

基于熵值法和主成分分析法的黑启动模式评估

区伟健, 房鑫炎

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 选取合理的黑启动模式有利于评选最优黑启动方案。分析了黑启动策略、模式和黑启动方案的配合, 研究了黑启动模式的约束条件和各种模式的特征。在分析黑启动模式综合评价指标选取原则基础上, 提取了黑启动模式的综合评估指标体系并进行层次化处理。对层次化的评估指标体系, 指标层利用主成分分析法消除了指标间的关联, 准则层利用客观性很强的熵值法给出各模式的最终评价价值, 最后分析了评估方法的灵敏度。实际算例证明了此方法的有效性和可行性, 能够为调度人员选取最优黑启动模式提供参考。

关键词: 黑启动; 模式评估; 主成分分析法; 熵值法; 灵敏度

Assessment of black-start modes based on entropy value method and principal component analysis

OU Wei-jian, FANG Xin-yan

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Selecting a reasonable black-start mode is helpful to decide the optimal black-start scheme. This paper analyses the cooperation of black-start strategies, black-start modes and black-start schemes, and then studies the constraint conditions and characteristics of black-start modes. Based on analyzing the selection principle of the black-start mode comprehensive assessment index system, it extracts the system and handles it with hierarchical processing. In the hierarchical assessment index system, principal component analysis is used to remove the correlation between the indexes in the index layer, and entropy value method is used to obtain the ultimate evaluation value in the criterion layer. At last, it analyses the sensitivity of the method. A practical example proves its effectiveness and feasibility. This method is able to provide a reference for the schedulers to choose the optimal mode.

Key words: black-start; mode evaluation; principal component analysis; entropy value method; sensitivity

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)08-0022-06

0 引言

大停电后的黑启动是电力系统安全防御体系重要一环, 迅速地恢复系统正常供电可以使停电损失降到最低^[1-5]。黑启动初期形成的电气小系统联系薄弱且稳定能力不足, 小的扰动也可造成系统再次崩溃, 黑启动初期在整个黑启动过程中占据重要地位。黑启动电源对黑启动初期小系统稳定性起决定性作用, 且决定黑启动模式^[6]。考察不同黑启动模式的优劣, 对成功进行黑启动及选择合适的黑启动方案^[7]均有重要意义。文献[6]提出了黑启动模式的概念, 把黑启动分为模式层和方案层两个层次进行考虑, 细化了黑启动方案的评估。文献[8]提出了黑启动的模式评估概念, 提取了广义黑启动模式的评估指标, 利用层次化数据包络分析方法(DEA/AHP)对实例进行评估。然而, DEA方法实质是通过线性

规划方法使各指标的效益最大化, 有可能使其中不重要指标赋予较大权重, 失去客观性。而且 AHP方法的指标赋权凭借主观判断, 会导致客观性不足。黑启动模式评估方面的研究报道在国内还很少。

本文从黑启动策略、模式与方案配合关系入手, 在考虑黑启动模式的约束条件、特征及评估指标选取原则基础上, 建立了其综合评价指标体系。对于层次化的评估原则, 在指标层利用主成分分析法得到准则层综合评估值, 在准则层利用客观性很强的熵值法给出各模式最后综合评价价值, 并对结果进行灵敏度分析, 得出最优模式供调度人员参考。

1 黑启动策略、模式与方案的配合

黑启动策略包括向下恢复(串行恢复)策略和向上恢复(并行恢复)策略^[9]。黑启动机组容量和分布地点、系统规模大小和架构以及事故后系统内

孤岛存活情况是决定黑启动策略的主要因素^[10]。事故发生后需要做出孤岛存活情况的相关统计, 结合其他因素选择适当策略。系统规模较小或者不具备分区条件(电网架构太复杂、黑启动机组过于集中或个别机组容量太小)时, 可以考虑向下分区策略; 系统规模较大且具备分区条件, 可采用向上恢复策略。黑启动模式包括水电或抽水蓄能电站启动模式、孤岛启动模式、燃气轮机启动模式和外网联络线启动模式。不同启动模式各有特点, 也有各自对应的黑启动方案。若能根据实际情况, 首先确定最适合的启动模式及其最先启动的机组, 则会大大提高黑启动初期成功率。在此模式下对黑启动方案进行选择, 可以提高黑启动成功率和方案选择效率。考虑黑启动策略和模式的黑启动方案生成过程如图 1 所示。

