

基于改进DEA/AHP模型电力系统黑启动方案评估

针对电力系统黑启动方案评估中多属性、主客观权重不易确定等特点；熵权法不能保证方案独立性；DEA模型不能完全排序且判断矩阵可能出现全部为1的问题，本文提出改进DEA/AHP模型。根据评价指标集中各指标的类型筛选出最优、最差方案加入待评估方案组中参加评估。本方法既能保证方案的独立性，又能实现完全排序，同时避免了求取权重的过程，增强了客观性。该方法计算简单，结果可靠，天津电网实际黑启动方案的评估结果证明了本方法的有效性。

刘 涛¹ 史成广² 林济铿³ / 1. 国网天津市电力公司电力科学研究院 2. 电力系统仿真控制教育部重点实验室（天津大学） 3. 同济大学电子与信息工程学院电力系



刘 涛 / 高级工程师

随着电网容量的不断扩大、高压超高压设备的接入，电网的稳定性日益受到威胁，电力系统黑启动问题逐渐被专家们重视。黑启动是指发生大面积后，具备黑启动能力的发电机组、外网联络线或者带电的孤岛带动无自启动能力的机组，对网架进行重构，逐步带动负荷，直至恢复全部停电区域的过程。对于某特定的系统，备选的黑启动方案可能有很多种，不同方案的微小差异可能导致后续恢复过程中出现重大偏差。因此黑启动方案优选问题对于整个黑启动过程来说至关重要，也是黑启动研究的重要课题之一。

目前国内外专家已经提出众多黑启动方案优选的方法，总体来说可分为确定性方法和不确定性方法。

确定性方法简单、便于操作，较早地应用于黑启动方案评估。文献[3]提出了用数据包络分析法（DEA）进行黑启动方案评估，该方法不能实现众多方案的完全排序，而是只能给出方案是

否有效。文献[1]提出给予层次分析法（Analytic Hierarchy Process, AHP）的评估方法，该方法应用认为给定的判断矩阵表示专家的主观经验，主观性较强，定量参数的转化也会引入一定的误差。文献[6]提出了基于DEA/AHP模型的黑启动方案评估方法，该方法结合了DEA、AHP二者的优势，但是特殊情况下会出现判断矩阵全为1引起不能完全排序的问题。文献[7]提出了基于关联矩阵法的黑启动方案评估方法，该方法没有考虑权重的处理问题，由专家给定，客观性略微不足。文献[10]提出了基于TOPSIS法的黑启动方案评估方法，该方法在排序上简单实用、便于操作，但是该方法没有对权重问题进行考虑，只是假定权重给定，同样存在客观性不足的问题。文献[11]提出基于熵权及其TOPSIS方法黑启动方案评估的方法，但是熵权求客观权重的过程将各方案耦合在一起，不能保证方案的独立性。

不确定性方法又称模糊类方法，同确定性方法相比该类方法增加了模糊性。文献[4]提出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，但是依然存在传统DEA方法不能实现完全排序的缺陷，判断矩阵的问题也依然存在。文献[2]提出基于熵权模糊综合评价模型的电力系统黑启动路径评估，该方法增强了模糊性，综合考虑了主客观因素，增强了客观性又不失主观性，但同样不能保证方案的独立性。因此模糊类方法也存在缺陷，需要与其他

关键词/Keywords

电力系统 ·
黑启动 ·
改进DEA/AHP ·
评估 ·

方法综合使用。确定性方法与不确定性方法相结合的方法在黑启动评估中也有应用，文献[11]提出模糊DEA模型的电网黑启动方案评估优化算法，增强了模糊性，但DEA存在的问题依然没有解决。

