

4-16-2021

## Evaluation method of blackstart scheme with VSCHVDC considering aftereffects

Xufei LIU

*Yunnan Electric Power Dispatching and Control Center, Yunnan Power Grid Co.,Ltd., Kunming 650011 , China*

Chen WU

*Yunnan Electric Power Dispatching and Control Center, Yunnan Power Grid Co.,Ltd., Kunming 650011 , China*

Dan ZHANG

*Yunnan Electric Power Dispatching and Control Center, Yunnan Power Grid Co.,Ltd., Kunming 650011 , China*

Wei HUANG

*Yunnan Electric Power Dispatching and Control Center, Yunnan Power Grid Co.,Ltd., Kunming 650011 , China*

Pengfei LI

*School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003 , China*

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

---

### Recommended Citation

LIU, Xufei; WU, Chen; ZHANG, Dan; HUANG, Wei; and LI, Pengfei (2021) "Evaluation method of blackstart scheme with VSCHVDC considering aftereffects," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 35: Iss. 6, Article 14.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.06.014

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss6/14>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

# 考虑后效性的柔性直流输电 黑启动方案评估方法

刘旭斐<sup>1</sup>, 吴琛<sup>1</sup>, 张丹<sup>1</sup>, 黄伟<sup>1</sup>, 李鹏飞<sup>2</sup>

(1. 云南电网有限责任公司云南电力调度控制中心, 云南 昆明 650011; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 柔性直流输电黑启动能很好地维持换流母线的电压稳定, 并有效抑制可能出现的过电压问题, 在此背景下, 提出一种考虑后效性的柔性直流输电黑启动方案评估方法。首先, 介绍柔性直流输电的运行特性; 其次, 综合考虑表征方案优劣的初期恢复评价指标和后效性评价指标, 构建全面反映方案优劣的综合评价体系; 然后, 分别采用序关系分析法和改进 CRITIC 法确定主客观权重, 在此基础上利用基于博弈论的组合赋权法求得各待评价指标的组合权重, 并采用逼近理想解排序法对满足各类约束条件的柔性直流输电黑启动方案进行综合评价以确定其优劣程度。最后, 以鲁西背靠背柔性直流通道对云南电网大停电后的供电恢复为研究背景, 验证所提评估方法的有效性。

**关键词:** 柔性直流输电; 黑启动; 评估; 序关系分析法; 改进 CRITIC 法; 逼近理想解排序法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.06.014 中图分类号: TM74 文章编号: 1673-9140(2020)06-0110-07

## Evaluation method of black-start scheme with VSC-HVDC considering aftereffects

LIU Xufei<sup>1</sup>, WU Chen<sup>1</sup>, ZHANG Dan<sup>1</sup>, HUANG Wei<sup>1</sup>, LI Pengfei<sup>2</sup>

(1. Yunnan Electric Power Dispatching and Control Center, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650011, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** The black start scheme for VSC-HVDC can maintain the voltage stability of the converter bus and effectively suppress the possible overvoltage problems. Under this background, an evaluation method is proposed for the black start scheme of VSC-HVDC considering aftereffects. Firstly, the operation characteristics of VSC-HVDC are introduced; Secondly, the initial recovery evaluation index and aftereffects evaluation index are comprehensively combined to characterize the pros and cons of the scheme. A comprehensive evaluation system is then established to fully reflect the pros and cons of the scheme. Thirdly, the order relation analysis method and the improved CRITIC method are utilized to determine the subjective and objective weight respectively. The combination weighting method based on game theory is then employed to obtain the combination weight of each index to be evaluated. Furthermore, a comprehensive evaluation of the black start scheme of HVDC satisfying all kinds of constraints is analyzed to determine the advantages and disadvantages. Finally, the feasibility of proposed method is verified by the restoration of the power supply with Luxi back-to-back VSC-HVDC system after a blackout in Yunnan power grid.

