具有可比性的前提下,选择不同的决策方法(如层次分析法、数据包络分析法等)作为其个体决策方法。

专家 e_i 对各个方案 a_j 的综合评价 x_{ij} 可表示为一个 n 维列向量 $\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T$, 这样所有决策专家对所有方案的评价值就可表示为一个 $s \times n$ 阶矩阵,即

$$\mathbf{X} = (x_{ij})_{s \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{s1} & x_{s2} & \cdots & x_{sn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $x_{ij} > 0$; $i \in S$; $j \in N$ 。

x_{ij} 越大,则专家 e_i 认为方案 a_j 越好。

把理想中的决策水平最高、评价最准、可靠性最高(为 100%)或不确定性最小(为 0)的黑启动决策专家称为理想专家,并记为 e_* , 则其综合评价向量记为 $\mathbf{X}_* = (x_{*1}, x_{*2}, \dots, x_{*n})^T$ 。专家 e_i 的决策水平越低,则其所做的决策结论与理想专家 e_* 相差越大。因此,可以利用这种差异性来衡量决策专家 e_i 的决策水平,即衡量决策结果的可靠性。在黑启动群体决策中,一般定义综合评价向量与群体中各专家评价向量夹角之和最小的黑启动决策专家为该群体的理想专家,其决策过程可通过群体决策方法(如群决策特征根法)确定^[12]。

记 $S_* = \{*, 1, 2, \dots, s\}$ 。为了确定专家 e_i 的决策水平,首先需要将与黑启动决策相关的各种参数单位化,单位化公式如下:

$$\mathbf{D}_i = (d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{in})^T \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = (\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_s)^T = (d_{ij})_{s \times n} \quad (3)$$

式中: $i \in S_*$; $d_{ij} = x_{ij} / \sqrt{x_{i1}^2 + x_{i2}^2 + \dots + x_{in}^2}$; $j \in N$ 。

从上述单位化公式可以看出: $0 \leq d_{ij} \leq 1$, 且

$\mathbf{D}_i^T \mathbf{D}_i = \|\mathbf{D}_i\|^2 = \sum_{j=1}^n d_{ij}^2$ 。然后,以 $\mathbf{R}_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$ 表示按专家 e_i 对各方案 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 的综合评价大小排列的优劣名次。其中,被专家 e_i 赋予的具有最高综合评价的方案记为 a_{j*} , 即

$$x_{ij*} = \max_{1 \leq j \leq n} x_{ij} \quad i \in S_* \quad (4)$$

此时 $r_{ij*} = 1$; 反之,对于被专家 e_i 赋予的最低综合评价的方案记为 a_{j0} , 其 $r_{ij0} = n$ 。

定义 1 黑启动决策专家 e_i 的决策水平向量^[13,16]为:

$$\mathbf{B}_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in}) \quad (5)$$

式中: $i \in S_*$; $b_{ij} = \frac{1}{1 + |r_{*j} - r_{ij}| + |d_{*j} - d_{ij}|}$, $0 < b_{ij} \leq 1$, $j \in N$ 。

由定义 1 可以看出:理想专家 e_* 的决策水平向量为 $\mathbf{B}_* = (1, 1, \dots, 1)$, 即决策水平向量各分量值达到最大值 1 时,其决策水平最优。专家 e_i 的决策水平越低,其与理想专家 e_* 的决策结论差异就越大,则其决策水平向量 $\mathbf{B}_i$ 中各分量值就越小。决策专家 e_i 与理想专家 e_* 的决策结论差异表现在对方案 a_j 的综合评价和所评估的优劣名次上。如果

专家 e_i 与理想专家 e_* 对方案 a_j 所评估的优劣名次的差异越大,则 $|r_{*j} - r_{ij}|$ 的值越大;如果决策专家 e_i 与理想专家 e_* 对方案 a_j 的综合评价值相差越大,则 $|d_{*j} - d_{ij}|$ 的值就越大。

因此,决策水平向量 $\mathbf{B}_i$ 客观而全面地反映了专家 e_i 对方案 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 所做的决策结论的水平。在此基础上,根据熵的思想,可作如下定义^[16]:

定义 2 黑启动决策专家 e_i 的决策水平(即可靠性),可以用其决策结论的不确定性即黑启动决策熵 H_i 来衡量。专家 e_i 的决策熵 H_i 等于其决策水平向量各分量的熵之和,即

$$H_i = \sum_{j=1}^n h_{ij} \quad (6)$$

式中: H_i 的单位为 nat,与热力学中熵的单位相同。

$$h_{ij} = \begin{cases} |b_{ij} \ln b_{ij}| & \frac{1}{e} \leq b_{ij} \leq 1 \\ \frac{2}{e} - |b_{ij} \ln b_{ij}| & 0 < b_{ij} < \frac{1}{e} \end{cases}$$

$i \in S_*, j \in N$ 。

由定义 2 可知:专家 e_i 对方案 a_j 的决策水平量 b_{ij} 与其熵 h_{ij} 成反比,且决策熵函数 H_i 是非负递减函数^[13]。专家 e_i 的决策水平越高, b_{ij} 就越大,则 H_i 就越小;反之,专家 e_i 的决策水平越低, b_{ij} 就越小,则 H_i 就越大。因此,如果专家 e_i 所做的决策结论的不确定性越小,可靠性就越高,则其 H_i 就越小,决策水平也就越高。

综上所述,黑启动决策的熵定量描述了黑启动决策的可靠性,从而可以成为衡量专家决策水平的理论依据。表 1 列出了专家所做的决策结论的可靠性对应的决策熵 H_i 的部分数值。例如,在对 n 个待评估的黑启动方案进行决策时,如果求得的专家的决策熵小于 $0.048\ 73n$ nat,则其所做的黑启动决策结果的可靠性不低于 95%。

表 1 黑启动决策的可靠性与决策熵值
Table 1 Relationship between reliability and entropy of decision-making

黑启动决策的可靠性/(%)	允许的最大决策熵/nat
100	0
99	0.009 95n
95	0.048 73n
90	0.094 82n
80	0.178 51n
70	0.249 67n
60	0.306 50n
50	0.346 57n

上述关于决策熵的定义是针对参与黑启动决策的个体专家的决策可靠性进行的。下面将其推广到

对群体专家的整体决策可靠性的分析。

定义 3 黑启动决策专家群体 E 的整体决策水平的测度函数(即群体决策熵) H_* 为:

$$H_* = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s H_i \quad (7)$$

H_* 越小,则群体决策水平越高。

在得到黑启动决策结果之后,参与黑启动决策的专家(特别是决策可靠性较低的专家)可以通过调整各自的决策策略以最小化群体决策熵,从而使得群体决策的可靠性水平满足一定的要求。此外,还可以根据各个决策专家的决策可靠性水平,适当调整以后的决策专家,通过这种方式最小化群体决策熵,进而达到提高整体决策水平的目的。

综上所述,黑启动群体决策可靠性分析算法的步骤如下:

- 1) 设定一个期望的黑启动决策可靠性水平;
- 2) 决策专家对各个方案进行综合评价;
- 3) 将与黑启动决策相关的各种参数单位化;
- 4) 计算各黑启动决策专家的决策水平向量 $\mathbf{B}_i$;
- 5) 计算各决策专家的决策熵 H_i 及其对应的决策可靠性水平;
- 6) 计算整个黑启动决策群体的决策熵 H_* 及其对应的决策可靠性水平;
- 7) 判断群体决策的可靠性水平是否满足预先设定的水准,如果满足则算法停止;否则,各专家(特别是决策可靠性水平低于预先设定水准的专家)应根据群体决策结果以及自己的决策可靠性水平调整自身的黑启动决策策略,即返回步骤 2,如此迭代,直到群体决策的可靠性水平满足要求为止。

2 算例分析

采用文献[11]中给出的算例来说明所提出的可靠性分析方法,有关原始数据及其标准化处理方法参见文献[11],这里只给出标准化后各黑启动方案的指标值,见附录 B 表 B1。共有 6 个待评估的黑启动方案,分别为 $a_1 \sim a_6$;选取 5 个评估指标(指标的选取方法见文献[17]),即待启动机组的额定容量 c_1 、所处的状态 c_2 、升负荷特性 c_3 、启动所需的电能 c_4 以及需要操作的开关数 c_5 。假定共有 4 位专家参与黑启动决策,分别为 $e_1 \sim e_4$ 。这些专家根据其各自的专业知识、运行经验等因素分别给各指标赋予了指标权重,其向量分别为 $\omega_1 = (0.10, 0.10, 0.20, 0.30, 0.30)$, $\omega_2 = (0.30, 0.30, 0.15, 0.15, 0.10)$, $\omega_3 = (0.10, 0.15, 0.35, 0.25, 0.15)$, $\omega_4 = (0.20, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20)$ 。