综上所述，一个实际优秀的黑启动方案评估方法应该包括以下三点：①权重的求取要合理、有说服力；②能保证方案间的独立性；③评估过程能顺利完成。

基于此本文对本课题组原有方法进行改进，提出基于改进DEA/AHP模型用于电力系统黑启动方案评估，该方法简单可靠、实用性强，能满足上述要求。

几种常用排序方法及其缺陷

1. 熵权法评估排序及其缺点

熵权法求取客观权重在电力系统黑启动方案评估中已逐渐被认可。本文作者根据深入的理论研究及其实际工程经验发现，应用熵权法求取客观权重之后会影响各决策单元的相对独立性，当增加、删除决策单元或者改变某一决策单元中的参数时，其他原有决策单元的相对优劣性（独立性）会相应地发生改变，这明显不符合实际工程的要求。本文采用文献[2]所提出的方法进行试验阐述此缺陷，其评价指标与文献[2]中一致，评价指标集如表1所示。

表1 熵权法黑启动评估输入数据表

路径号	电压 转换次数	路径 长度	启动 时间	被启动 机组容量	技术校验 优劣度	启动 优先等级
1	2	64.795 2	2	125	17.707 3	1
2	2	182.374	2	600	10.151 1	2
3	2	381.149	2	600	8.093 66	1
4	2	205.666	2	600	8.322 99	1
5	2	229.383	2	600	12.657 9	2
6	2	102.188	2	666.67	9.084 48	1
7	2	331.542	2	666.67	9.083 6	1
8	2	220.235	2	300	10.260 2	2

根据表1中数据，选择路径1中的技术校验优劣度为因变量，变化区间为[0-50]，步长为0.01，其他数据保持不变。编译C++代码实现本功能，并绘制各方案的综合得分如图1所示。

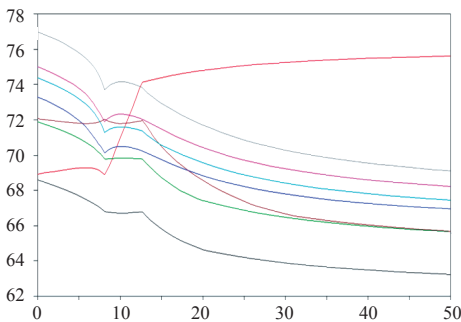


图1 熵权法黑启动方案评估综合得分图

由图1中可明显发现路径5的综合得分曲线与其他路径得分曲线有交点，即方案的独立性受到影响。此现象是由于熵权法求取客观权重的过程中将各个方案相互耦合，以各方案间数据的差异度来衡量客观权重，因此不能保证独立性。

2. 传统DEA及其缺点

数据包络分析（Data Envelopment Analysis, DEA）模型是一种用于评价相对有效性的数学模型。1978年著名运筹学家A.Charnes（查恩斯），W.W.Cooper（库伯）及E.Rhdes（罗兹）首先提出DEA模型，用于评价形同部门间的相对有效性。其中有效性的定义为：对任何一个决策单元，它达到100%的效率是指：①在现有的输入条件下，任何一种输入都无法增加，除非同时降低其他种类的输出；②要达到现有的输出，任何一种输入都无法降低，除非同时增加其他种类的输入。一个决策单元达到了100%的效率，该决策单元就是有效的。DEA是以相对效率为基础，通过数学规划实现各决策单元之间的效率比较，给出每个决策单元是否相对有效。以C²GS²模型为例，C²GS²模型是1985年查恩斯，库伯，格拉尼（B.Golany），赛福德（L.Seiford）和斯图茨（J.Stutz）提出，是DEA的基本模型之一，用于评价多输入、多输出决策单元的相对技术有效性，即“生产”处于最理想状态，在现有输入量的情况下可获得最大输出量，其生产可能集是一个多面凸集。

假设有n个决策单元，每个决策单元都有m个“输入量”（X）以及s个“输出量”（Y），若对第j₀个决策单元进行效率评价（1≤j₀≤n），C²GS²

模型为

$$\begin{cases} \max(\mu^T Y_0 + \mu_0) = V_p \\ \text{s. t. } \omega^T X_j - \mu^T Y_j - \mu_0 \geq 0 \quad (j=1,2,\dots,n) \\ \omega^T X_0 = 1 \\ \omega \geq 0, \mu \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

