

多直流馈入系统功率调控与机组出力恢复协调优化

王洪涛¹, 蔺呈倩², 杨冬³, 赵艳军⁴, 龙霏⁵, 王铃⁴

(1. 山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室, 山东 济南 250061; 2. 国网物资有限公司, 北京 100120;
3. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003; 4. 广东电网有限责任公司电力科学研究院,
广东 广州 510080; 5. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600)

摘要:含多直流馈入的受端电网发生大停电后,充分发挥直流系统启动后的调控能力是加快负荷恢复进程的重要手段,同时对系统恢复控制提出了更高的要求。在此背景下,提出了一种多直流馈入系统功率调控与受端系统机组出力恢复协调优化方法。首先,从直流系统逆变站的功率调控特性和多直流馈入系统与送/受端交流系统的交互作用这2个层面分析多直流馈入系统的功率调控特性,并建立相应的功率调控约束模型;然后,以机组爬坡时间和直流系统功率调控时间最短为目标,综合考虑直流系统、送/受端系统的约束条件以及常规发电机组的恢复运行约束等因素,建立直流馈入量调整模型,计及系统功率平衡、电压和频率安全、旋转备用等约束,构建多直流馈入受端系统的机组出力优化模型。在此基础上,将该问题建模为双层混合整数线性规划模型,实现传统机组出力和各直流传输量的协调优化,最小化机组出力调整时间,并达到避免直流传输量小幅调整的调度目标。最后,以含多直流馈入的IEEE 30节点、IEEE 118节点系统以及含多风电场的IEEE 30节点系统为算例验证所提模型的有效性。

关键词:高压直流输电;多直流馈入;电力系统恢复;网架重构;黑启动;负荷恢复

中图分类号:TM 721.3;TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201909019

0 引言

随着我国电网西电东送通道的建设,华东、华中电网的部分地区形成了直流多馈入的电网形态,电网在受到大的事故扰动后的系统运行调控也呈现新的方式和挑战,仅依靠传统机组出力调控的手段已经不能满足电网的运行需求,亟需探讨如何充分利用直流系统的快速功率调控能力以提升受端电网的恢复进程。

受端电网的恢复通常分为黑启动、网架重构与负荷恢复3个阶段。文献[1-2]针对多个黑启动电源,通过合理的子系统划分,协调各系统并行恢复,缩短了恢复时间。文献[3-4]将黑启动阶段的决策和系统后续骨架网络的恢复决策相联系,提出有利于后续恢复的扩展黑启动方案。但以上文献皆未考虑外部直流系统功率支援的场景。由于直流系统的启动条件对受端系统强度的限制,直流系统通常在负荷恢复阶段发挥其快速功率支援作用。在此阶段,针对电力系统恢复过程中的机组出力与负荷恢复协调优化问题已有了较多的研究。文献[5]将机

组出力优化问题的目标函数确定为最小化机组爬坡时间,结合发电机的爬坡特性从而加快了电力系统的恢复效率;文献[6]考虑风电的参与,分时步在线决策实现大规模电力系统机组出力调整与负荷恢复的协调进行;文献[7-9]关注恢复过程中风电、负荷的不确定性,给出了考虑风电接纳能力的各时步机组出力的协调配合方案。到目前为止,机组出力与负荷协调恢复的问题在交流系统中已进行了充分的研究,但对于多直流馈入的交直流系统的负荷恢复研究尚较少。

当受端电网发生大面积停电以后,多馈入受端电网的超/特高压直流联络线也通常受到影响而退出运行。由于超/特高压直流系统大多采用基于电网换相的电流源型直流输电技术,因此其启动需要一定的时机和条件。在此方面已有大量的研究和定论,文献[10-12]分析了直流系统启动方式、控制方式和交流系统强度等因素,给出了高压直流输电系统的启动条件;文献[13]指出要发挥高压直流输电系统在恢复过程中的作用,首先要保证高压直流输电系统的启动过程对受端系统频率和电压冲击过程的安全,提出建立以待恢复电源的恢复效率最高为目标的系统恢复路径优化模型,使得高压直流输电系统在参与电网恢复路径的优化过程中加快网架重构效率;文献[14]进一步地提出了双极仿融冰黑启动模式,给出了在黑启动条件下优先直接启动高压直流输电系统的技术,为电网发生大停电后迅速恢复高压直流输电系统提供了快速可行的实现方式。

收稿日期:2019-04-13;修回日期:2019-07-30

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900100);
国家电网公司科技项目(交直流混联电网快速恢复的关键
变电站控制技术研究)

Project supported by the National Key R&D Program of China
(2016YFB0900100) and the Science and Technology Program
of SGCC (Research on Key Sub-station Control Technology
for Rapid Recovery of AC/DC Hybrid Power Grid)