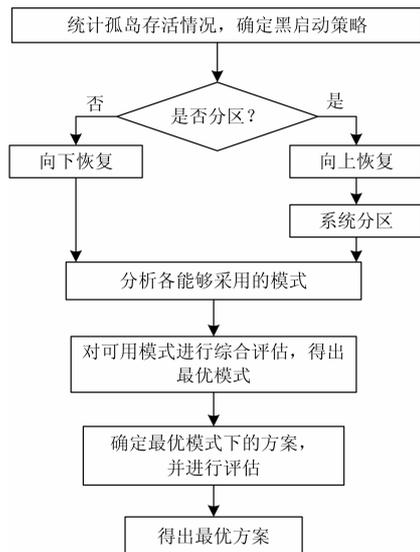


图 1 考虑黑启动策略和模式的方案评选流程

Fig. 1 Scheme selection process considering black-start strategy and mode

2 黑启动模式的约束条件及特征

电网一般包含多种模式, 但这些模式能否运用, 还会受地理位置、网络结构、电源和被启动机组的特性等影响, 需要满足一定约束条件。而且, 不同的黑启动模式也有其自身特征。需要对实际电网黑启动模式的约束条件和特征进行分析, 才能选择合适的黑启动模式。

2.1 黑启动模式的约束条件

黑启动模式并不涉及整个黑启动过程, 只涉及黑启动电源和最先被启动机组。各种黑启动模式均要满足电气距离、输电能力和节点平衡条件等各种约束, 不满足这些约束的黑启动模式可不必考虑。

需要满足的约束条件如下:

1) 容量约束。黑启动机组(联络线、孤岛)外送功率的容量 P_s 应大于首先被启动电厂的厂用电负荷容量 P_r 。而且, 因厂用电带有冲击负荷性质, 通常要求 P_r 小于 P_s 的 80%, 即 $P_r \leq 80\%P_s$ 。

2) 连接性约束。黑启动机组和首先被启动电厂之间应有合适的路径, 通过开关状态的适当调整形成功率输送通道。

3) 电压降落约束。电能输送路径末端的节点电压应维持在额定范围内, 表述为 $V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}$ 。 V_{\min} 和 V_{\max} 分别为电压最小和最大的允许值。一般要求 V_i 在 0.95~1.052 倍额定电压范围内。

4) 送电时间约束。一般情况下, 水轮机模式和燃气轮机模式均可持续送电, 无需考察。但孤岛中可能含有蓄电池单元等送电时间有限制的电源, 联络线的送电时间也可能因调度等原因有时间限制。黑启动电源送电时间应大于被启动机组成功启动到稳定运行的时间。

2.2 各种黑启动模式的特征

1) 水轮机启动模式。水轮机组容量大且启动速度快, 结构简单且厂用电少, 是理想的黑启动电源。为保持其黑启动能力, 需要定期维护直流蓄电池和柴油发电机等设施, 造成一定的费用开销。但在水资源缺乏的地方, 如深圳、香港等城市电网, 水轮机组模式将不可行。

2) 燃气轮机模式。现代燃气轮机组能够快速启动接入负荷, 适合在缺乏水电的地方作为黑启动电源。然而, 维持其黑启动能力的柴油发电机成本较高, 其黑启动成本是需要重点考察的一个因素。

3) 事故后残存孤岛黑启动模式。孤岛启动具有速度快, 投资小的特点。能否采用此模式的关键是事故后电力孤岛的残存情况和地理位置。孤岛的容量裕度大小、功率外送能力、稳定控制能力都会影响孤岛启动模式能否采用。通常需要专家对事故后孤岛进行分析才能决定是否考虑此模式。

4) 联络线启动模式。相邻电网的支援可以大大提高系统恢复的速度。然而, 此模式需要视相邻电网的具体情况而定, 调度权是其中一个重要因素。因此, 需要事先与相邻电网进项协商, 制定调度预案, 避免发生事故后调度权的混乱。

3 黑启动模式的综合评估指标体系

黑启动模式的选取受众多因素影响。为全面反映各个黑启动模式特性, 选取评估指标时, 需遵循下面原则: (1) 指标应该具有明确意义, 指标值能

够通过某些方法获得。(2) 指标体系对黑启动模式各方面的描述尽可能全面, 能够综合地反映模式的特性。(3) 指标间关联性尽可能小, 各指标相互独立, 使指标间不会相互影响, 减少对同一特性的重复描述。(4) 选取指标时应使各种模式在某个指标的取值上尽可能有大的区分度, 使指标能够精确反映某个模式的特性。