当效率指标 $V_p = 1$ ，表示第 j_0 个决策单元相对于其他决策单元是有效的，这意味着没有其他任何决策单元或决策单元的线性组合能使用更少投入生产等量的产出，或使用等量投入生产更多产出。

可以看出，DEA方法是由实际的输入和输出的指标值来评价决策单元是否有效，能够给出比较客观的评价，但是，从DEA方法对决策单元的评价结果来看，对于相对无效的决策单元（即 $V_p < 1$ 的决策单元）可以根据 V_p 数值的大小进行排序，但对于有效的决策单元（即 $V_p = 1$ 的决策单元）将不能进行进一步排序，所以如果几个决策单元都相对有效的话，将不能区分它们的相对优劣性，这也是DEA的缺陷所在。而且会出现判断矩阵元素全为1的特殊情况，导致评估不能顺利进行。

3. 传统AHP及其缺陷

层次分析法（Analytic Hierarchy Process, AHP）是美国运筹学家、匹兹堡大学T. L. Saaty教授在20世纪70年代初期提出的，用定量分析的方法来解决定性问题，该方法简便、灵活及实用。它的主要思想是把复杂问题中的各种因素通过划分为相互联系的有序层次，通过两两比较的方式确定本层次中各个元素的相对重要性，然后结合人的主观权重来确定诸因素相对重要性的总排序。一般AHP模型可分为三层，即最高层的目标层、中间层的准则层和最低层的方案层。由顶层依次向下，按照一定的标度理论，两两比较得到判断矩阵，通过计算判断矩阵最大特征值和相应的特征向量得到各层次相对于上一层某一因素重要性的排序，然后由底层向上计算综合重要度即可得到各决策单元的相应排序。其流程如图2所示。

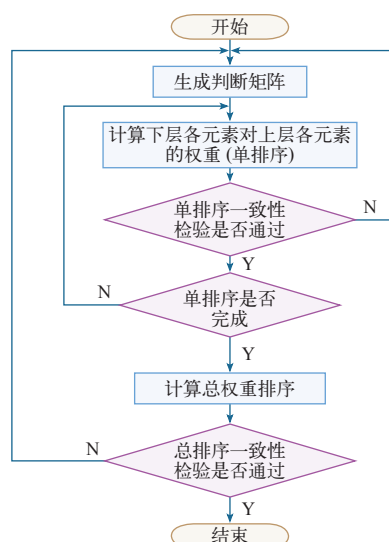


图2 传统AHP模型流程图

AHP实现了各个决策单元的完全排序，但是AHP的判断矩阵是由人为来确定诸因素的相对重要性，引入1~9比率标度方法，将比较判断量化，因而主观性、随意性较强，缺乏客观性，决策者的身份、地位、社会经验及主观偏好不同，可能导致排序结果出处较大。此外，应用层次分析法需要对判断矩阵进行一致性检验，只有满足一致性要求的判断矩阵，用AHP得出的结果才是可靠的。

决策单元的数量增加或减少时，传统AHP排序方法不能保证原有方案的独立性，即原有方案的排序可能会发生变化。

基于改进的DEA/AHP模型

基于上述评估排序方法存在的缺陷，本文提出基于改进DEA/AHP模型用于决策单元的评估排序。该模型把DEA、AHP模型结合起来，实现优势互补，同时对各自的缺陷进行改进。整个评估排序过程可分为两个阶段，即DEA阶段和AHP阶段。首先，筛选最优、最差决策单元加入待评估方案组，接着将 $n+2$ 个决策单元两两分成一组，针对每一决策单元组都根据DEA模型求得相对有效性指数，进而组成相对有效性矩阵即判断矩阵，然后以最优、最差决策单元为参考点应用AHP模型进行各决策单元的完全排序，流程图如