然而较少有研究涉及如何充分发挥直流系统在启动后的调控能力、加快负荷的恢复进程这一问题。

直流系统启动后,如果只是利用直流系统的快速功率调节能力,忽视直流系统送/受端系统的功率协调以及换流站设备的功率调整限制等问题,则不利于恢复后期送/受端系统的频率与电压安全,一旦越限,会大幅增加调整时间,延缓恢复进程。因此在负荷恢复阶段,关注直流联络线传输功率与传统发电机出力的协调配合问题十分重要。

为了充分发挥多直流馈入系统在电力系统恢复期间的作用,需不断优化调整系统中各传统机组的出力和直流逆变站向交流系统注入的传输容量,以保证在接入负荷的过程中受端系统节点电压、线路潮流的安全。同时,还需要考虑送端电网机组的调节特性、潮流限制等情况,以协调直流系统的传输量和受端系统传统机组的出力。针对以上问题,本文针对直流系统已启动的多直流馈入受端系统的负荷恢复阶段,以最优化机组和直流系统功率调控为目标,综合考虑直流系统送/受端系统的协调、换流站设备频繁调整限制等因素,建立直流馈入量的调整模型,并计及系统无功和有功功率平衡、电压和频率安全、机组爬坡和旋转备用约束,形成多直流馈入受端系统机组出力的优化模型,采用线性化技术将该问题建模为混合整数线性优化模型,针对各时步负荷接入后的系统断面数据,实现传统机组出力和各直流传输量的协调优化,最小化机组出力调整时间,并尽量避免直流传输量小幅调整的调度目标。

1 多直流馈入系统逆变站功率调控特性分析与建模

本节分别从考虑直流系统逆变站功率调控特性、多直流馈入系统与送/受端交流系统的交互作用这2个层面分析多直流馈入系统逆变站功率的调控特性,并建立相应的功率调控约束模型。

1.1 直流系统逆变站功率调控特性分析与建模

(1) 直流功率调整方向特性与建模。

为了保证直流换流器的平稳运行,不允许在相邻时步出现换流站异向调节的情况。令 $x_{m,s}^+$ 表示换流站 m 的等效发电机出力在第 s 个时步的爬坡状态(处于爬坡状态则取值为1,不处于则取值为0), $x_{m,s}^-$ 表示换流站 m 的等效发电机出力在第 s 个时步的滑坡状态(处于滑坡状态则取值为1,不处于则取值为0),形成直流系统在相邻时步的非异向调约束如式(1)所示。

$$\begin{cases} x_{m,s}^+ + x_{m,s}^- = x_{m,s} \leq 1 \\ x_{m,s+1}^+ + x_{m,s}^- \leq 1 \\ x_{m,s}^+ + x_{m,s+1}^- \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x_{m,s}$ 为0-1变量,当换流站 m 的等效发电机组

出力在第 s 个时步存在调整时取值为1,不存在调整时则取值为0。

(2) 直流功率调整间隔时步特性与建模。

考虑直流系统送/受端系统的功率协调和输送功率的易控性,直流联络线在实现单时步或连续几个时步的爬坡(或滑坡)后至少能平稳运行一段时间,进而进行下一步的爬坡(或滑坡)控制。 $a_{m,s}^+$ 为0-1变量,当换流站 m 在第 s 个时步开始调整时取值为1,没有开始调整时取值为0; $a_{m,s}^-$ 为0-1变量,当换流站 m 在第 s 个时步结束调整时取值为1,没有结束调整时取值为0。另外引入0-1变量 $y_{m,s}$ 作为辅助变量,有助于根据第 s 个时步的调整状态变量 $x_{m,s}$ 和下一个时步的调整状态变量 $x_{m,s+1}$ 确定 $a_{m,s}^+$ 、 $a_{m,s}^-$ 。则直流系统调整允许间隔时步 N_T 约束为:

$$\begin{cases} a_{m,s}^- + \sum_{\tau=s+1}^{s+N_T} a_{m,\tau}^+ \leq 1 \\ a_{m,s}^+ = x_{m,s+1} - y_{m,s} \\ a_{m,s}^- = x_{m,s} - y_{m,s} \\ y_{m,s} \leq x_{m,s} \\ y_{m,s} \leq x_{m,s+1} \\ y_{m,s} \geq x_{m,s} + x_{m,s+1} - 1 \end{cases} \quad (2)$$

式(1)和式(2)共同保证了在负荷恢复阶段直流联络线传输功率的阶段式增加。该阶段直流系统的传输功率特性如图1所示。式(1)在图1中展示的是在时步 k 和时步 $k+2$ 之间,当改变直流功率调整方向时,需要保证有1个时步的时间间隔,即保证不允许在相邻时步出现换流站异向调节的情况;式(2)在图1展示的是在时步2与时步 k 之间,当改变直流爬坡速率时,需保证有 N_T 个时步的时间间隔。