基于以上原则, 详细比较黑启动模式的各个方面特性, 结合第 2 节中分析的模式约束条件以及特征, 选取如图 2 所示指标作为模式评估的综合评价指标^[5]。

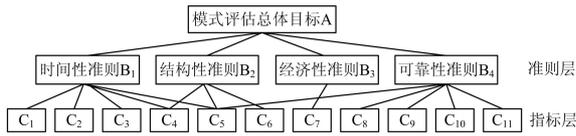


图 2 模式评估综合评价指标

Fig. 2 Model evaluation comprehensive evaluation index

指标层各个指标含义见表 1。方便起见, 记黑启动机组为 BU(Black-start Unit), 最先被启动机组为 ESU(Earliest Started Unit), 最先被启动电厂为 ESP(Earliest Started Plant)。

表 1 黑启动评估指标含义

Table 1 Meaning of the black-start evaluation index

序号	评估指标	
	成本型指标	效益型指标
C ₁	BU 启动时间(s)	
C ₂		BU 的容量 (MW)
C ₃		ESP 的总容量 (MW)
C ₄	BU 与 ESU 间路径长度 (km)	
C ₅	BU 与 ESU 间一次设备操作数 (次)	
C ₆		BU 周围重要负荷密集度 (个)
C ₇	黑启动设备全寿命周期成本 (万元)	
C ₈		黑启动电源成功启动可靠性
C ₉	ESU 母线侧过电压倍数	
C ₁₀	黑启动初期小系统频率偏离百分数	
C ₁₁	ESP 母线电压偏离百分数	

指标体系具有明显的层次特性。时间性、结构性、经济性和可靠性四个准则决定了模式的优劣。而一个准则又与若干个指标相关联。指标间也可能

存在着联系, 如结构性准则下的 C₄ 和 C₅, 黑启动路径越长, 其需要操作一次设备数会更多, 因此具有关联性。而四个准则意义明确, 没有相关性。

4 基于熵值法和主成分分析法黑启动模式评估

黑启动模式评估指标有 11 个, 如何确定这些指标的权重大小, 并利用它们来反映黑启动模式的优劣, 是一个多属性决策问题。由黑启动模式综合评估体系可知, 指标体系具有明显的层次性。本文利用熵值法和主成分分析法相结合的方法进行黑启动模式评估。笔者认为, 指标之间具有一定的相关性, 而准则之间没有相关性。主成分分析法可以消除指标之间的相关性, 而熵值法具有很强的客观性, 可以对准则间给出客观的评价。因此, 在指标层使用主成分分析法, 在准则层使用熵值法进行评估。

4.1 主成分分析法 (Principal Component Analysis, PCA) 在指标层的运用

PCA 由美国统计学籍 Pearson 于 1901 年提出, 是一种能够分析指标变量相关性并给出其中重要信息的方法^[11]。从数学角度看, 是一种降维的思想, 可以把多个相关的指标经过变换转化为无关指标并进行分析。

设有 m 个评价对象, 需要用 n 个评价指标 x_1, x_2, \dots, x_n 进行评价。其指标值可以构成一个 $m \times n$ 阶矩阵 $\mathbf{x} = (x_{ij})_{m \times n}$, 令 $\mathbf{x}_k = (x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{mk})^T$ 表示 \mathbf{x} 的第 k 个列向量。求取 n 个指标的期望 $\boldsymbol{\mu} = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n]^T$, 令 $v_{ij} = \text{cov}(x_i, x_j) (i, j \in [1, n])$, 其中 $\text{cov}(x_i, x_j)$ 表示 x_i 和 x_j 之间的协方差。从而求出 $n \times n$ 阶协方差矩阵 $\mathbf{V} = [v_{ij}]$ 。

建立数学模型:

$$\begin{cases} \max D(y) = D(\sum_{r=1}^n \alpha_r x_r) = \mathbf{A}^T \mathbf{V} \mathbf{A} \\ \text{s.t. } \mathbf{A}^T \mathbf{A} = \sum_{r=1}^n \alpha_r^2 = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{A} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^T$; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 为 n 个指标的系数; $D(y)$ 为 y 的方差; y 为 \mathbf{A} 与 \mathbf{x} 构造的线性函数。

