

# 基于 SE-DEA 模型的扩展黑启动方案恢复相对效率研究

王大江<sup>1</sup>, 顾雪平<sup>1</sup>, 贾京华<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 河北电力调度通信中心, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 针对扩展黑启动方案的恢复相对效率研究, 提出了一种基于超效率数据包络分析模型的评估方法。首先, 介绍了数据包络分析模型基本理论; 然后, 根据扩展黑启动同时启动多台机组形成规模更大系统的具体实际, 构建了涵盖恢复时间、机组恢复效果、网络结构性能等反映恢复过程中多要素的评估指标, 在此基础上以超效率数据包络分析模型评估其相对效率。以实际电网的扩展黑启动方案作为分析算例, 计算结果验证了所提出的基于超效率数据包络分析模型评估方法能够对扩展黑启动方案恢复相对效率做出客观有效的评价。

**关键词:** 停电; 黑启动; 扩展黑启动; 效率; 评估; 数据包络分析; 评估指标

**中图分类号:** TM 76

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.02.010

## 0 引言

大停电后快速有序的恢复是减小停电损失的有效措施, 在现代电力系统规模日益扩大、结构越来越坚强, 已经进入以智能化为主要特征的第三代电网的背景下<sup>[1]</sup>, 各种故障仍有可能发生, 自然灾害亦是电网安全稳定运行面临的威胁, 灾难性事故仍无法完全避免, 近期发生的多起大停电事故及其恢复过程再次提供了实例<sup>[2-3]</sup>。大停电后的恢复过程是一个复杂的控制决策问题, 根据恢复过程中不同时期的任务, 通常分为黑启动、网架重构和负荷恢复 3 个阶段, 黑启动阶段是恢复的初始阶段, 是后续恢复的基础和前提。

国外学者从 20 世纪 80 年代开始对恢复问题进行了研究, 随后国内外众多学者对黑启动问题进行了深入研究, 取得了卓有成效的成果, 主要包括黑启动方案制定的原则及框架<sup>[4-7]</sup>、黑启动阶段相关技术问题仿真分析<sup>[8-12]</sup>、黑启动方案优化及评估决策<sup>[13-15]</sup>; 国内多数电网公司根据各自电网结构和电源分布特点制定了相应的黑启动预案及进行了部分实际黑启动试验<sup>[16-20]</sup>; 文献[21]首次提出了以黑启动电源同时启动多个被启动机组的扩展黑启动恢复策略, 突破了常规启动策略启动 1 台机组的思路限制; 文献[22]进一步对考虑后续恢复影响的扩展黑启动方案进行优化决策。在黑启动阶段同时启动多台机组可为后续恢复提供更大功率支持, 加快恢复进程, 为大停

电后的恢复提供了一种新思路, 对扩展黑启动方案恢复效率评估具有重要意义, 能够为优选综合效率高的恢复方案提供科学依据。

数据包络分析 DEA(Data Envelopment Analysis) 是一种重要的非参数生产单元相对效率测度方法, 由于具有评估结果客观等众多优点而得到较广泛应用<sup>[23-26]</sup>, 现有的研究中多数采用数据包络分析的基本模型, 局限性是无法对有效的决策单元进一步排序。为克服该不足, 专家进行了有益的改进<sup>[27-29]</sup>, 文献[27-28]将数据包络分析与层次分析法相结合, 充分发挥了 2 种方法的优点, 但文献[27]在构造判断矩阵时受专家主观偏好因素制约, 评估准则权重客观性相对不足, 影响方案最终排序结果; 文献[28]由数据包络分析计算结果构造的判断矩阵会出现元素全为 1 的情况而无法对方案排序; 文献[29]引入最优与最差 2 个虚拟方案, 建立改进后的数据包络分析模型, 但采用改进后模型计算出的公共权重受约束条件中非阿基米德无穷小量  $\varepsilon$  取值的影响, 会得出不同的排序结果。

本文提出了基于改进后的超效率数据包络分析 SE-DEA(Super Efficiency DEA)模型的扩展黑启动方案恢复相对效率评估方法, 首先构建了反映其恢复过程中多种要素的输入、输出指标, 在此基础上采用超效率数据包络分析模型对扩展黑启动方案相对效率进行测度, 最后河北南网实际电网的应用验证了所提指标的合理性和方法的有效性。