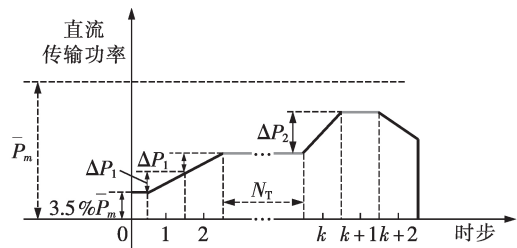


图1 直流系统的传输功率特性

Fig.1 Transmission power characteristic of HVDC system

(3) 单时步直流最小调整量限制。

为了避免直流联络线功率进行频繁小幅度功率调整,设定直流传输功率最小调整量限制,如式(3)所示。

$$x_{m,s} \delta_m \leq |P_{m,s} - P_{m,s+1}| \quad (3)$$

其中, δ_m 为直流联络线 m 在单时步内的出力调整最小值; $P_{m,s}$ 、 $P_{m,s+1}$ 分别为直流联络线 m 在第 s 、 $s+1$ 个时步的传输功率。

1.2 多直流馈入系统逆变站与送/受端系统协调控制特性分析与建模

(1) 单时步直流系统逆变站的最大调整量限制。

传统高压直流系统虽然具有较高的传输能力,但其功率来源依赖于送端电网的电源供应,不能超过送端电网发电机的功率调控极限以及送端交流系统网络传输限制。同时,受端电网也要避免一次性集中接纳某条直流馈入线路的大量功率注入,否则容易造成受端系统的潮流分布不均,加剧受端系统恢复过程中的安全风险。因此要平衡送、受端系统的功率交换,就要限制直流系统在单时步内的最大馈入功率量,尽量减少因直流系统进行大量功率调控所引起的系统潮流不均衡的现象。为此,本文考虑协调多直流馈入系统与送、受端机组出力的调整过程,设定单时步内直流联络线 m 的最大调整量限制,如式(4)所示。

$$|P_{m,s} - P_{m,s+1}| \leq x_{m,s} \bar{\delta}_m \quad (4)$$

其中, $\bar{\delta}_m$ 为直流联络线 m 在单时步内的功率调整量最大值,可以由送端机组和网络离线校验后的估计值确定。

(2) 直流输电线传输功率限制。

在常规火电机组的启动初期存在稳燃出力限制,约为发电机额定容量的20%~50%,当机组出力小于稳燃出力限制时,只允许升功率操作,导致传统机组恢复前期的下爬坡旋转备用不足;在双极直流系统的启动过程中,为了保证不出现直流断续的情况,通常要求输送功率为额定功率的3.5%,直流系统启动即满足该要求。

在网架重构后的负荷恢复阶段,当多直流所连接的交流系统的强度较弱时,会出现换相失败等一系列安全问题,因此在一定的传输功率下需保证有效惯性常数和短路比^[15]满足式(5)。

$$\begin{cases} H_{m,s} = H_{ac,s} / P_{m,s} \geq 2 \\ \text{MISCR}_{m,s} = \frac{S_{m,s}}{P_{m,s} + \sum_{n=1, n \neq m}^{N_{dc}} \frac{Z_{eqmn}}{Z_{eqmm}} P_n^{\max}} \geq 3 \end{cases} \quad (5)$$

其中, $H_{m,s}$ 为第 s 个时步系统的有效惯性常数,其与交流系统的转动惯量 $H_{ac,s}$ (单位为MW·s)和直流系统的实际传输功率 $P_{m,s}$ 相关; N_{dc} 为受端电网直流联络线的数量; Z_{eqmn} 为直流联络线 m 、 n 之间的等效阻抗; Z_{eqmm} 为直流联络线 m 的等效自阻抗; $P_n^{\max}$ 为直流联络线 n 的传输功率上限; $\text{MISCR}_{m,s}$ 为第 s 个时步系统的短路比,其与系统短路容量 $S_{m,s}$ 和直流系统的实际传输功率 $P_{m,s}$ 相关。

考虑到系统运行的安全性,各恢复阶段的时步中直流系统的实际传输功率上限值设置为 $\bar{P}_{m,s} =$

$$\min \left\{ \frac{H_{ac,s}}{2}, \frac{S_{m,s}}{3} - \sum_{n=1, n \neq m}^{N_{dc}} \frac{Z_{eqmn}}{Z_{eqmm}} P_n^{\max}, P_m^{\max} \right\}。 \text{则直流联络线}$$