**Key words:** VSC-HVDC; black start; evaluation; order relation analysis method; improved CRITIC method; TOPSIS

收稿日期: 2018-01-08; 修回日期: 2018-05-07

基金项目: 云南省电力公司科技项目 (yndw(2016)000303DD00085)

通信作者: 李鹏飞 (1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统安全防御与恢复控制、高压直流输电技术的研究; E-mail: lpf\_kx@163.com

近些年来,传统高压直流输电(LCC-HVDC)和柔性直流输电(VSC-HVDC)在全国范围内得到了大规模的推广与应用,越来越多的区域电网运行模式由交直流混联转变为异步互联。这在显著提高电网整体运行合理性与经济性的同时,也使得直流送端电网的频率稳定问题显得日益突出<sup>[1]</sup>。此外,直流闭锁故障在电网运行过程中时有发生,若处理不当,容易因多条直流间的相互影响而引发多直流通道同时闭锁而造成系统失稳,酿成大面积的停电事故,进而严重影响社会的安全稳定与人民的生产生活<sup>[2]</sup>。

与 LCC-HVDC 相比,VSC-HVDC 能够直接接入处于全停状态的受端电网,克服了 LCC-HVDC 不能作为第一批电源参与系统恢复进程的根本缺陷<sup>[3-4]</sup>。此外,得益于 VSC-HVDC 良好的动态无功控制能力,它能够在黑启动过程中很好地维持换流母线的电压稳定,同时可以有效抑制可能出现的过电压问题<sup>[5-6]</sup>,是一种理想的黑启动电源。

关于 VSC-HVDC 在系统恢复过程中如何有效发挥作用这一问题,近些来国内外的专家学者已经开展了一些卓有成效的研究与探索。文献[6]基于预设的恢复路径对黑启动过程进行了仿真,验证了柔性直流输电良好的电压和频率控制能力;文献[7]依据调度运行经验给出了利用鲁西背靠背柔性直流通道对云南电网进行黑启动时的恢复路径及方案;文献[8]给出了适用于 VSC-HVDC 的换流站启动策略;文献[9]提出了黑启动过程中 VSC-HVDC 并网时的协调控制策略;文献[10]以鲁西背靠背柔性直流通道为依托,对其在云南电网大停电后恢复过程中的负荷投入问题进行了研究,并在 PSCAD 中对所提负荷投入策略的正确性与合理性进行了仿真验证。

作为完善恢复控制体系、全面提升恢复控制效果的关键环节,对所得恢复方案进行科学评估一直是黑启动研究人员关注的热点问题<sup>[11-12]</sup>。但目前,包括前述文献在内,尚未有文章提出有关 VSC-HVDC 黑启动方案的评估方法。针对此,该文提出一种考虑后效性的柔性直流输电黑启动方案评估方法。首先,介绍柔性直流输电的运行特性;其次,综合考虑表征方案优劣的初期恢复评价指标和后效性

评价指标,构建全面反映方案优劣的综合评价体系。然后,分别采用序关系分析法和改进 CRITIC 法确定主客观权重,在此基础上利用基于博弈论的组合赋权法求得各待评价指标的组合权重,并采用逼近理想解排序法(TOPSIS)对满足各类约束条件的 VSC-HVDC 黑启动方案进行综合评价以确定其优劣程度。最后,以鲁西背靠背柔性直流通道对云南电网大停电后的供电恢复为研究背景验证所提评估方法的有效性。

## 1 柔性直流输电的运行特性

在 VSC-HVDC 的运行过程中,从交流系统流向换流器的有功功率值  $P_s$  和无功功率值  $Q_s$ 。需满足<sup>[5]</sup>:

$$P_s^2 + \left(Q_s - \frac{U_s^2}{X}\right)^2 = \left(\frac{U_s U_c}{X}\right)^2 \quad (1)$$

式中  $U_s$  为交流母线的基波电压值; $U_c$  为换流器输出的交流基波电压值; $X$  为等效换流电抗。由此可见, $P_s$  和  $Q_s$  运行在一个圆形区域内。此圆以  $(0, U_s^2/X)$  为圆心,半径为  $U_s U_c / X$ 。在系统恢复过程中,VSC-HVDC 给待恢复机组提供启动功率的同时,需要进相运行以降低空充线路造成的过电压问题,因此,应使其运行在圆形区域的第 2 象限。

$$U_c = \frac{\mu M}{\sqrt{2}} U_{dc} \quad (2)$$

式中  $\mu$  为直流电压利用率; $M$  为调制比; $U_{dc}$  为直流电压额定值。

将式(2)代入式(1)可得约束条件:

$$P_s^2 + \left(Q_s - \frac{U_s^2}{X}\right)^2 = \left[\frac{\mu M U_s U_{dc}}{\sqrt{2} X}\right]^2 \quad (3)$$