## 1 数据包络分析模型原理

### 1.1 CCR 模型

数据包络分析模型是由著名运筹学家 Charnes、Copper、Rhodes 等在 1978 年提出的一种重要的效率评价方法<sup>[30]</sup>, 将工程效率的概念推广到多输入多输出系统的相对效率评价中, 评价依据决策单元实际的

收稿日期: 2014-05-20; 修回日期: 2014-12-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277076); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110036110007); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(13XS23)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277076), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(20110036110007) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(13XS23)

输入和输出,避免了主观因素的影响,采用数学规划原理评估决策单元的相对效率,随后得到迅速发展和广泛应用。

第一个重要的数据包络分析模型是 CCR (Charnes-Copper-Rhodes)模型,假设有  $n$  个决策单元,每个决策单元  $D_j$  有  $m$  项输入和  $s$  项输出,即  $X_j$  和  $Y_j$ ,在满足平凡性、凸性、锥性、无效性和最小性公理体系条件下的生产可能集为:

$$T = \left\{ (X, Y) \mid \sum_{j=1}^n X_j \lambda_j \leq X, \sum_{j=1}^n Y_j \lambda_j \geq Y, \lambda_j \geq 0, j=1, 2, \dots, n \right\} \quad (1)$$

在上述生产可能集中,对于某一决策单元  $D_k$ ,评价其相对效率的输入型 CCR 模型可用如下线性规划模型表示:

$$\begin{aligned} \min \quad & \theta \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq \theta x_{ik} \quad i=1, 2, \dots, m \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq y_{rk} \quad r=1, 2, \dots, s \\ & \lambda_j \geq 0 \quad j=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $\theta$  为被评价单元  $D_k$  的相对效率值;  $\lambda_j$  为输入、输出指标的权重系数;  $x_{ij}$  和  $y_{rj}$  分别为  $D_j$  中第  $i$  个输入量和第  $r$  个输出量;  $x_{ik}$  和  $y_{rk}$  分别为  $D_k$  中第  $i$  个输入量和第  $r$  个输出量。

引入松弛变量  $s_i^-, s_r^+$  和非阿基米德无穷小量  $\varepsilon$  (一般取  $10^{-6}$ )后,模型(2)的对偶规划形式如式(3)所示。

$$\begin{aligned} \min \quad & \theta - \varepsilon \left( \sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+ \right) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = \theta x_{ik} \quad i=1, 2, \dots, m \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{rk} \quad r=1, 2, \dots, s \\ & \lambda_j \geq 0 \quad j=1, 2, \dots, n \\ & s_i^- \geq 0 \quad i=1, 2, \dots, m \\ & s_r^+ \geq 0 \quad r=1, 2, \dots, s \end{aligned} \quad (3)$$

模型(3)是用来评价决策单元总体效率的,当  $\theta=1$  且  $s_i^- = s_r^+ = 0$  时,表示决策单元  $D_k$  为有效决策单元;当  $\theta=1$  且  $s_i^- \neq 0$  或  $s_r^+ \neq 0$  时,表示  $D_k$  为弱有效决策单元;当  $\theta < 1$  时,表示  $D_k$  为非有效决策单元。该模型能够有效地判断决策单元是否有效。

### 1.2 超效率 CCR 模型

在利用 CCR 模型计算决策单元相对效率时,得到的有效决策单元效率值都为 1,而有效决策单元往往不止 1 个,因而无法对有效的决策单元之间进一步详细地区分效率高低。为了克服基本 CCR 模型出现的不足,Andersen、Petersen 在 1993 年提出了一种

改进的方法,称为超效率模型,输入型超效率 CCR 模型可表示为:

$$\begin{aligned} \min \quad & \theta - \varepsilon \left( \sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+ \right) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = \theta x_{ik} \quad i=1, 2, \dots, m \\ & \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{rk} \quad r=1, 2, \dots, s \\ & \lambda_j \geq 0 \quad j=1, 2, \dots, n \\ & s_i^- \geq 0 \quad i=1, 2, \dots, m \\ & s_r^+ \geq 0 \quad r=1, 2, \dots, s \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中数学变量含义与式(3)中的含义相同,对比两式可知,超效率 CCR 模型与基本 CCR 模型的区别在于被测单元  $D_k$  被从参考集内移去,  $D_k$  与其他所有决策单元的线性组合进行比较,有效决策单元效率计算结果可能超过 1,故称之为超效率模型,而对于非有效决策单元,效率计算结果与基本 CCR 模型相同。