传输功率约束为:

$$0.035 P_m^{\max} < |P_{m,s}| < \bar{P}_{m,s} \quad (6)$$

其中, $\bar{P}_{m,s}$ 为当前系统强度下直流联络线 m 的传输功率上限。

2 多直流馈入系统的机组出力优化决策模型

2.1 目标函数

电力系统恢复过程中的机组出力优化问题与机组组合和经济调度问题中以最小化系统发电成本或运行成本为目的不同。负荷的投入一般是离散的,为了实现待恢复负荷的快速接入,单时步内负荷恢复过程中的机组出力优化控制需最小化机组爬坡时间和直流联络线功率调控次数,同时要满足系统的功率平衡,维持节点电压、系统频率、各线路潮流在允许的范围内,这本质上是机组和直流联络线功率调度问题。在每个时步负荷离散投入完成的基础上建立直流传输量和机组出力优化模型,其目标函数为:

$$\min f = \max \{t_{j,s}, j=1, 2, \dots, N\} \quad (7)$$

其中, $\max \{\cdot\}$ 表示取最大值; $t_{j,s}$ 为第 s 个时步等效机组 j 的爬坡时间; $N = N_G + N_{dc}$ 为常规发电机组和受端电网直流联络线总数, N_G 为常规发电机组数量。传统发电机组单时步的机组调节时间由常规发电机组爬坡率 r_i 决定,如式(8)所示,直流联络线的调整功率时间由直流系统功率爬坡率 r_m 确定,如式(9)所示。

$$t_{i,s} = |P_{G,i,s} - P_{G,i,s-1}| / r_i \quad i=1, 2, \dots, N_G \quad (8)$$

$$t_{m,s} = |P_{m,s} - P_{m,s-1}| / r_m \quad m=1, 2, \dots, N_{dc} \quad (9)$$

其中, $P_{G,i,s}$ 、 $P_{G,i,s-1}$ 分别为第 s 、 $s-1$ 个时步结束时常规发电机组 i 的有功出力。

2.2 约束条件

考虑负荷恢复过程中的安全要求,约束条件应包括直流系统运行约束、常规发电机组出力约束、网络安全约束等。

(1) 直流系统运行约束。

相比于常规发电机组,直流系统的功率调控虽具有较快爬坡率的优势,但直流系统频繁转换升/降功率会增加送、受端交流系统的协调难度,且其运行稳定性也与送、受端交流系统条件有关。因此需在机组出力优化模型中增加直流系统的运行特性约束式(1)~(6)。

(2) 常规发电机组运行约束。

在当前恢复时步中,机组出力值应满足在上一

恢复时步基础上的有功、无功出力限制,如式(10)——(13)所示。

$$P_{G,i,s}^{\min} \leq P_{G,i,s} \leq P_{G,i,s}^{\max} \quad (10)$$

$$Q_{G,i,s}^{\min} \leq Q_{G,i,s} \leq Q_{G,i,s}^{\max} \quad (11)$$

其中, $P_{G,i,s}^{\max}$ 、 $P_{G,i,s}^{\min}$ 分别为第 s 个时步常规发电机组 i 有功出力的上、下限; $Q_{G,i,s}$ 为第 s 个时步常规发电机组 i 的无功出力; $Q_{G,i,s}^{\max}$ 、 $Q_{G,i,s}^{\min}$ 分别为第 s 个时步常规发电机组 i 无功出力的上、下限。

本文中发电机模型满足图2所示的发电机出力特性曲线(机组出力单位为 MW, 时间单位为 min)。图中, α_i 为机组 i 的最小技术出力比例; R_i 为机组 i 启动需要的启动功率。当机组出力大于稳燃值且小于最大出力时, 机组可以向上、向下爬坡; 在机组出力达到最小技术出力之前, 机组只能向上爬坡。常规发电机组 i 在第 s 个时步有功出力的上、下限可以分别表示为式(12)和式(13)。

$$P_{G,i,s}^{\max} = \begin{cases} P_{G,i,s-1} & t_{i,s} \geq t_0^i \text{ 且 } t_{i,s} + T_{\text{step}} \leq t_1^i \\ \min \{ P_{G,i,s-1} + T_{\text{step}} r_i, P_{G,i}^{\max} \} & t_{i,s} \geq t_1^i \\ \min \{ P_{G,i,s-1} + (t_{i,s} + T_{\text{step}} - t_1^i) r_i, P_{G,i}^{\max} \} & t_0^i \leq t_{i,s} < t_1^i \text{ 且 } t_1^i < t_{i,s} + T_{\text{step}} \end{cases} \quad (12)$$

$$P_{G,i,s}^{\min} = \begin{cases} P_{G,i,s-1} & t_{i,s} \geq t_0^i \leq t_2^i \\ \max \{ P_{G,i,s-1} - T_{\text{step}} r_i, \alpha_i P_{G,i}^{\max} \} & t_{i,s} > t_2^i \end{cases} \quad (13)$$