图3所示。

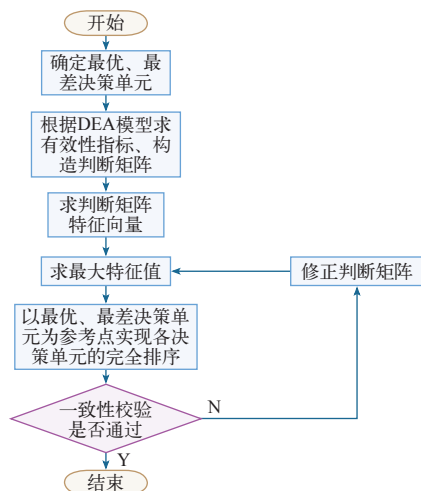


图3 改进DEA/AHP模型流程图

1. DEA模型构造判断矩阵

本文选用DEA的 C^2GS^2 模型，结合本模型效率指标的优化目标（最小化输入指标，最大化输出指标），将各指标分成两类：输入指标 X 和输出指标 Y 。根据指标的类型（效益型、成本型）不同筛选出最优、最差指标组合组成最优和最差决策单元。原来的 n 个决策单元被拓展成 $n+2$ 个决策单元，将它们两两分成一组，共 C_{n+2}^2 组，用DEA方法分别对这些决策单元组进行有效性分析，求解相对有效性指标，每次只考虑当前组两个决策单元而忽略其他的决策单元，根据相对有效性指标即可组成判断矩阵。

对于任意两个决策单元A和B，其优化模型的约束条件也只能有它们本身，根据DEA的 C^2GS^2 模型，决策单元A相对于B的有效性指标计算式如下

$$\begin{cases} \max h_{AB} = \mu^T Y_A + \mu_0 \\ \text{s. t. } \omega^T X_A = 1 \\ \omega^T X_B - \mu^T Y_B - \mu_0 \geq 0 \\ \omega \geq 0, \mu \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

同理，决策单元B相对于A的有效性指标由下式得到

$$\begin{cases} \max h_{BA} = \mu^T Y_B + \mu_0 \\ \text{s. t. } \omega^T X_B = 1 \\ \omega^T X_A - \mu^T Y_A - \mu_0 \geq 0 \\ \omega \geq 0, \mu \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

由式（2）、式（3）可得决策单元A和B的相对效率比 a_{AB} 为

$$a_{AB} = h_{AB} / h_{BA} \quad (4)$$

$$a_{BA} = h_{BA} / h_{AB} = 1 / a_{AB} \quad (5)$$

当 $a_{AB} > 1$ 时表示决策单元A比B更有效， $a_{AB} = 1$ 表示A和B有效性相同， $a_{AB} < 1$ 表示决策单元B比A有效。

任意两个决策单元的相对有效性指标都可以通过式（2）~式（5）计算得到，将这些指标组合成 $(n+2) \times (n+2)$ 的判断矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1,n+2} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2,n+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1,n+2} & 1/a_{2,n+2} & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

由上述形成判断矩阵A的过程可以看出，本文不是直接应用DEA模型对决策单元进行评价，而是将决策单元两两分组，通过求相对有效性指标来构造判断矩阵供后续AHP模型进行排序，因此决策单元个数不受限制。而且本方法回避了争议较大的求取权重的过程，增强了客观性。此外，本文引入了最优、最差决策单元，避免了因所有决策单元的相对有效性都相同而生成判断矩阵元素都为1导致AHP评估无法进行的情况。这也是本方法比传统DEA及其其他组合的优势之一。

2. AHP方法排序

本文方法将要应用于电力系统黑启动方案评估，属于单层排序，单层AHP排序模型如图4所示。

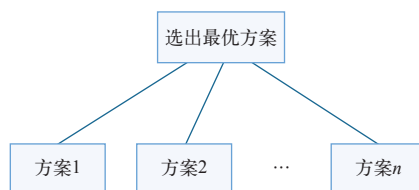


图4 单层次AHP模型

为解决传统AHP增加、删减方案不能保证其他原有方案独立性的问题，文本对传统AHP进行改进，再次将最优、最差决策单元引入决策单元组进行排序。由于当前判断矩阵是由上述改进DEA方法得到的，其中已经包含最优、最差决策单元的信息，因此增减决策单元时能够保证原有