通过图 1 可直观说明该模型,图中有 4 个决策单元,分别为 A、B、C、D,设每个决策单元有 2 个输入指标和 1 个输出指标,输入指标分别为(1,4)、(2,2)、(5,1.5)、(3,3),为方便起见,输出指标设为 1。由 AB 线段和 BC 线段组成有效前沿面,决策单元 A、B、C 为有效单元,D 为非有效单元,A、B、C 以各自为参考点,相对效率值均为 1,把 B 从参考集中移去,新的前沿面由 AC 虚线所组成,B 点与参考集中其他单元比较,B' 成为 B 的新参考点,得到 B 的相对效率值为 1.42,对 A、C 决策单元采用同样方法求出对其他决策单元的相对效率值分别为 2 和 1.33,对无效决策单元 D,超效率评价价值不变,为 0.667,则可实现对所有决策单元的排序,结果为  $A > B > C > D$ 。

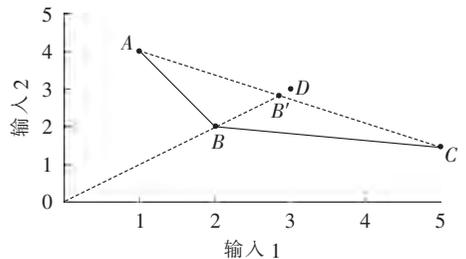


图 1 超效率 CCR 模型图解  
Fig.1 Diagram of SE-CCR model

## 2 扩展黑启动方案恢复相对效率评估

### 2.1 评估指标的构建

扩展黑启动方案的制定包含启动电源的选择、被启动机组的确定及其启动顺序优化、为被启动机组提供启动功率的充电路径的优化等问题,是一项复杂的系统优化决策问题,而采用超效率数据包络分析模型评估已制定的扩展黑启动方案恢复相对效率时,

首先要建立科学合理的评估指标,在遵循制定指标的系统性、科学性、适用性等基本准则下,从黑启动方案制定的基本原则出发<sup>[23]</sup>,结合扩展黑启动恢复过程中的具体实际特点,借鉴已有的研究成果<sup>[15]</sup>,建立的评估指标如表 1 所示。

表 1 各项评估指标  
Table 1 Assessment indexes

类别	指标符号	指标内容
输入	$R$	路径恢复代价
	$P_{cr}$	机组启动功率
	$T_s$	恢复总时间
输出	$G$	机组恢复效果
	$N_{im}$	网络重要度

## 2.2 指标的定义

a. 机组恢复的充电路径由相对长度较长、不同电压等级的线路所组成,由于线路对地电容产生的大量无功功率及开关的合闸操作,可能会引起工频过电压、操作过电压及黑启动电源自励磁等问题,而充电功率的大小与线路对地电容正相关,路径中经过变压器变换电压次数的增多会增加三相不同期合闸和变压器发生铁磁谐振的概率,因此可用充电路径线路电纳及电压转换次数表示路径恢复代价指标  $R$ ,计算公式为:

$$R = \sum_{l=1}^L B_l + \alpha T_s \quad (5)$$

其中,  $L$  为恢复路径中线路条数;  $B_l$  为线路  $l$  折算到同一电压等级下的线路电纳;  $T_s$  为路径中电压转换次数;  $\alpha$  为转换系数。

b. 机组启动功率指标  $P_{cr}$  为各台被启动机组恢复时由各种辅机组成的厂用电系统消耗的功率之和。

c. 恢复总时间指标  $T_s$  是由黑启动电源经充电路径为被恢复机组提供启动功率开始到所有机组全部启动成功后并网经历的时间。

d. 黑启动阶段恢复的机组容量越大、机组升负荷率越大,能够为后续恢复以更短的时间提供更多功率支持,重要负荷周围的机组启动同样有利于后续恢复,因此机组恢复效果指标从机组特性、对后续恢复的影响等方面考虑,将其定义为:

$$G = \sum_{g=1}^{N_G} (P_{N_g} + \beta P_{K_g}) w_g \quad (6)$$

其中,  $N_G$  为恢复的机组数;  $P_{N_g}$  为机组  $g$  的额定功率;  $P_{K_g}$  为机组  $g$  的升负荷率;  $\beta$  为转换系数;  $w_g$  为机组  $g$  的优先级,由其周围的负荷重要程度决定。

e. 黑启动阶段形成的局部小网络是后续恢复的基础,不同方案形成的小网络拓扑位置不完全相同,定义网络重要度指标反映局部小网络的重要程度,从网络拓扑连通性角度计算该指标。设恢复的小网络中节点数为  $N$ ,  $w_{ij}$  为节点  $i$  与  $j$  之间直接相连线路