其中, $\min \{ \cdot \}$ 表示取最小值; $P_{G,i}^{\max}$ 为机组 i 的最大出力; t_0^i 为机组 i 的充电时刻; t_1^i 为机组 i 的并网时刻; t_2^i 为机组 i 越过稳燃出力的时刻; $t_{i,s}$ 为机组 i 在第 s 个时步开始的时刻; T_{step} 为单时步的持续时间。

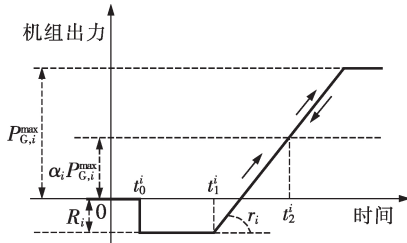


图2 发电机的出力模型

Fig.2 Output model of generator

(3)网络安全约束。

本文假设在受端电网发生故障停电使直流换流站闭锁后, 送端电网的稳定控制策略能够保证送端电网的稳定运行, 送端电网保持相对完整, 由于送端电网有较大的容量, 故受端系统的恢复过程不会对送端电网的稳定运行产生较大的影响^[16], 仅考虑高压直流输电系统功率调整对送端系统机组群送出功率增量的需求, 而忽略高压直流输电系统对送端电网的冲击。本文优化模型中考虑的网络安全约束包括系统功率平衡约束、各节点电压上下限约束、线路功率传输热稳定约束、电网频率安全约束、系统旋转备用约束^[7], 这些约束均针对受端电网。

2.3 求解流程

在上文所建立的多直流系统传输功率与传统机组出力优化模型的基础上, 本节的求解流程主要分为两部分: ①根据当前系统的运行状态确定该时步直流通道的实际传输功率上限值; ②在确定的约束条件下求解各时步直流传输功率和机组出力。在求解方法方面, 第一部分为线性规划问题, 第二部分可建立混合整数非线性规划模型。为了满足在线恢复决策对计算速度的要求, 利用潮流线性近似LPAC (Linear Programming of AC power flow) 法对模型进行线性化处理^[17], 从而将整个求解模型建立为双层混合整数线性规划问题, 可以运用 CPLEX 求解器进行求解。算法流程如图3所示, 图中 S 为总时步数。

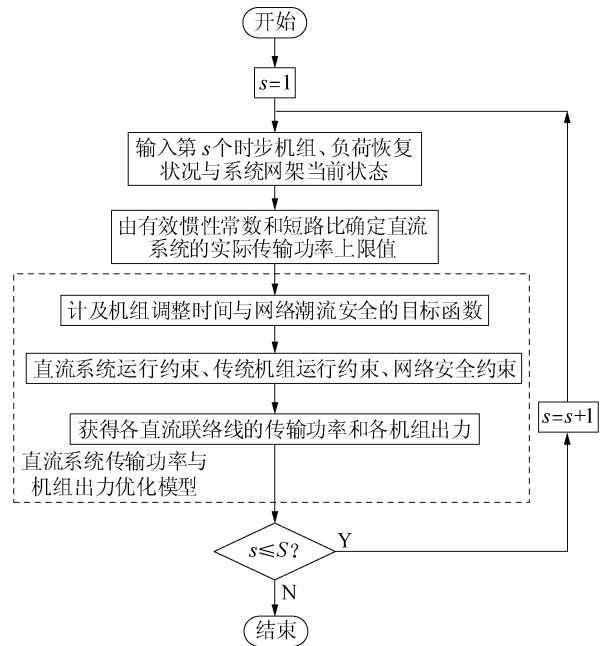


图3 算法流程

Fig.3 Flowchart of algorithm

3 算例分析

3.1 IEEE 30 节点系统算例

本文采用 IEEE 30 节点系统算例进行分析, 将标准算例系统中的部分发电机节点 11、13 改为直流馈入节点, 设已完成初步的网架重构工作, 算例拓扑结构如图4所示, 图中虚线框内的节点为已恢复站点, 实线表示已恢复的线路。各发电机组数据与直流系统数据如表1所示, 其中直流系统传输功率调整范围考虑送端机组调节能力, 设为表1中 ΔP 的值, N_T 取值为1。

以文献[18]中 IEEE 30 节点系统算例场景3给出的各时步负荷恢复计划为基础, 对机组出力进行优化, 对比多直流与机组出力的优化配置与仅机组出力调整的恢复方案, 结果如表2所示。在仅机组