利用拉格朗日乘子法求解有:

$$D(y) = \mathbf{A}^T \mathbf{V} \mathbf{A} = \boldsymbol{\lambda} \mathbf{A}^T \mathbf{A} = \boldsymbol{\lambda} \quad (2)$$

式中, $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n]$ 为 \mathbf{V} 的特征值 (由大到小)。

设 λ_i 对应特征向量为 $\boldsymbol{\gamma}_i = (\gamma_{i1}, \gamma_{i2}, \dots, \gamma_{in})^T$, 则第 i 个主成分量为

$$y_i = \sum_{k=1}^n \gamma_{ik} x_k \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

第 i 个主成分分量的贡献率为

$$\beta_i = \lambda_i / \sum_{r=1}^n \lambda_r \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

β_i 用来度量第 i 个主成分的贡献率, 越大表明其贡献越大。前 q 个主成分的累积贡献率为

$$\beta_q = \sum_{i=1}^q \beta_i \quad (5)$$

一般情况下, 若累积贡献率超过 85%, 则只要采用这 q 个主成分即可。为充分利用原始信息, 本文不丢弃任何成分, 采用各个主成分分量的贡献率作为其权重。则利用求得的主成分分量及其权重, 可得各种模式综合得分为

$$P = \sum_{i=1}^n \beta_i y_i \quad (6)$$

式中, P 为一个 m 维列向量。

4.2 熵值法在准则层的运用

熵是一个热力学概念, 描述系统的紊乱程度^[11]。在准则层运用中, 其基本原理为: 假设有 m 个评价对象, q 项评价准则, 形成评价矩阵 $e = (e_{ij})_{m \times q}$, 对其中某个评价准则, 若 m 个取值之间差距越大, 则该指标在评价中的作用越大。

定义第 i 个评价准则的熵为

$$H_i = -k \sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad i=1, 2, \dots, q \quad (7)$$

式中: $f_{ij} = e_{ij} / \sum_{j=1}^m e_{ij}$; $k = 1 / \ln m$; 并且, 假定 $f_{ij} = 0$

时, $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。

则可定义第 i 个评价准则的熵权为

$$\omega_i = \frac{1 - H_i}{q - \sum_{l=1}^q H_l} \quad (8)$$

式中, $0 \leq \omega_i \leq 1$ 且 $\sum_{i=1}^q \omega_i = 1$ 。

由熵的定义及熵权的计算方法知, 若各方案在各准则上取值都相等, 则其熵值为 1, 熵权为 0, 此指标并不提供任何有用信息, 从而被去除; 若各个方案在某个评价准则上差异较大, 其熵值会较小, 而熵权较大, 这个评价准则会被重点考虑, 若差异较小, 则相反。需要指出, 熵权反映的并不是某个准则的重要程度, 而是准则之间在竞争意义上的重要程度, 体现了某个指标值差异越大, 更应该重点考察的思想。熵值法完全是一种客观的方法, 具有

很强的客观性。

4.3 基于熵值法和主成分分析法的黑启动模式估流程

本文指标层利用主成分分析法得出准则层的综合评价值, 在此基础上, 在准则层利用熵值法得出各个准则权重。在指标层考虑了指标关联, 而准则层具有很强客观性。如图 3 所示。

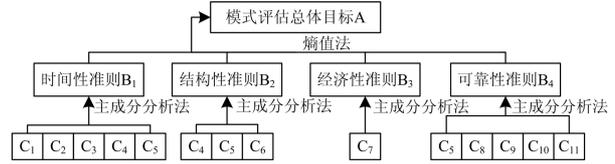


图 3 主成分分析法和熵值法的结合运用

Fig. 3 Combination of principal component analysis and entropy value method

不同的指标在量纲和取值上都存在很大差异, 在进行指标层和准则层的响应计算前, 都需要进行如下标准化处理。

$$x'_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min_m(x_{ij})}{\max_m(x_{ij}) - \min_m(x_{ij})}, j \in B \\ \frac{\max_m(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_m(x_{ij}) - \min_m(x_{ij})}, j \in C \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\max_m(x_{ij})$ 表示 m 个评价对象在第 j 个指标的最大值; $\min_m(x_{ij})$ 表示 m 个评价对象在第 j 个指标的最小值; B 表示效益型指标集合; C 表示成本性指标集合。