的权值(本文取折算到同一电压等级下的电抗),与节点  $i$  直接相连的线路个数为  $N_i$ ,  $l_{ih}$  为节点  $i$  到节点  $h$  间最短路径的权值,将节点  $i$  的重要度定义为:

$$I_i = \left( \sum_{j=1}^N \frac{1}{w_{ij}} \right) / \left( \frac{1}{N} \sum_{h=1, h \neq i}^N l_{ih} \right) \quad (7)$$

则局部小网络的网络重要度为:

$$N_{im} = \sum_{i=1}^N I_i \quad (8)$$

## 2.3 扩展黑启动方案相对效率评估步骤

综合上述超效率数据包络分析模型和评估指标,扩展黑启动方案恢复相对效率评估步骤如下:

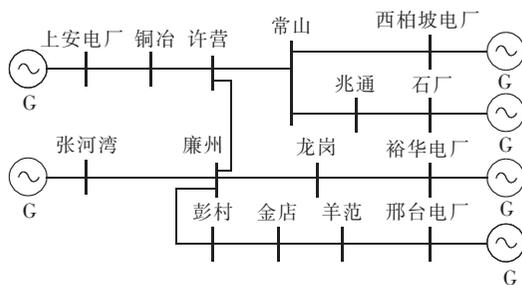
- 建立适用于方案相对效率评估的指标;
- 确定多个可行的待评估扩展黑启动方案;
- 根据各方案恢复的局部小网络及机组参数,计算得到评估指标;

d. 以超效率数据包络分析模型对每一个待评估方案建立规划方程,并求解得到各方案的恢复相对效率。

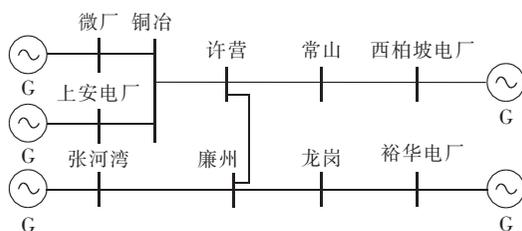
## 3 算例分析

### 3.1 算例描述

将上述评估方法应用于河北南网实际电网中,以其扩展黑启动方案作为研究实例,河北南网以张河湾抽水蓄能电站为启动电源,其装机容量为  $4 \times 250$  MW,通过技术校验合格可行的 2 套扩展黑启动方案恢复形成的局部网络如图 2 所示,分别以 KD1、KD2 表示其方案号,转换系数  $\alpha$  取 0.5,  $\beta$  取 1。



(a) 扩展黑启动方案 1(KD1)



(b) 扩展黑启动方案 2(KD2)

图 2 河北南网扩展黑启动方案的网络结构

Fig.2 Network structure of extended black-start restoration plans for Hebei Southern Grid

启动 1 台机组的常规黑启动策略作为扩展黑启动策略的一种特例,为了比较 2 种恢复方式效率的差

异性,将常规黑启动方案纳入评估方案集中,常规黑启动方案如表 2 所示。

表 2 常规黑启动方案列表  
Table 2 Conventional black-start plans

方案	启动电源	恢复过程	启动机组
D1	张河湾电站	张廉线、廉州站、廉许线、许营站、许常线、常山站、西常二线	西柏坡电厂
D2	张河湾电站	张廉线、廉州站、廉许线、许营站、铜许线、铜冶站、安铜线	上安电厂
D3	张河湾电站	张廉线、廉州站、廉龙线、龙岗站、龙裕线	裕华电厂
D4	张河湾电站	张廉线、廉州站、廉许线、许营站、许常线、常山站、常兆线、兆通站、兆石二线	石厂
D5	张河湾电站	张廉线、廉州站、廉彭线、彭村站、彭金线、金店站、金羊线、羊范站、羊邢线	邢台电厂

根据河北南网电网的实际数据,通过计算分析得到各方案的输入、输出指标值,如表 3 所示。

表 3 各恢复方案的输入、输出指标值  
Table 3 Value of input and output indexes for different restoration plans