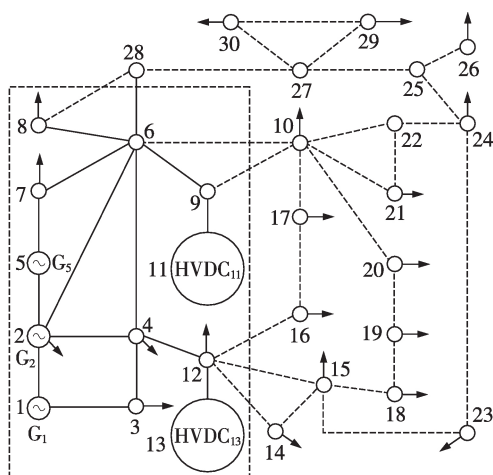


图4 基于IEEE 30节点系统的多直流馈入电网拓扑结构
Fig.4 Topology structure of multi-infeed DC power grid
based on IEEE 30-bus system

表1 IEEE 30节点系统机组参数
Table 1 Parameters of generators in IEEE 30-bus system

节点	$P_{G,i,0} /$ MW	$P_{G,i}^{\max} /$ MW	$\alpha_i P_{G,i}^{\max} /$ MW	$r_i /$ (MW·h ⁻¹)	$Q_{G,i}^{\max} /$ Mvar	$Q_{G,i}^{\min} /$ Mvar	$\Delta P /$ MW
1	19.5	70	20	35	60	-20	—
2	33	60	30	40	60	-20	—
5	15	40	20	35	44.7	-15	—
11	15	60	4	—	60	-60	[5, 20]
13	23	40	3	—	40	-40	[5, 20]

表2 恢复方案对比
Table 2 Comparison of recovery schemes

方案	时步	机组出力 / MW			总出力 / MW	恢复时间 / min	总恢复时间 / min
		G ₁	G ₂	G ₅			
仅机组出力调整	1	24.26	38.43	19.76	128.73	8.15	38.50
	2	29.08	43.94	24.58	152.29	8.26	
	3	33.64	49.15	29.14	174.55	7.81	
	4	36.86	52.83	32.36	189.92	5.51	
	5	41.98	58.68	37.48	209.81	8.77	
多直流与机组出力优化配置	1	20.50	34.14	16.00	128.60	1.71	22.48
	2	21.51	35.29	17.01	151.70	1.72	
	3	23.01	37.00	18.51	173.52	2.57	
	4	26.28	40.73	21.78	188.79	5.60	
	5	32.63	47.99	28.13	208.75	10.88	

出力调整的方案中,节点11、13的机组参数参考表1中常规机组部分的参数。

在多直流参与的机组出力优化方案中,随着负荷恢复量的增加,各时步机组出力均处于爬坡状态,但是至时步4的恢复完成,负荷增加量的74.4%是由直流系统提供的,传统机组在该恢复过程中出力的变化保证了潮流电压不越限,承担更多的是系统安全维护责任。恢复完成时相应节点处机组和直流馈入系统的功率分配结果如图5所示。由图可知,多直流系统参与的方案中机组出力普遍偏低,整体机组爬坡时间减少41.6%。含多直流参与的系统在

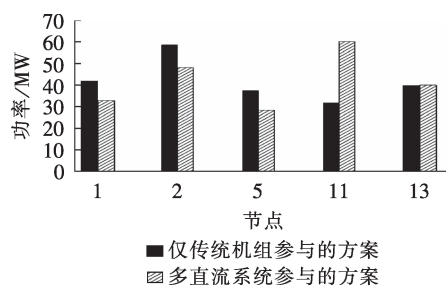


图5 相应节点处机组和直流馈入系统的功率分配结果
Fig.5 Power allocation results of generators and infeed
HVDC systems at corresponding nodes

前4个时步中出力调整耗时较短,明显得益于直流系统迅速的功率调整能力,而时步5的恢复耗时较长,这是因为2条直流线路已达到额定出力上限,机组的整体爬坡能力下降。

3.2 IEEE 118节点系统算例

本节采用文献[18]中的 IEEE 118 节点系统算例进行计算分析。将其中的部分发电机节点 10、25、49、69、89 修改为直流馈入节点,与传统机组相比直流系统的爬坡速率快,单时步直流联络线等效发电机出力调整量为 10~50 MW,除此之外其余参数与传统机组相同。以文献[18]获得的各时步负荷恢复结果为基础,对各机组出力进行优化,对比考虑与不考虑直流运行特性的机组出力,优化结果分别如表 3 和表 4 所示。

值得注意的是,当忽略直流运行特性约束进行机组出力优化时,在时步7中,为了满足潮流需求,需等待节点111的机组启动,延迟了负荷的恢复时

表3 考虑直流运行特性的机组出力优化结果
Table 3 Optimal results of generator output power considering operation characteristic of DC systems