此外, $P_s$  和  $Q_s$  的大小还需满足换流器最大电流和直流输电线路允许通过的最大电流约束<sup>[13]</sup>。

## 2 柔性直流输电黑启动方案评估指标体系

### 2.1 初期恢复评价指标

1) 机组启动功率。利用 VSC-HVDC 启动常规机组时,待恢复机组的启动功率过大容易引发电压或频率失稳,甚至导致系统再次陷入停电状态。为

充分保证机组启动过程的安全性,利用 VSC-HVDC 启动常规机组时应尽量选择启动功率较小的机组,等到系统强度恢复到一定程度时,再恢复所需启动功率更大的机组。将机组所需启动功率表示为

$$I_1 = P_{cri} \quad (4)$$

式中  $P_{cri}$  为机组  $i$  的启动功率。

2)恢复路径指标。在利用 VSC-HVDC 进行黑启动时,减小所经过线路的电纳值是降低自励磁和线路末端过电压等问题出现可能性的重要措施。此外,三相不同期合闸和变压器铁磁谐振等问题会随着恢复路径中电压转换次数的增多而变得更加严重,因此减小电压转换次数也十分重要。综上,可得恢复路径指标为

$$I_2 = \sum_{j=1}^{n_L} B_j + \alpha n_T \quad (5)$$

式中  $n_L$  为利用 VSC-HVDC 对常规机组进行黑启动过程中所需经过的支路总数; $B_j$  为支路  $j$  的电纳值; $\alpha$  为电压转换系数,表示途经变压器出现电压变换对系统恢复造成的影响,取为 0.5; $n_T$  为发生电压变换的次数。

3)机组并网发电用时。从 VSC-HVDC 启动到被启动机组向外输送功率所需时间的长短会对大停电给系统带来的损失大小有显著影响,减小这一过程的用时意义重大。这一过程的总用时主要取决于线路、变压器的操作用时和机组爬坡至外送功率的用时,即

$$I_3 = n_L t_L + n_T t_T + t_{G_i} \quad (6)$$

式中  $n_L$  为从换流站处送电到待启动机组时所需要经过的线路总数; $t_L$  为操作单条线路所需的时间,取为 5 min; $n_T$  为从换流站处送电到待启动机组时所需要经过的变压器总数; $t_T$  为恢复单台变压器所需的时间,取为 12 min; $t_{G_i}$  为机组  $i$  从带电到出力提升至最大值所用的时间。

## 2.2 后效性评价指标

1)机组出力能力。与火电机组的缓慢爬坡过程不同,水电机组的启动速度快,能在 5~10 min 内达到出力最大值,远小于线路与变压器的恢复用时,因此关注点应在于水电机组的最大出力,机组最大出力越高,则越有利于在后续恢复过程中为系统提供更多的功率支持,更好地降低停电损失与社会影响,定义为

$$I_4 = P_i \quad (7)$$

式中  $P_i$  为机组  $i$  的出力最大值。

2)恢复节点的重要度。系统内节点数量繁多,其中的一些枢纽节点和关键节点在电能的传输和下一步网架的展开方面往往能够起到重要作用,此类节点通常具有较高的重要度。利用 VSC-HVDC 进行黑启动的过程中恢复的各个节点重要度之和越大,代表这一方案在后续恢复过程中会有更加优异的表现。

$$I_5 = \sum_{i=1}^N \alpha_i \quad (8)$$

式中  $N$  为黑启动过程中所恢复的节点总个数;节点  $i$  的重要度  $\alpha_i$  可依据文献[14]由公式计算得到,公式为

$$\begin{cases} \alpha = 1/nl \\ l = \sum_{p,q \in V} D_{\min,pq} / (n(n-1)/2) \end{cases} \quad (9)$$

式中  $n$  为网络中的节点总数; $l$  为节点间的平均最短路径; $D_{\min,pq}$  为从节点  $p$  到  $q$  的最短路径中边的总条数; $V$  为网络中所有节点的集合。

3)柔性直流输电剩余无功可吸收量。利用 VSC-HVDC 进行后续恢复的过程中,需要继续投入新的线路以进一步扩大网络架构,新投入的空载高压线路会产生过多的无功功率。柔性直流输电剩余无功可吸收量对后续待恢复空载高压线路投入的可行性有很大影响,此值越大,电压越限的可能性越小,线路投入的可行性越高。

$$I_6 = Q_{\max} - Q_a \quad (10)$$

式中  $Q_{\max}$  为 VSC-HVDC 在运行过程中可吸收的最大无功功率<sup>[15]</sup>; $Q_a$  为 VSC-HVDC 在当前运行状态下吸收的无功功率,均以标么值形式表示。