方案	输入指标			输出指标	
	R	$P_{cr}/MW$	$T_s/min$	G	$N_{im}$
KD1	2.81	87.5	56	8240	1.78
KD2	1.48	65	56	5490	1.76
D1	1.32	30	49	3040	1.42
D2	1.33	17.5	48	1880	1.27
D3	1.3	15	51	500	0.69
D4	1.33	15	56	900	1.38
D5	2.06	15	55	1920	0.67

### 3.2 计算结果

按照上述超效率数据包络分析 CCR 模型(4),以表 3 中的输入、输出指标数据分别对各个待评估方案建立评估模型,以方案 KD1 为例,具体模型如式(9)所示。

$$\begin{cases}
 \min[\theta - \varepsilon(s_1^- + s_2^- + s_3^- + s_1^+ + s_2^+)] \\
 1.48\lambda_2 + 1.32\lambda_3 + 1.33\lambda_4 + 1.3\lambda_5 + 1.33\lambda_6 + \\
 2.06\lambda_7 + s_1^- = 2.81\theta \\
 65\lambda_2 + 30\lambda_3 + 17.5\lambda_4 + 15\lambda_5 + 15\lambda_6 + 15\lambda_7 + s_2^- = 87.5\theta \\
 56\lambda_2 + 49\lambda_3 + 48\lambda_4 + 51\lambda_5 + 56\lambda_6 + 55\lambda_7 + s_3^- = 56\theta \\
 5490\lambda_2 + 3040\lambda_3 + 1880\lambda_4 + 500\lambda_5 + 900\lambda_6 + \\
 1920\lambda_7 - s_1^+ = 8240 \\
 1.76\lambda_2 + 1.42\lambda_3 + 1.27\lambda_4 + 0.69\lambda_5 + 1.38\lambda_6 + \\
 0.67\lambda_7 - s_2^+ = 1.78 \\
 \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7 \geq 0 \\
 s_1^-, s_2^-, s_3^-, s_1^+, s_2^+ \geq 0
 \end{cases} \quad (9)$$

利用数学规划软件求解得到方案 KD1 相对效率  $\theta=1.5$ ,求解所有评估方案的规划模型得到各自相对效率,如表 4 所示。各方案基本 CCR 模型效率计算结果见表 4 中第 2 列,采用文献[29]中改进数据包络分析模型在  $\varepsilon$  分别取 0.000 1 和 0.000 04 时的

表 4 各恢复方案的相对效率评估结果

Table 4 Relative efficiency evaluated by different methods for different restoration plans

方案	基本 CCR 效率值	SE-DEA 效率值	改进 DEA 效率值 1	改进 DEA 效率值 2
KD1	1	1.5	0.824	0.329
KD2	1	1.4	0.556	0.274
D1	1	1.07	0.358	0.261
D2	1	1.168	0.228	0.214
D3	0.53	0.53	0.057	0.059
D4	1	1.267	0.094	0.099
D5	1	1.19	0.204	0.215

计算结果见表 4 中第 4、5 列。

从表 4 可以看出,基本 CCR 模型计算结果中有多个相对效率值为 1 的有效方案而无法对有效方案进一步排序,对于有效的方案,可根据其超效率模型评价进一步区分优劣;文献[29]中改进数据包络分析模型也可对有效方案进一步排序,但计算出的方案效率值受  $\varepsilon$  取值的影响, $\varepsilon$  取不同值时,同一方案效率值不同,方案排序结果不同。因此,超效率数据包络分析模型评价更具客观性和参考性,具有更大应用优势。

在算例中,方案 KD1 启动 5 台机组,启动机组数最多,形成的局部小网络规模较其他方案大,其路径指标、启动功率指标相对最大,但其机组恢复效果、网络重要度指标最好,故其相对效率最高;方案 KD2 启动 4 台机组,其相对效率次之;扩展黑启动方案 KD1、KD2 的恢复相对效率均高于常规黑启动方案 D1—D5 的恢复相对效率。通过分析可知评估结果与实际相符合、客观合理,扩展黑启动是对常规黑启动的合理有效扩展。

### 4 结论

本文结合黑启动方案制定的基本原则与扩展黑启动恢复过程的具体实际问题,建立了适用于扩展黑启动方案相对效率评估的输入、输出指标,采用超效率数据包络分析模型对扩展黑启动方案恢复相对效率进行评估,评估结果客观合理,可为恢复方案制定决策提供多角度的参考依据,河北南网扩展黑启动方案的实例计算结果验证了所提指标的合理性和评估方法的有效性,该方法理论清晰,结果直观,同样可为电力系统中其他方面的效率评估问题提供参考。

### 参考文献:

[1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望——试论三代电网[J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):1-11.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang. Review and prospect for power system development and related technologies: a concept of three-generation power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 1-11.