节点	机组出力 / MW					
	1	2	3	...	7	8
10	215.52	244.27	277.60		300.00	300.00
12	39.24	39.24	53.22		101.07	113.15
25	128.05	158.05	188.05		308.05	320.00
26	141.56	141.56	169.53		265.23	289.39
46	12.78	12.78	22.10		54.00	62.05
49	145.87	175.87	205.87		295.87	295.87
59	88.43	88.43	102.41		150.26	162.34
61	85.15	85.15	99.13		146.98	159.06
65	202.59	202.59	233.66		340.01	366.85
66	202.83	202.83	233.90		340.25	367.09
69	307.03	357.03	407.03		607.03	657.03
80	40.23	40.23	71.30		177.64	204.48
89	359.12	409.12	459.12		656.85	656.85
100	143.48	143.48	171.45		267.15	291.31
31	—	—	—		24.25	32.30
87	—	—	—		24.25	32.30
54	—	—	—		15.74	23.79
103	—	—	—		15.74	23.79
111	—	—	—		9.19	17.24

注:表头中的1—8为时步数,后同。

表 4 不考虑直流运行特性的机组出力优化结果
Table 4 Optimal results of generator output power
without considering operation characteristic of
DC systems

节点	机组出力 / MW					
	1	2	3	...	7	8
10	238.85	272.18	300.00		300.00	300.00
12	39.24	39.24	48.78		91.91	103.57
25	128.05	158.05	188.05		308.05	320.00
26	141.56	141.56	160.65		246.89	270.22
46	12.78	12.78	19.14		47.88	55.66
49	145.87	175.87	205.87		304.00	304.00
59	88.43	88.43	97.97		141.09	152.75
61	85.15	85.15	94.69		137.81	149.47
65	202.59	202.59	223.80		319.62	345.54
66	202.83	202.83	224.04		319.86	345.78
69	327.03	397.03	467.03		747.03	805.20
80	40.23	40.23	61.44		157.26	183.18
89	309.12	375.79	442.46		653.99	645.91
100	143.48	143.48	162.57		248.81	272.14
31	—	—	—		21.70	29.48
87	—	—	—		21.70	29.48
54	—	—	—		14.34	22.12
103	—	—	—		14.34	22.12
111	—	—	—		9.22	17.00

间;且在时步 6—8 中,出现了节点 89 处的直流联络线功率在[635,654] MW 范围内反复调整的状况,节点 89 处的直流联络线功率变化曲线如图 6 所示。而当考虑直流运行特性时,在整个出力调整的过程中,直流联络线功率平滑上升,避免了传统机组等待启动以及为了保证潮流安全而进行的直流联络线功率反复调整的状况,实现了直流联络线功率与传统机组出力的协调配合,保证了直流系统运行的安全性。

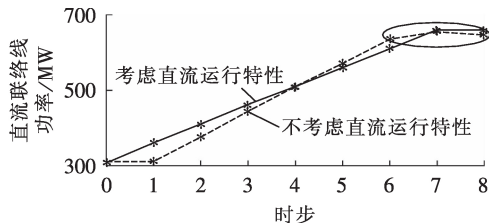


图 6 节点 89 处的直流联络线功率变化曲线

Fig.6 Change curves of DC tie line power at bus 89

除此之外,本节还对比了仅常规机组参与和计及直流运行特性约束这 2 种系统恢复方案的恢复时间,前者的恢复时间为 55.05 min,后者的恢复时间为 51.28 min,后者相较于前者恢复时间节省了 6.8%,可说明计及多直流馈入的受端电网机组出力优化控制比仅依赖机组出力调整的恢复时间减少。计及直流运行特性约束的恢复方案中,恢复效率提升会与负荷离散接入相互影响,由于本文算例都是基于相同的负荷接入方案,所以对整体恢复效率的提升产生了一定的影响,之后会进一步关注面向直流参与恢复的负荷节点优化接入问题。

3.3 计及直流参与对含风电系统的备用影响

在高风电占比的交直流混联电力系统中,机组出力优化决策需要计及高比例风电带来的不确定性影响,其关键因素是机组出力与旋转备用容量之间的平衡,以适应风电的波动,保证恢复的安全性。

在文献[18]所建立的考虑高比例风电的 IEEE 30 节点系统模型和数据的基础上,增加与 3.2 节相同的直流馈入系统,采用本文所提方法可以得到多直流馈入系统与受端机组出力协调的优化结果。设置旋转备用置信水平为 0.95,该情况下时步 1 的恢复结果如表 5 所示。