由文献[12]的群体决策结果可知:在精度要求

为 $\epsilon=0.000\ 1$ 的条件下,理想黑启动决策专家的综合评价价值向量为 $\mathbf{X}_*=(0.394\ 5,0.365\ 5,0.423\ 8,0.310\ 2,0.473\ 3,0.459\ 2)^T$;黑启动方案的群体决策结果为: $a_5>a_6>a_3>a_1>a_2>a_4$,即黑启动方案排列名次为: $r_{*1}=4,r_{*2}=5,r_{*3}=3,r_{*4}=6,r_{*5}=1,r_{*6}=2$ 。

将 $\mathbf{X}$ 按式(2)和式(3)单位化后可得:

$$\mathbf{D}=\begin{bmatrix}0.344 & 0.321 & 0.423 & 0.328 & 0.578 & 0.397 \\ 0.421 & 0.413 & 0.390 & 0.289 & 0.406 & 0.501 \\ 0.402 & 0.342 & 0.462 & 0.314 & 0.445 & 0.460 \\ 0.397 & 0.373 & 0.414 & 0.307 & 0.474 & 0.462\end{bmatrix}$$

将 $\mathbf{D}$ 代入式(5)~式(7),计算结果如附录 B 表 B2 所示,其中的黑启动决策可靠性由表 1 查得。由表 B2 可以看出:专家 e_4 的决策可靠性水平最高(达到 99%);专家 e_1 次之(为 60%);专家 e_2 和 e_3 最差,且都小于 50%;群体决策熵 H_* 为 2.137 5 nat,即群体决策的可靠性水平小于 50%。可见,整体决策水平由于专家 e_2 和 e_3 的可靠性低而下降。假设所要求的群体决策的可靠性水平为 95%,则上述群体决策水平不能满足要求。

下面分析文献[12]中另一组 5 个专家进行黑启动群体决策的情况,并以该算例为例深入研究黑启动决策的可靠性问题及优化黑启动决策可靠性的方法。该组专家给定的权重向量分别为 $\omega_1=(0.20,0.20,0.20,0.20,0.20),\omega_2=(0.19,0.21,0.20,0.19,0.21),\omega_3=(0.18,0.22,0.19,0.10,0.31),\omega_4=(0.11,0.39,0.20,0.15,0.15),\omega_5=(0.20,0.20,0.20,0.15,0.25)$ 。由文献[12]的群体决策结果可知:在精度要求 $\epsilon=0.000\ 1$ 的条件下,理想专家的综合评价价值向量 $\mathbf{X}_*=(0.383\ 1,0.378\ 1,0.410\ 5,0.298\ 1,0.478\ 8,0.473\ 0)^T$;黑启动方案的群体决策结果为: $a_5>a_6>a_3>a_1>a_2>a_4$,即黑启动方案排列名次为: $r_{*1}=4,r_{*2}=5,r_{*3}=3,r_{*4}=6,r_{*5}=1,r_{*6}=2$ 。

根据上述计算步骤可得表 2 所示的计算结果,其中的决策可靠性由表 1 查得。从表 2 可以看出:专家 e_1,e_2,e_3,e_5 的决策可靠性水平最高(达到 99%);专家 e_4 最差(为 70%);群体决策熵 H_* 为 0.314 8 nat,即可靠性水平达到 90%。假设给定的群体决策可靠性水平为 95%,则这种情况下群体决策水平也不能满足要求。可见,该群体的整体决策水平由于专家 e_4 的决策结果而下降。由于在实际的黑启动决策过程中,指标权重的确定具有一定的模糊性,因此,专家 e_4 可根据群体决策结果及可靠性分析结果调整其决策策略。假设其修改后的赋予各个黑启动指标的权重向量为 $\omega_4'=(0.21,0.16,$