- [2] 汤涌,卜广全,易俊. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):167-174.  
TANG Yong,BU Guangquan,YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian Power Grid on July 30 and 31,2012 [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(25):167-174.
- [3] 毛安家,张戈力,吕跃春,等. 2011年9月8日美墨大停电事故的分析及其对我国电力调度运行管理的启示[J]. 电网技术,2012,36(4):74-78.  
MAO Anjia,ZHANG Geli,LÜ Yuechun,et al. Analysis on large-scale blackout occurred in South America and North Mexico interconnected power grid on Sept. 8,2011 and lessons for electric power dispatching in China[J]. Power System Technology, 2012,36(4):74-78.
- [4] ADIBI M M,FINK L H. Power system restoration planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1994,9(1):22-28.
- [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] 刘强,石立宝,周明,等. 现代电力系统恢复控制研究综述[J]. 电力自动化设备,2007,27(11):104-110.  
LIU Qiang,SHI Libao,ZHOU Ming,et al. Survey of power system restoration control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007,27(11):104-110.
- [8] GOMES R,CARLOS A,GUARINI A. Guidelines for power system restoration in the Brazilian system[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2004,19(2):1159-1164.
- [9] 李鹏源,马静. 基于反相传播神经网络的黑启动三相合闸统计过电压快速预测[J]. 华北电力大学学报,2012,39(5):6-11.  
LI Pengyuan,MA Jing. Fast forecasting of statistical no-load switching overvoltages in black start process based on back propagation artificial neural networks[J]. Journal of North China Electric Power University,2012,39(5):6-11.
- [10] 何宝灵,刘玉田,王洪涛,等. 利用抽水蓄能黑启动大型火电机组辅机的频率估计[J]. 电力自动化设备,2008,28(5):68-71.  
HE Baoling,LIU Yutian,WANG Hongtao,et al. Frequency estimation of power plant black start by pumped storage unit[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(5):68-71.
- [11] FUNAKOSHI T,FURUKAWA K. Transformer over voltage problems and countermeasures at black start[C]//Proceedings of IEEE PES General Meeting. Toronto,Canada;IEEE Power Engineering Society,2003:581-588.
- [12] 张文峰,苏宇,王宁,等. 大型火电 FCB 机组空充 500 kV 线路试验研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):168-173.  
ZHANG Wenfeng,SU Yu,WANG Ning,et al. Research of 500 kV unload line energization by large-scale thermal FCB unit[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(11):168-173.
- [13] 刘崇茹,吴旻昊,熊岑,等. 电力系统恢复决策优化模型与求解[J]. 中国电机工程学报,2014,34(25):4402-4408.  
LIU Chongru,WU Minhao,XIONG Cen,et al. Optimization model and solving algorithm for restoration strategy [J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(25):4402-4408.
- [14] 黎黎明,李大虎,孙建波,等. 结合状态削减技术的电力系统黑启动动态规划算法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(25):4409-4419.  
LI Jiaming,LI Dahu,SUN Jianbo,et al. State reduction combined dynamic programming algorithm for power system black start plans[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(25):4409-4419.
- [15] 王宏,林振智,文福拴,等. 基于区间数的黑启动决策方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(11):26-32.  
WANG Hong,LIN Zhenzhi,WEN Fushuan,et al. A black-start decision-making method based on interval values[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(11):26-32.
- [16] 杨可,刘俊勇,贺星棋,等. 四川电网黑启动恢复控制研究及试验(一)指导原则及电压控制[J]. 电力自动化设备,2010,30(6):100-104.  
YANG Ke,LIU Junyong,HE Xingqi,et al. Research and experiment of restoration control during Sichuan Power Grid black-start(1):guiding principles and voltage control[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(6):100-104.
- [17] 杨可,刘俊勇,贺星棋,等. 四川电网黑启动恢复控制研究及试验(二)频率、并网控制及二次设备配置[J]. 电力自动化设备,2010,30(7):34-39.  
YANG Ke,LIU Junyong,HE Xingqi,et al. Research and experiment of restoration control during Sichuan Power Grid black-start(2):frequency,paralleling-in control and secondary equipment configuration [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(7):34-39.
- [18] 逯怀东,郭志红,王辉,等. 基于 500 kV 网架的电网黑启动试验分析[J]. 电网技术,2013,37(7):1895-1901.  
LU Huaidong,GUO Zhihong,WANG Hui,et al. Power system black start analysis based on 500 kV power grid [J]. Power System Technology,2013,37(7):1895-1901.
- [19] 孟宪朋,么莉,林济铨,等. 天津电网黑启动方案[J]. 电力自动化设备,2010,30(6):108-112.  
MENG Xianpeng,YAO Li,LIN Jikeng,et al. Black start up schemes for Tianjin Power Grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(6):108-112.
- [20] 王洪涛,袁森,邱夕照,等. 遵循 PDCA 循环的山东电网黑启动试验[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):145-149.  
WANG Hongtao,YUAN Sen,QIU Xizhao,et al. PDCA-based experiment of Shandong Power Grid black-start [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2):145-149.
- [21] 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.
- [22] 陈亮,顾雪平,贾京华. 考虑后续恢复影响的扩展黑启动方案多目标优化与决策[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):137-143,150.  
CHEN Liang,GU Xueping,JIA Jinghua. Multi-objective optimization and decision making of extended black-start scheme considering subsequent restoration influence [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):137-143,150.
- [23] 吴焯,房鑫炎. 基于模糊 DEA 模型的电网黑启动方案评估优化算法[J]. 电工技术学报,2008,23(8):101-106.  
WU Ye,FANG Xinyan. Data envelopment analysis based optimal fuzzy algorithm for assessing power grid black-start plans [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2008,