## 3 基于 TOPSIS 的方案评估模型

### 3.1 基于序关系分析法的主观权重确定

为充分利用电网调度运行人员的工作经验及主观偏好对各方案的优劣进行评价,该文采用序关系分析法<sup>[16]</sup>来确定各权重的系数,这一主观赋权方法无需检验判断矩阵是否具有—致性,且步骤较为简单、计算量较小。

1)确定各指标间的序关系。

若电网调度运行人员认为评价指标  $x_i$  的重要程度不低于  $x_j$ , 则评价指标  $x_i, x_j$  之间确定了序关系, 用式  $x_i > x_j$  来表示。设定待评价指标有  $n$  个, 将其按照重要程度由高到低依次记为  $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$  :

$$x_1^* > x_2^* > \dots > x_n^* \quad (11)$$

2) 给出  $x_{k-1}, x_k$  间相对重要程度的判断。

采用  $r_k = \omega_{k-1} / \omega_k$  表示评价指标  $x_{k-1}$  与  $x_k$  的重要程度之比, 其中  $k = n, n-1, n-2, \dots, 3, 2$ 。  $r_k$  的赋值参考如表 1 所示。

表 1  $r_k$  的赋值

$r_k$	定义
1.0	指标 $x_{k-1}$ 与 $x_k$ 同等重要
1.2	指标 $x_{k-1}$ 比 $x_k$ 稍微重要
1.4	指标 $x_{k-1}$ 比 $x_k$ 明显重要
1.6	指标 $x_{k-1}$ 比 $x_k$ 强烈重要
1.8	指标 $x_{k-1}$ 比 $x_k$ 极端重要

3) 权重系数  $\omega_k$  的计算。

利用  $\omega_n = (1 + \sum_{k=2}^n \prod_{i=k}^n r_i)^{-1}$  计算得到重要程度最低指标  $n$  的权重, 再根据  $\omega_{k-1} = r_k \omega_k$  计算得到其余指标的权重。

### 3.2 基于改进 CRITIC 法的客观权重确定

为更加客观科学地表现出不同指标间的关系, 该文采用改进 CRITIC 法<sup>[17]</sup> 确定不同指标间的客观权重, 方法中各指标的权重可以通过信息量的大小来确定。

1) 计算得到各项指标的信息量:

$$c_j = v_j R_j = \frac{\sigma_j}{\bar{x}_j} \sum_{k=1}^n (1 - r_{jk}) \quad (12)$$

式中  $\sigma_j, \bar{x}_j$  分别为各个方案在指标  $j$  下的标准差和平均值;  $r_{jk}$  为指标  $j, k$  之间的相关系数。

2) 利用公式进行归一化, 得到指标  $j$  的权重值。公式为

$$\gamma_j = \frac{c_j}{\sum_{j=1}^n c_j} \quad (13)$$

### 3.3 基于博弈论的组合赋权

为使最终评价结果既能反映电网调度运行人员对各指标的主观偏好, 同时可以表现出不同数据间

自身具有的客观差异, 该文引入博弈论对各评价指标进行组合赋权<sup>[18]</sup>, 具体过程如下。

设由序关系分析法确定的主观权重向量和改进 CRITIC 法确定的客观权重向量分别为  $w_1 = \{w_{1j} | 1 \leq j \leq n\}$ 、 $w_2 = \{w_{2j} | 1 \leq j \leq n\}$ , 则 2 个权重向量构成的线性组合为

$$w = \sum_{j=1}^2 \lambda_j w_j^T \quad (14)$$

式中  $\lambda_j$  为线性组合系数。

根据博弈论的思想, 应使可能的权重与各个基本权重之间的偏差达到最小化。基于此, 得出对策模型为

$$\min \left\| \sum_{j=1}^2 \lambda_j w_j^T - w_i^T \right\|, i = 1, 2 \quad (15)$$