5 算例

为检验算法有效性, 本文利用深圳电网西南部区域验证文中评估算法^[8]。深圳西南部区域中, 月亮湾 9E 燃机组可作为黑启动机组, 南山垃圾电厂可在电网事故时解列孤岛运行, 香港蛇口电网也可通过联络线为该区域提供启动功率。则该区域可用模式有如表 2 中 5 种。

表 2 深圳西南部黑启动模式

Table 2 Black-start modes in southwest Shenzhen

序号	模式	恢复路径
1	燃机	月亮湾电厂 9E 机组 → 白田 → 欢乐 → 南山电厂
2	孤岛	南山垃圾电厂 → 白田 → 月亮湾电厂
3	孤岛	南山垃圾电厂 → 白田 → 欢乐 → 南山电厂
4	联络线	蛇口 → 欢乐 → 南山电厂
5	联络线	蛇口 → 欢乐 → 白田 → 月亮湾电厂

各种模式下各指标的取值见表 3。

表 3 各模式指标取值

Table 3 Index values of every mode

指标	模式				
	1	2	3	4	5
C ₁	15	1	1	1	1
C ₂	137.5	12	12	5	5
C ₃	600	150	600	600	150
C ₄	5	4	7	2.7	5.7
C ₅	12	6	8	6	8
C ₆	6	6	6	11	11
C ₇	116.3	50	50	20	20
C ₈	0.9	0.7	0.7	0.5	0.5
C ₉	1.24	1.07	1.13	1.04	1.12
C ₁₀	0.81	0.58	0.6	0.33	0.34
C ₁₁	0.5	0.9	1.2	0.1	0.2

5.1 利用 PCA 对指标层进行评价

先用式(9)对表 3 作标准化处理。然后按图 3 划分的层次分别计算各模式下各个准则的综合评价价值。对其中某个准则，首先得出与此准则关联的指标形成的评价矩阵，进而得出其协方差矩阵 V ，进一步求得各个主成分分量的对应的特征值 λ_i 和特征向量 γ_i ，利用式(3)和式(4)分别得出主成分分量 y_i 及其贡献率 β_i ，最后利用式(6)得出在此准则下各种模式的综合评价价值 P 。计算结果如表 4。

表 4 指标层综合评价价值

Table 4 Comprehensive evaluation value in index layer

模式	准则			
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
1	0.789 8	0.567 6	0.026 0	0.618 6
2	0.374 2	0.145 4	0.026 0	0.383 7
3	0.741 1	1.176 8	0.000 0	1.096 3
4	-0.288 1	0.292 4	1.000 0	-0.326 4
5	0.611 5	0.754 6	0.000 0	0.830 9

5.2 利用熵值法对准则层进行评价

5.1 节中得出各准则的综合评价价值，前文作标准化处理时已区分成本型指标和效益型指标，下面的标准化处理均认为是效益型指标，由式(9)得表 5。

表 5 标准化处理后的指标层综合评价价值

Table 5 Comprehensive evaluation value in index layer after normalized handling

模式	准则			
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
1	1.000 0	0.409 3	0.026 0	0.664 2
2	0.614 4	0.000 0	0.026 0	0.499 1
3	0.954 8	1.000 0	0.000 0	1.000 0
4	0.000 0	0.142 5	1.000 0	0.000 0
5	0.834 6	0.590 7	0.000 0	0.813 5

从而利用式(7)可得 4 个准则的熵分别为 (0.8514, 0.7502, 0.1435, 0.8420)。

利用式(8)可得其权重向量 $\omega=(0.1052, 0.1768, 0.6062, 0.1382)$ 。从而再利用表 5 中数据进行简单加权后可得模式的最终评价价值依次为(0.2851, 0.1494, 0.4154, 0.6319, 0.3047)。则模式排序为 $4>3>5>1>2$ ，可见其与文献[8]排序结果的最优模式和次优模式一致，差别仅在最劣两个模式。

根据实际情况，蛇口联络线距离南山电厂距离近，恢复速度快，重要负荷集中，恢复成本低，是很理想的黑启动模式。而南山垃圾焚烧电厂提供启动功率给南山电厂，也具有速度快、成本低、重要负荷集中的特点，可以作为备用模式。