$0.21,0.19,0.23)$ 。经重新计算可得新的群体决策可靠性指标,如表 3 所示。在精度要求 $\epsilon=0.000\ 1$ 的条件下,理想黑启动决策专家的综合评价价值向量 $\mathbf{X}_*=(0.397\ 1,0.371\ 7,0.411\ 5,0.304\ 7,0.479\ 3,0.460\ 6)^T$;黑启动方案的群体决策结果为: $a_5>a_6>a_3>a_1>a_2>a_4$ 。

表 2 5 位专家参与黑启动决策的可靠性分析结果
Table 2 Reliability analysis results of decision-making by five experts

决策专家	黑启动决策水平向量	H_i/nat	决策可靠性/(%)
e_1	(0.986 0,0.994 8,0.996 6,0.990 8,0.995 0,0.988 7)	0.047 9	99
e_2	(0.991 1,0.995 0,0.997 1,0.992 9,0.999 1,0.990 4)	0.034 3	99
e_3	(0.996 2,0.995 5,0.993 5,0.998 3,0.984 5,0.991 0)	0.040 9	99
e_4	(0.490 2,0.495 9,0.999 4,0.981 9,0.498 1,0.491 4)	1.412 1	70
e_5	(0.983 7,0.995 1,0.999 7,0.995 1,0.997 8,0.989 5)	0.038 9	99
群体		0.314 8	90

表 3 5 位专家参与黑启动决策的可靠性分析结果 (重新评估后)
Table 3 Reliability analysis results of decision-making by five experts (after reappraisal)

决策专家	黑启动决策水平向量	H_i/nat	决策可靠性/(%)
e_1	(0.999 8,0.998 9,0.997 7,0.997 4,0.994 5,0.999 1)	0.012 6	99
e_2	(0.995 1,0.998 7,0.998 2,0.999 4,0.998 6,0.997 4)	0.012 6	99
e_3	(0.989 9,0.998 2,0.992 5,0.991 8,0.985 0,0.996 8)	0.045 6	99
e_4	(0.988 0,0.994 2,0.995 5,0.993 5,0.994 5,0.991 2)	0.042 9	99
e_5	(0.997 4,0.998 6,0.998 6,0.998 3,0.997 3,0.998 2)	0.011 6	99
群体		0.025 1	99

从表 3 可以看出,专家 e_4 调整决策策略后,5 位专家的决策可靠性水平都已达到 99%;群体决策熵 H_* 为 0.025 1 nat,即群体决策的可靠性水平已达到 99%。因此,群体决策结果的可靠性水平已满足 95%的要求,故最终的黑启动方案的群体决策结果为: $a_5>a_6>a_3>a_1>a_2>a_4$ 。此外,根据各个决策专家的决策熵的大小可知:各个专家决策水平由高到低的排序为 $e_5>e_1=e_2>e_4>e_3$ 。因此,经过一轮调整决策策略之后,群体决策水平得到了提高,从而达到了优化群体决策结果的目的,且在一定程度上解决了指标权重确定的模糊性问题。