依据矩阵的微分性质, 得出式(15)最优化的一阶导数条件为

$$\sum_{j=1}^2 \lambda_j w_j w_j^T = w_i w_i^T, i = 1, 2 \quad (16)$$

求解式(16)得到系数  $\lambda_1, \lambda_2$ , 归一化处理后分别得

到  $\lambda_1^* = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}$ 、 $\lambda_2^* = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$ 。可得组合权重为

$$w^* = \lambda_1^* w_1^T + \lambda_2^* w_2^T \quad (17)$$

### 3.4 基于 TOPSIS 法的 VSC-HVDC 黑启动方案评价

为实现对各个方案的全面合理评估, 该文采用在多属性决策领域表现优异的 TOPSIS 法<sup>[19]</sup> 对各方案进行综合评价, 主要步骤如下:

1) 设决策矩阵为  $Y = \{y_{ij}\}$ , 首先对其中的负向指标正向化处理得到矩阵  $Y' = \{y'_{ij}\}$ , 然后再规范化处理得到决策矩阵  $Z = \{z_{ij}\}$ , 其中,

$$z_{ij} = y'_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m y'_{ij}{}^2} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

2) 根据组合权重  $w^* = \{w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*\}$  和决策矩阵  $Z = \{z_{ij}\}$ , 计算得到加权规范化矩阵  $X = \{x_{ij}\}$ , 其中  $x_{ij} = w_j^* \cdot z_{ij}$ 。

3) 确定理想方案  $x^+$  和负理想方案  $x^-$ 。

设理想方案  $x^+$  和负理想方案  $x^-$  的第  $j$  个属性值分别为  $x_j^+, x_j^-$ , 则

$$x_j^\pm = \begin{cases} \max_i x_{ij}, & j \text{ 为效益型属性} \\ \min_i x_{ij}, & j \text{ 为成本型属性} \end{cases} \quad (19)$$

$$x_j^- = \begin{cases} \max_i x_{ij}, j \text{ 为成本型属性} \\ \min_i x_{ij}, j \text{ 为效益型属性} \end{cases} \quad (20)$$

### 4 算例分析

4) 方案  $x_i$  到  $x_j^+$ 、 $x_j^-$  的距离分别为

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (21)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (22)$$

5) 计算各方案的相对贴程度:

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}, i = 1, 2, \dots, m \quad (23)$$

依托于鲁西背靠背柔性直流输电通道,以云南实际电网为算例,验证所提评估方法的科学性与有效性。除了满足机组启动功率约束、线路潮流约束、节点电压和系统频率等此类常规约束之外,还需满足 VSC-HVDC 的运行特性。该文基于表 2 所示的 5 个满足各类约束技术上可行的 VSC-HVDC 黑启动方案对该文所提评估方法的有效性进行验证。各个方案的指标值及相对贴程度如表 3 所示。

表 2 技术上可行的 VSC-HVDC 黑启动方案

Table 2 Technically feasible black start program with VSC-HVDC

方案	恢复路径
1	鲁西背靠背—圭山变—青山变—弥勒变—朋普变—开远变—红河变—通宝变—蔓耗变—马堵山电厂
2	鲁西背靠背—圭山变—七甸变—厂口变—新村变—以礼河四级—以礼河三级—金钟变—者海变—迤车变—永丰变—天花板电厂
3	鲁西背靠背—圭山变—青山变—弥勒变—朋普变—开远变—红河变—砚山变—马关变—马鹿塘电厂
4	鲁西背靠背—圭山变—青山变—弥勒变—云鹏电厂
5	鲁西背靠背—圭山变—七甸变—厂口变—中屏变—赛珠电厂

表 3 各方案的评价指标值

Table 3 Evaluation index value of different schemes

方案	$I_1/\text{MW}$	$I_2$	$I_3/\text{min}$	$I_4/\text{MW}$	$I_5$	$I_6/\text{p. u.}$	相对贴程度
1	0.96	3.917 6	88	96	8.662 7	8.082 4	0.706 8
2	0.80	3.852 2	107	80	10.530 1	7.147 8	0.558 3
3	0.80	3.848 3	131	80	8.642 9	8.151 7	0.652 6
4	0.70	2.065 7	107	70	4.292 8	8.934 3	0.499 9
5	0.34	3.510 4	107	34	5.396 9	7.489 6	0.201 9