决策单元的独立性。下一步只需要求解判断矩阵的最大特征值及其相应的特征向量，特征向量就是相应的决策单元的权值排序，再删除最优、最差决策单元的权值即得到原有决策单元各自的权重及相应的排序。AHP的判断矩阵是由DEA生成的，因此求出权重之后还需进行一致性检验。

算例分析

本文将改进DEA/AHP模型应用于天津电网黑启动方案评估，致力于最优方案的选取。根据实际工程经验本文选取如表2所示指标集。

表2 用于黑启动方案的评估指标

指标编号	指标内容
1	电压转换次数
2	路径长度
3	启动时间
4	被启动机组容量
5	技术校验优劣程度
6	被启动电源优先等级

根据DEA的C²GS²模型选取输入、输出指标；输入指标主要选取与生产投入量或生产规模有关的指标；输出指标主要选取与生产效益及产出值有关的指标。因此由上述6个指标分解成的输入、输出指标集如表3所示。

表3 黑启动方案评估输入、输出指标

类别	指标	指标内容
输入	输入1	电压转换次数
	输入2	路径长度
	输入3	启动时间
输出	输出1	被启动机组容量
	输出2	技术校验优劣程度
	输出3	被启动电源的优先等级

表3中的输入指标越小启动效果越好；相反，输出指标越大，相应的启动效果越好。被启动电源优先等级是以所带负荷的重要性来划分的，数值越小重要性越高。本文将被启动电源优先等级作为输出指标，因此以其倒数来参加计算。技术校验优劣度是由发电机自励磁指标、工频过电压指标、操作过电压指标（空投新路或变压器过电压）及其电压频率稳定性指标（突加电动机负荷

时电压频率的偏移）归一化之后的结果，其具体归一化标准如表4所示。

表4 黑启动方案技术校验的比较标准

校验计算项目	校验结果比较标准
发电机自励磁	发电机的额定容量/（线路的充电功率×发电机的等值同步电抗）
工频过电压	1/线路末端过电压倍数
操作过电压	1/线路末端过电压倍数
电压稳定性	1/厂用母线电压偏移百分数
频率稳定性	1/系统频率偏移百分数

为证明本文方法的有效性选择与文献[2-3]相同的路径进行评估。黑启动电源一般以水电机组为主，经过改造后具有自启动能力的火电及燃气机组也可作为黑启动电源。目前天津地区没有具备自启动能力的机组，通过改造增设备用发电机（柴油机）后能直接启动，成为黑启动电源。天津滨海电厂主机为燃气轮机，启动速度快，运行于负荷投切时的调节性能均很强，几乎没有最小出力限制，其单次投入负荷可达装机容量的15%，可以满足天津地区任一火电厂的启动要求。因此将其主机设定为黑启动电源是最佳选择，且具有造价低等特点。以滨海电厂为起点，经路径自动生成和相关电气校验，得待评估方案如表5所示。

表5 通过技术校验的黑启动方案

方案	恢复路径
1	滨海电厂→葛潮一线→葛沽→军葛线→老军厂
2	滨海电厂→葛潮一线→葛沽→军葛线→军厂 (7、8机厂用系统送电)
3	滨海电厂→葛潮一线→葛沽→军葛线→老军厂→军厂 (5、6机厂用系统送电)
4	滨海电厂→葛潮一线→葛沽→军葛线→老军厂→军双线→ 双港→热双二线→陈热
5	滨海电厂→葛潮一线→葛沽→军葛线→老军厂→军电线→大港