3 结语

基于熵的思想,研究了黑启动决策个体和群体决策质量的评估问题,提出了一种黑启动群体决策可靠性分析的定量方法。黑启动群体决策结果的可靠性分析丰富了智能电网黑启动决策支持系统的理论体系,而且也可以使得决策专家了解自己对各黑启动方案的评估结果的可靠性,据此适当调整自己的决策策略。这样,可以提高群体决策的整体可靠性水平,降低决策风险,改善最终系统恢复的质量。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架:(一)从孤立防线到综合防御. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 8-16.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts; Part I from isolated defense lines to coordinated defending. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-16.
- [2] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架:(三)各道防线内部的优化和不同防线之间的协调. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 1-10, 106.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts; Part III optimization and coordination of defense-lines. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 1-10, 106.
- [3] ADIBI M M, KAFKA L R J, MILANICZ D P. Expert system requirements for power system restoration. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1592-1600.
- [4] 周云海, 闵勇, 杨滨. 黑启动及其决策支持系统. 电力系统自动化, 2001, 25(15): 43-46, 62.
ZHOU Yunhai, MIN Yong, YANG Bin. Decision support system for black-start. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(15): 43-46, 62.
- [5] ISLAM S, CHOWDHURY N. A case-based windows graphic package for the education and training of power system restoration. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(2): 181-187.
- [6] 刘艳, 顾雪平. 评估黑启动方案的层次化数据包络分析方法. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 33-38.
LIU Yan, GU Xueping. Hierarchical data envelopment analysis for assessing black-start plans. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 33-38.
- [7] 林济铿, 蒋越梅, 岳顺民, 等. 基于 DEA/AHP 模型的电力系统黑启动有效方案评估. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 65-69, 110.
LIN Jikeng, JIANG Yuemei, YUE Shunmin, et al. Assessment of effective schemes for power system blackstart based on DEA/AHP. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 65-69, 110.
- [8] 刘玉田, 王春义. 基于数据仓库的网架恢复群体智能决策支持系统. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 45-50.
LIU Yutian, WANG Chunyi. Group intelligent decision support system for power system skeleton restoration based on data warehouse. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 45-50.
- [9] 薛禹胜, 费圣英, 卜凡强. 极端外部灾害中的停电防御系统构思:(一)新的挑战与反思. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 1-6.
XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters; Part I new challenges and reflection. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 1-6.
- [10] 薛禹胜, 费圣英, 卜凡强. 极端外部灾害中的停电防御系统构思:(二)任务与展望. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 1-5.
XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters; Part II tasks and prospects. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 1-5.
- [11] 林振智, 文福拴, 薛禹胜. 黑启动决策中指标值和指标权重的灵敏度分析. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 20-25.
LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, XUE Yusheng. Sensitivity analysis on the values and weights of indices in power system black-start decision-making. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 20-25.
- [12] 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. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 18-23.
LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Black-start decision-making in smart grids using multi-attribute group eigenvalue method. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 18-23.
- [13] 邱苑华. 管理决策与应用熵学. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [14] 徐玖平, 陈建中. 群决策理论与方法及实现. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [15] 彭本红, 孙绍荣, 张文健. 研讨厅中专家意见的可靠性研究. 系统工程理论方法应用, 2004, 13(4): 343-346.
PENG Benhong, SUN Shaorong, ZHANG Wenjian. The study on reliability of the expert's agreement in the workshop of metasynthetic engineering. Systems Engineering Theory Methodology Applications, 2004, 13(4): 343-346.
- [16] 吴坚, 梁昌勇, 李绩才. 群决策中专家决策意见的可靠性研究. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2009, 32(3): 366-368.
WU Jian, LIANG Changyong, LI Jicai. Study on the reliability of group agreement under group decision making. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2009, 32(3): 366-368.
- [17] 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. 电网技术, 1997, 21(6): 48-51, 54.
DONG Zhangzhuo, JIAO Jianlin, SUN Qihong. Arrangement of priority sequence of thermal unit restoration on analytical hierarchy process model. Power System Technology, 1997, 21(6): 48-51, 54.

林振智(1979—),男,博士,现在博士后流动站从事研究工作,主要研究方向:电力系统恢复及电力系统稳定控制。
E-mail: zhenzhi.lin@gmail.com

文福拴(1965—),男,通信作者,特聘教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统故障诊断、系统恢复和电力市场。
E-mail: fushuan.wen@gmail.com

薛禹胜(1941—),男,中国工程院院士,国网电力科学研究院名誉院长,博士生导师,主要研究方向:电力系统自动化。E-mail: yxue@sgepri.sgcc.com.cn

Reliability Analysis on the Group Decision-making Results of Black-start Strategies in Smart Grids