首先,依据电网调度运行人员的工作经验及主观偏好对各方案的优劣进行评价,设定 6 个评价指标的重要度由高到低依次为柔性直流输电剩余无功可吸收量、恢复节点的重要度、机组出力能力、恢复路径指标、机组并网发电用时、机组启动功率,则可以确定序关系  $x_6 > x_5 > x_4 > x_2 > x_3 > x_1, r_2, r_3, r_4, r_5$  和  $r_6$  分别为 1.2、1.0、1.6、1.4 和 1.2,由此得到 6 个评价指标的主观权重向量:

$$w_1 =$$

$$[0.080\ 1, 0.134\ 6, 0.096\ 1, 0.215\ 4, 0.215\ 4, 0.258\ 4]$$

采用改进 CRITIC 法计算得到客观权重向量:

$$w_2 =$$

$$[0.186\ 1, 0.191\ 4, 0.105\ 4, 0.183, 0.223\ 5, 0.097\ 4]$$

采用基于博弈论的组合赋权法计算得到各指标的组合权重:

$$w^* =$$

$$[0.119\ 1, 0.155\ 5, 0.099\ 5, 0.204\ 6, 0.222, 0.199\ 2]$$

然后,对负向指标进行正向化,再进行规范化处理,得到决策矩阵:

$$Z =$$

0.486 5	0.457 1	0.457 1	0.440 4	0.389 3
0.471 3	0.467 1	0.466 9	0.377 1	0.446 7
0.480 2	0.460 4	0.384 2	0.454 2	0.451 2
0.522 6	0.468 7	0.468 7	0.435 0	0.313 6
0.480 4	0.545 8	0.479 7	0.327 5	0.366 1
0.455 8	0.337 9	0.464 5	0.563 2	0.381 0

最后,采用 TOPSIS 法对各技术上可行的 VSC-HVDC 黑启动方案进行综合评价得到其相对贴近度分别为 0.706 8、0.558 3、0.652 6、0.499 9、0.201 9。由此可知,各方案的整体效果优劣程度由高到低依次为方案 1、3、2、4、5。

## 5 结语

该文提出了一种考虑后效性的柔性直流输电黑启动方案评估方法。首先,介绍了柔性直流输电的运行特性;其次,综合考虑表征方案优劣的初期恢复评价指标和后效性评价指标,构建全面反映方案优劣的综合评价体系。然后,分别采用序关系分析法和改进 CRITIC 法确定主客观权重,在此基础上利用基于博弈论的组合赋权法求得各待评价指标的组合权重,并采用 TOPSIS 法对满足各类运行约束条件的柔直黑启动方案进行综合评价以确定其优劣程度。最后,以鲁西背靠背柔性直流通道对云南电网大停电后的供电恢复为研究背景验证了所提评估方法的有效性。该文所提评估方法能够为 VSC-HVDC 黑启动方案的制定提供更为科学的决策依据,为调度运行人员在系统恢复过程中的操作提供更加合理的指导。

需要指出的是,考虑到云南电网绝大部分的火电机组长期处于停机状态,缺乏必要的完成黑启动操作的执行条件,如值班人员的配备、燃料的储备等。因此,在该文中只考虑水电机组的启动,这些机组在实际的黑启动过程中常常会因为一些限制因素而难以按照预想方案有序推进,故可以考虑将 VSC-HVDC 作为水电机组自启动不成功时的备用电源,这对完善云南电网的恢复预案有重要价值。另外,机组出力能力指标也是依据水电机组的特性提出的,若要对火电机组进行启动,考虑到火电机组爬坡用时远大于线路和变压器的操作耗时,宜将机组出力能力指标更换为表征机组单位时间内出力增值的爬坡率指标。

## 参考文献:

[1] 陈鹏远,黎灿兵,周斌,等.异步互联电网柔性直流输电紧急功率支援与动态区域控制偏差协调控制策略[J].

电工技术学报,2019,34(14):3025-3034.

CHEN Pengyuan, LI Canbing, ZHOU Bin, et al. VSC-HVDC emergency power support and dynamic area control error coordinated control strategy for improving the stability of asynchronous interconnected power grids [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(14): 3025-3034.

[2] 吴萍,张健,屠竞哲,等.溪洛渡—浙西特高压直流投运后系统稳定特性及协调控制策略[J].电网技术,2014,38(7):1873-1878.

WU Ping, ZHANG Jian, TU Jingzhe, et al. Stability characteristics and coordinated control strategy of grid-integrated UHVDC transmission line from Xiluodu to Zhexi[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1873-1878.