由上述5个待评价方案及其指标集经过分析计算得评估指标如表6所示。

根据输入指标越小、输出指标越大相对启动效果越好的原则筛选组合最优、最差方案，得修正后加入最优、最差方案的评估指标表如表7所示。

表7中的第6、7条数据分别为最优、最差方案指标。根据式（2）～式（5）可得判断矩阵A为

表6 具体的方案评估指标表

方案	输入			输出		
	1	2	3	1	2	3
1	0	29.90	21	50	15.47	1
2	0	30.18	18	200	15.06	1
3	0	30.18	21	200	15.07	1
4	0	56.65	33	135	5.01	1/4
5	0	60.00	23	330	6.53	1/3

表7 修正后的方案评估指标表

方案	输入			输出		
	1	2	3	1	2	3
1	0	29.90	21	50	15.47	0.5
2	0	30.18	18	200	15.06	1
3	0	30.18	21	200	15.07	1
4	0	56.65	33	135	5.01	0.25
5	0	60.00	23	330	6.53	0.33
6	0	29.90	18	330	15.47	1
7	0	60.0	33	50	5.01	0.25

$$A = \begin{pmatrix} 1.000 & 0.222 & 0.327 & 3.405 & 0.789 & 0.130 & 9.736 \\ 4.505 & 1.000 & 1.169 & 13.764 & 4.665 & 0.600 & 14.578 \\ 3.058 & 0.855 & 1.000 & 11.798 & 3.999 & 0.515 & 12.496 \\ 0.294 & 0.073 & 0.085 & 1.000 & 0.302 & 0.072 & 2.860 \\ 1.267 & 0.214 & 0.250 & 3.311 & 1.000 & 0.129 & 9.470 \\ 7.692 & 1.666 & 1.943 & 13.893 & 7.770 & 1.000 & 24.279 \\ 0.103 & 0.069 & 0.080 & 0.350 & 0.106 & 0.041 & 1.000 \end{pmatrix}$$

根据判断矩阵A应用AHP模型对方案进行完全排序，求得判断矩阵A的最大特征值 $\lambda_{\max} = 7.24$ ，相对应的归一化之后的特征向量为

$$V_{\max} = \begin{pmatrix} 0.0678 & 0.2448 & 0.2033 & 0.0223 & 0.0681 \\ & & & & & & 0.3820 & 0.0117 \end{pmatrix}$$

$V_{\max}$ 中第6、第7个数据为最优、最差方案的相应权重，由这7个数据明显可以看出最优方案的权重最大，而最差方案的权重最小，在一定程度上说明本方法的正确性。除去这两个数据即为待评估方案的对应权重，如表8所示。

表8 方案的权重

方案	1	2	3	4	6
权重	0.0678	0.2448	0.2033	0.0223	0.0681

对判断矩阵A进行一致性校验，其中 $C.I. =$

0.04，平均随机指标 $R.I. = 1.339$ ， $C.R. = 0.0303 < 0.10$ ，因此判断矩阵A满足一致性要求。

由表8可知，方案2的权重最大为最优路径，其路径较短不易发生合闸操作过电压和自励磁；无电压转化；被启动机组启动时间短且容量相对较大，启动过程中电压频率偏移较小。因此评估结果与实际情况及专家意见相符合，证明了本文方法的正确性。

为进一步说明本文方法的正确性，现将本文方法排序结果与传统DEA/AHP方法、传统DEA及其熵权模糊综合评价模型的排序结果对比，如表9所示。

表9 排序结果对比

决策单元	改进DEA/AHP	DEA/AHP	DEA	熵权模糊
1	4	3	1	3
2	1	1	1	1
3	2	2	1	2
4	5	4	2	5
5	3	3	1	4

由表9可以看出，本文方法排序结果与上述三种方法的排序结果基本一致。与传统DEA/AHP及DEA方法相比本文方法实现了完全排序，且不会出现各方案相对有效性相同而导致的判断矩阵全为1的不能排序的情况。与熵权模糊模型相比，最优、次优即最差方案的排序相同，由本文方法的权重值及熵权模糊模型的综合得分值可以看出，方案1与方案5的权重及综合得分基本相等，因此本文方法与熵权模糊模型并不冲突。