对文献[8]方法所得评估值与本文所得评估值进行灵敏度分析。定义灵敏度为^[12]

$$\delta = \frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\text{sec}}}{\varphi_{\max}} \times 100\% \quad (10)$$

式中： φ_{\max} 表示评价价值的最大值； φ_{sec} 表示评价价值的次大值。灵敏度含义：灵敏度越大，则使用的评价算法得出的评价价值区分度越好，评选效果更好。

利用式(10)计算灵敏度得本文算法灵敏度为 46.9%，而文献[8]中 AHP/DEA 算法灵敏度为 14.2%。可见本文算法灵敏度远大于文献[8]中算法灵敏度，其评价效果更好。AHP/DEA 方法中，利用 DEA 方法对指标层进行评价，其实质是通过数学规划方法尽力使各指标的效益最大化，难以使各模式在指标层的评价价值有大的区分；而在准则层利用 AHP 方法通过主观判断得出各准则的相对重要性，取值一般不超过 3，各准则区别不大。因此，其决策灵敏度低于本文方法。

6 结束语

黑启动模式选择是黑启动方案选取的第一阶段。本文采用主成分分析法和熵值法相结合的方法，既考虑了指标的关联，又有很强的客观性，且灵敏度高，得到最优的黑启动模式供调度人员参考。针对不同的电网，本文给出的黑启动模式综合评估体系中的指标可以作适当调整，以更贴近实际。评估指标的选取还可以根据调度人员和专家的经验做出适当取舍以取得最好评估效果。本文得出的最优模式可以为最优方案的选取提供参考，简化了黑启动方案的选取过程。

参考文献

[1] 周孝信, 郑健超, 沈国荣, 等. 从美加东北部电网大面

- 积停电事故中吸取教训[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 1.
ZHOU Xiao-xin, ZHENG Jian-chao, SHEN Guo-rong, et al. From the northeast United States and Canada power blackout in the major lessons[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 1.
- [2] 梁海平, 郝杰, 顾雪平. 计及节点恢复成功率的黑启动分区恢复方案优化[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 230-238.
LIANG Hai-ping, HAO Jie, GU Xue-ping. Optimization of system partitioning schemes for black-start restoration considering the successful rate of node restoration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 230-238.
- [3] 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 Hui-rong, GU Xue-ping, ZHU Ling-xin. Optimization of load restoration during network reconfiguring process of black-start restoration[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 26-32.
- [4] 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 Li-bao, 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.
- [5] 刘玉田, 谭冰雪. 大电网恢复适应性分区方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 49-54.
LIU Yu-tian, TAN Bing-xue. Adaptive partition method for large power system restoration[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 49-54.
- [6] 陈石通, 房鑫炎, 胡子珩. 孤岛启动模式下的预置保护和自动装置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 53-57.
CHEN Shi-tong, FANG Xin-yan, HU Zi-heng. Study of protection and automation device configuration in the island startup mode[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 53-57.
- [7] 李如琦, 唐林权, 凌武能, 等. 基于前景理论和灰关联分析法的黑启动方案优选[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 103-107.
LI Ru-qi, TANG Lin-quan, LING Wu-neng, et al. Optimization of black-start based on prospect theory and grey relational analysis[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 103-107.
- [8] 吴焯, 房鑫炎, 张焰, 等. 电网黑启动的广义模式评估算法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 155-161.
WU Ye, FANG Xin-yan, ZHANG Yan, et al. Generalized assessment algorithm for power grid black-start modes[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 155-161.
- [9] 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): 25-28.
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): 25-28.
- [10] DELFINO B. Black-start and restoration of a part of the Italian HV network: modeling and simulation of a field test[J]. Power Systems, 1996, 11(3): 1371-1379.
- [11] 叶义成, 柯丽华, 黄德育. 系统综合评价技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
YE Yi-cheng, KE Li-hua, HUANG De-yu. Technology and application of comprehensive evaluation system[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [12] 魏新江, 余银, 张世民. 基于模糊灰关联投影法的深基坑支护方案优选[J]. 岩土力学, 2011, 31(7): 2226-2231.
WEI Xin-jiang, YU Yin, ZHANG Shi-min. Grey fuzzy variable decision-making model of supporting schemes for foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2226-2231.

收稿日期: 2013-07-23

作者简介:

区伟健(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统黑启动及继电保护; E-mail: owjforever@163.com

房鑫炎(1963-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护及系统安全。