[3] Jiang-Hafner Y, Duchon H, Karlsson M, et al. HVDC with voltage source converters—a powerful standby black start facility[C]//IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago, IL, USA, 2008.

[4] Li S, Zhou M, Liu Z, et al. A study on VSC-HVDC based black start compared with traditional black start [C]//International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing, China, 2009.

[5] 赵成勇.柔性直流输电建模和仿真技术[M].北京:中国电力出版社,2014.

[6] 李胜,杨琦,李春叶.基于电压源换流器型直流输电分区联络线的黑启动方案[J].上海交通大学学报,2011,45(6):821-825.

LI Sheng, YANG Qi, LI Chunye. Black start scheme based on VSC-HVDC tie line[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(6): 821-825.

[7] 周剑,黄磊,刘春晓,等.基于鲁西背靠背柔性直流系统的南方电网黑启动方案[J].南方电网技术,2017,11(6):8-14.

ZHOU Jian, HUANG Lei, LIU Chunxiao, et al. Black-start scheme of China southern power grid based on Luxi back-to-back VSC-HVDC system [J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(6): 8-14.

[8] 李探,赵成勇,王朝亮,等.用于电网黑启动的 MMC-HVDC 系统换流站启动策略[J].电力系统自动化,2013,37(9):117-122.

LI Tan, ZHAO Chengyong, WANG Chaoliang, et al. St-

- artup schemes for converter station of MMC-HVDC system applied in grid black start[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 117-122.
- [9] 曾丹, 姚建国, 王珂, 等. 柔性直流输电系统的黑启动控制能力研究[J]. 现代电力, 2012, 29(2): 11-16.  
ZENG Dan, YAO Jianguo, WANG Ke, et al. Study on control capability of black-start in VSC-HVDC system [J]. Modern Electric Power, 2012, 29(2): 11-16.
- [10] 赵睿, 卢斯煜, 王曦, 等. 云南电网和主网利用直流输电系统黑启动的策略研究[J]. 四川电力技术, 2016, 39(5): 26-31.  
ZHAO Rui, LU Siyu, WANG Xi, et al. Study on the black start with HVDC in Yunnan power grid and main southern power grid[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2016, 39(5): 26-31.
- [11] 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.
- [12] 顾雪平, 王大江, 梁海平, 等. 电力系统扩展黑启动方案动态综合评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 44-52.  
GU Xueping, WANG Dajiang, LIANG Haiping, et al. Dynamic comprehensive assessment of power system extended black-start plans[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 44-52.
- [13] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 中国电力出版社, 2010.
- [14] 刘艳, 顾雪平. 基于节点重要度评价的骨架网络重构[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 20-27.  
LIU Yan, GU Xueping. Node importance assessment based skeleton-network reconfiguration [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 20-27.
- [15] 杨超, 梁海平, 顾雪平, 等. 基于电压源换流器 HVDC 联网的受端电网扩展黑启动方案[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 207-215.  
YANG Chao, LIANG Haiping, GU Xueping, et al. The recovery strategy of the extended black-start for the receiving end system based on the voltage source converter-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 207-215.
- [16] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 科学出版社, 2007.
- [17] 曹玮, 王瑛. 基于改进 CRITIC-CPM 的科技奖励评价模型[J]. 科学学与科学技术管理, 2012, 33(2): 17-21.  
CAO Wei, WANG Ying. The improved CRITIC-CPM evaluation model in science and technological awards [J]. Science of Science and Management of S. & T., 2012, 33(2): 17-21.
- [18] 贾梦雨, 李猛, 韩松, 等. 基于博弈论组合赋权的农村电网综合评价体系研究[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 69-75.  
JIA Mengyu, LI Meng, HAN Song, et al. Research on rural power system comprehensive evaluation system based on game theory combination weights[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 69-75.
- [19] 杨国生, 戴飞扬, 王文焕, 等. 基于灰度关联法和 TOPSIS 法的继电保护状态评估综合算法研究与应用[J]. 中国电力, 2019, 52(2): 94-103.  
YANG Guosheng, DAI Feiyang, WANG Wenhuan, et al. Research and application of comprehensive algorithm of relay protection status assessment based on gray correlation analysis and TOPSIS method[J]. Electric Power, 2019, 52(2): 94-103.