- 23(8):101-106.
- [24] LO F Y, CHIEN C F, LIN J T. A DEA study to evaluate the relative efficiency and investigate the district reorganization of the Taiwan Power Company[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(1): 170-178.
- [25] 帅颖, 刘俊勇, 秦毓毅. 基于 DEA 的发电企业综合效率评价[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(2): 73-81.
- SHUAI Ying, LIU Junyong, QIN Yuyi. DEA-based synthetical efficiency evaluation of power generation enterprise[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(2): 73-81.
- [26] 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.
- LIU Yan, GU Xueping, ZHANG Dan. Data envelopment analysis based relative effectiveness assessment of power system black-start plans[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 32-37.
- [27] 刘艳, 顾雪平. 评估黑启动方案的层次化数据包络分析方法[J]. 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[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 33-38.
- [28] 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): 65-70.
- LIN Jikeng, JIANG Yuemei, YUE Shunmin, et al. Assessment of effective schemes for power system black start based on DEA/AHP[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 65-70.
- [29] 沙峰, 杨建彪, 艾欣, 等. 基于改进数据包络分析模型的黑启动方案评估[J]. 中国电力, 2013, 46(2): 50-54.
- SHA Feng, YANG Jianbiao, AI Xin, et al. Assessment of black start plans based on improved data envelopment analysis model[J]. Electric Power, 2013, 46(2): 50-54.
- [30] 马占新. 数据包络分析模型与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 21-26.

#### 作者简介:



王大江

王大江(1984—),男,河南郑州人,博士研究生,主要研究方向为电力系统安全防御和系统恢复(E-mail:wangdj1983@163.com);

顾雪平(1964—),男,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统安全防御和系统恢复、电力系统安全稳定评估与控制、智能技术在电力系统中的应用;

贾京华(1963—),男,河北石家庄人,高级工程师,主要从事电网运行方式技术的管理工作。

## Relative efficiency of extended black-start restoration plans based on super efficiency data envelopment analysis model

WANG Dajiang<sup>1</sup>, GU Xueping<sup>1</sup>, JIA Jinghua<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Hebei Electric Power Dispatching and Communication Center, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** An assessment method based on the SE-DEA(Super Efficiency Data Envelopment Analysis) model is proposed to investigate the relative efficiency of extended black-start restoration plan. The basic theory of DEA model is introduced and multiple assessment indexes are constructed according to the simultaneous restart of multiple units in extended black-start to reflect the multiple factors of restoration process, such as restoration time, unit restoration, network structure and so on, based on which, the SE-DEA model is adopted to evaluate its relative efficiency. As an example, an actual extended black-start restoration plan is evaluated by the proposed method and results demonstrate that it evaluates the relative efficiency of extended black-start restoration plan objectively and effectively.

**Key words:** outages; black-start; extended black-start; efficiency; assessment; data envelopment analysis; assessment index