结束语

本文提出基于改进DEA/AHP模型应用于电力系统黑启动方案评估排序中，本方法具有如下特点：

- 1) 在待评估方案中插入最优、最差方案，应用DEA模型进行方案之间的比较时不会出现相对有效性全相同而导致的判断矩阵全为1的情况。
- 2) 应用AHP进行排序时由于判断矩阵不会全为1，因此能正常进行完全排序。
- 3) 本方法应用DEA模型生成判断矩阵及其AHP排序过程中均以最优、最差方案为参照，因

此不会出现熵权法不能保证方案独立性的问题。

4) 应用DEA模型避免了求权重的过程, 只以输出最大为目标函数, 增强了客观性。

参考文献

- [1] 高远望, 顾雪平, 刘艳, 等. 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.
- [2] 林济铿, 李童飞, 等. 基于熵权模糊综合评价模型的电力系统黑启动路径评估 [J]. 电力系统自动化.
- [3] 蒋越梅. 电力系统黑启动的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [4] 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, 94.
- [5] 陈立伟. 电力系统黑启动方案的模糊综合评判 [D]. 保定: 华北电力大学, 2006.

- [6] 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 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (15): 65-69, 110.
- [7] 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.
- [8] 张志毅, 陈允平. 基于模糊多属性决策的黑启动方案优选 [J]. 高电压技术, 2007, 33 (3): 42-45, 52.
- [9] 高远望. 黑启动决策支持系统中启动方案的自动生成和评估 [D]. 保定: 华北电力大学, 2004.
- [10] 倪静. 基于TOPSIS法的黑启动决策方法 [J]. 广东电力, 2009, 22 (12): 8-11, 15.
- [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 (6): 26-33.

(收稿日期: 2014-10-10) **EA**

(上接第93页)

参考文献

- [1] 操敦奎, 许维宗, 阮国方. 变压器运行维护与故障分析处理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 国家电网公司. 输变电设备在线监测信息报警规则 (试行) [S].
- [3] IEEE Standard C. 57. 91-1995 IEEE guide for loading mineral-oil-immersed power transformers [S].
- [4] Lesieutre B, Hagman W, Kirtley J. An improved transformer top oil temperature model for use in an on-line monitoring and diagnostic system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12 (1): 249-256.
- [5] Tylavsky D J, He Q, Si J, et al. Transformer top-oil temperature modeling and simulation [J]. IEEE Transaction on Industry Application, 2000, 36 (5): 1219-1225.
- [6] 陈伟根, 苏小平, 陈曦, 等. 变压器顶层油温预测热模型影响因素分析及其改进 [J]. 高电压技术, 2011, 37 (6): 1329-1335.

- [7] He Q, Si J, Tylavsky D J. Prediction of top-oil temperature for transformers using neural networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15 (4): 1205-1211.
- [8] 熊浩, 陈伟根, 杜林, 等. 基于T-S模型的电力变压器顶层油温预测研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (30): 15-18.
- [9] 王永强, 岳国良, 何杰, 等. 基于Kalman滤波算法的电力变压器顶层油温预测研究 [J]. 高压电器, 2014, 50 (8): 74-79.
- [10] 孙秋芹, 周志成, 赵科, 等. 变压器综合试验系统的设计与实现 [J]. 江苏电机工程, 2014, 33 (3): 56-58.
- [11] 王峰, 王春宁. 基于辨识模型的变压器故障诊断方法研究 [J]. 江苏电机工程, 2014, 33 (1): 26-29.
- [12] 黎灿兵, 李晓辉, 赵瑞, 等. 电力短期负荷预测相似日选取算法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (9): 69-73.

(收稿日期: 2015-02-05) **EA**