LIN Zhenzhi¹, WEN Fushuan¹, XUE Yusheng², ZHOU Hao¹

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

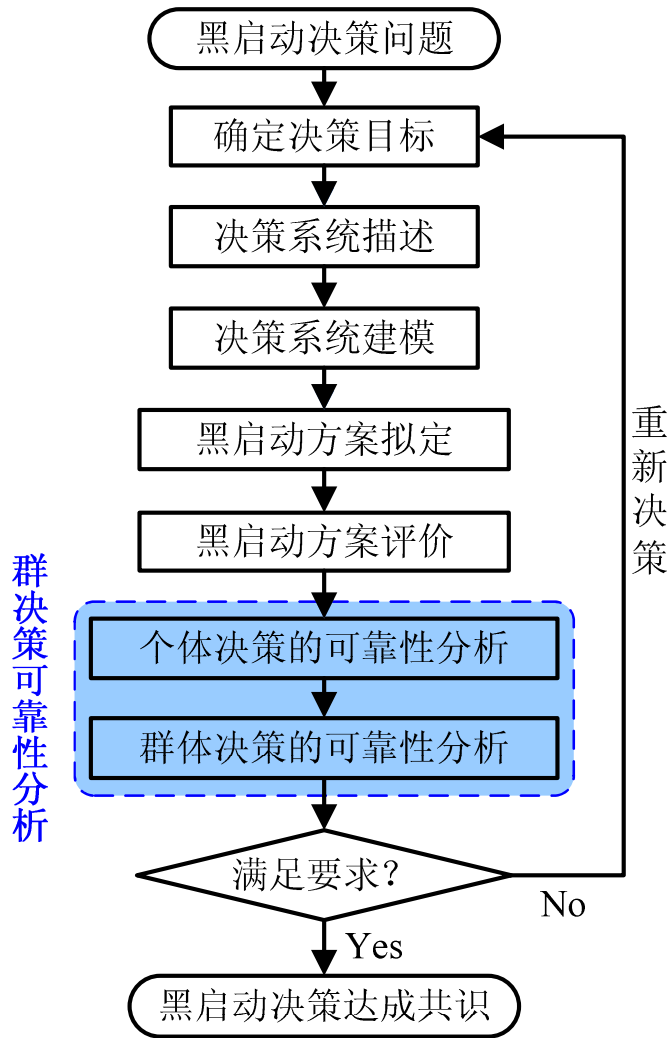
2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: High reliable decision-making results for black-start are required in smart grid. Based on the idea of entropy, a new method for the reliability analysis on the black-start decision-making results is proposed, and an index for quantifying the reliability level of black-start decision-making and measuring the decision-making level of the experts concerned is presented. The decision-making reliability level of each decision-maker such as dispatchers and/or other power system experts could be obtained by calculating the decision-making entropy, and then an integrated decision-making reliability level is attained. Based on the results of the reliability analysis, the decision-makers could reappraise their black-start strategies. As a result, the integrated reliability level could then be improved and the black-start decision-making results optimized. Furthermore, the reliability analysis could extend the theoretical framework of the black-start decision support system in smart grids, and its results would be helpful for dispatchers to understand the reliability of the obtained black-started restoration strategy and to ultimately make the optimal decision-making of the black-start strategy with the accepted reliability level. Numerical examples are served for demonstrating the developed method.

This work is supported by the Key Project of the National Science & Technology Pillar Program (No. 2008BAA13B10) and Post-doctoral Science Foundation of China (No. 20090461352).

Key words: smart grid; black-start; multi-attribute group decision-making; reliability analysis; decision-making entropy

附录 A



阴影部分为可靠性分析部分

图 A1 黑启动群体决策过程及其可靠性分析流程

Fig.A1 The flowchart of group decision-making procedure and reliability analysis of black-start strategies

附录 B

表 B1 用于评估黑启动方案的经标准化后的指标值
Table B1 Index values used to evaluate the black-start strategies (after standardization)

方案	指标 c_1	指标 c_2	指标 c_3	指标 c_4	指标 c_5
a_1	1.000	0.333	0.960	0.200	0.200
a_2	0.667	0.778	0.533	0.300	0.250
a_3	0.417	0.556	1.000	0.500	0.333
a_4	0.417	0.333	0.500	0.500	0.333
a_5	0.167	0.778	0.267	1.000	1.000
a_6	0.667	1.000	0.912	0.300	0.250

表 B2 4 位专家参与黑启动决策的可靠性分析结果
Table B2 The reliability results of decision-making by four experts

决策专家	黑启动决策水平向量	H_i (nat)	决策可靠性
e_1	(0.9520, 0.4892, 0.4997, 0.4955, 0.9053, 0.4850)	1.5322	60%
e_2	(0.3304, 0.3281, 0.3296, 0.9797, 0.2459, 0.4898)	4.7551	<50%
e_3	(0.9928, 0.9774, 0.3292, 0.9966, 0.3302, 0.9989)	2.2372	<50%
e_4	(0.9973, 0.9928, 0.9901, 0.9972, 0.9995, 0.9977)	0.0253	99%
群体		2.1375	<50%