表 5 时步 1 的系统恢复结果
Table 5 System recovery results of time step 1

频率约束 置信水平	恢复方案	负荷增 量 / MW	风电增 量 / MW	恢复耗 时 / min	负旋转备 用 / MW
0.9	仅传统机组参与	29.8	8	2.45	5.79
	含直流参与	29.9	8	1.00	30.63
0.8	仅传统机组参与	29.8	8	2.45	5.79
	含直流参与	30.7	8	1.00	19.81
0.7	仅传统机组参与	29.8	8	2.45	5.79
	含直流参与	31.2	8	1.00	26.00
0.6	仅传统机组参与	37.8	23	6.40	12.10
	含直流参与	44.1	23	1.00	24.53

对比 4 种不同频率约束置信水平下 2 种方案的恢复结果可以看出,含直流参与的机组出力优化方案可以有效增加风电和负荷恢复量,因为直流系统具有快速的调节能力,可以短时获得更多的负旋转备用量,能有效保证在每一时步中快速弥补风电预测值与实际值之间的差异,达到增加风电负荷恢复量的目的。

4 结论

依靠连接多个电网的高压直流输电线路向受端交流系统提供负荷恢复功率,为多直流馈入电力系统的快速恢复提供了新的解决途径,同时对系统恢复控制提出了更高的要求。为此,本文研究了一种多直流馈入系统的功率调控与受端系统机组出力恢复协调优化的方法,分析并建立了描述直流系统恢复过程中的运行特性方程,以最小化机组调整时间为目标建立各恢复时步的机组出力优化控制模型。算例结果表明,计及多直流馈入的受端电网机组出力优化控制的恢复时间比仅依赖机组出力调整的恢复时间短,直流系统的快速升功率能力能加快负荷恢复速度,减少因旋转备用约束对机组进行功率分配的限制,对计及风电不确定性系统的恢复也具有好的适应性。

参考文献:

[1] 梁博森,林振智,文福拴,等. 发电机组并行恢复动态决策的熵权方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):119-125,159.

- LIANG Bomiao, LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, et al. Dynamic strategy based on entropy weight theory for parallel restoration of generators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 119-125, 159.
- [2] 周光奇, 顾雪平, 马世英, 等. 基于整数线性规划的恢复子系统划分与分区方案的综合评价[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 91-98.
- ZHOU Guangqi, GU Xueping, MA Shiyong, et al. Restoration subsystem division based on integer linear programming and comprehensive evaluation of dividing schemes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 91-98.
- [3] 王大江, 顾雪平, 贾京华. 基于SE-DEA模型的扩展黑启动方案恢复相对效率研究[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 62-67.
- WANG Dajiang, GU Xueping, JIA Jinghua. Relative efficiency of extended black-start restoration plans based on super efficiency data envelopment analysis model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 62-67.
- [4] 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.
- [5] 刘崇茹, 吴旻旻, 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.
- [6] 曹曦, 王洪涛. 大规模电网源荷协调恢复决策与控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1666-1676.
- CAO Xi, WANG Hongtao. Source-load coordinated restoration decision-making and control method for large scale power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1666-1676.
- [7] 赵瑾, 王洪涛, 曹曦. 计及风电条件风险价值的负荷恢复双层优化[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5275-5285, 5526.
- ZHAO Jin, WANG Hongtao, CAO Xi. Bi-level optimization of load restoration considering the conditional value at risk of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5275-5285, 5526.
- [8] 陈彬, 王洪涛, 曹曦. 计及负荷模糊不确定性的网架重构后期负荷恢复优化[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 6-12.
- CHEN Bin, WANG Hongtao, CAO Xi. Load restoration optimization during the last stage of network reconfiguration considering load fuzzy uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 6-12.
- [9] 叶茂, 刘艳, 顾雪平, 等. 大停电背景下考虑系统暂态安全的动态风电穿透功率极限计算[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 167-173.
- YE Mao, LIU Yan, GU Xueping, et al. Calculation of dynamic wind power penetration limit considering system transient safety under background of blackout[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 167-173.
- [10] 周剑, 李建设, 苏寅生. 电网黑启动情况下高压直流输电系统启动条件分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(3): 92-96.
- ZHOU Jian, LI Jianshe, SU Yinsheng. Analysis on start-up conditions of HVDC system in black-start[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(3): 92-96.
- [11] LI Baohong, LIU Tianqi, XU Weihua, et al. Research on technical requirements of line-commutated converter-based high-voltage direct current participating in receiving end AC system's black start[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(9): 2071-2078.
- [12] 李保宏, 刘天琪, 许伟华, 等. 直流参与受端弱交流系统黑启动的技术条件[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 23-29.
- LI Baohong, LIU Tianqi, XU Weihua, et al. Technical conditions of HVDC for involving in black-start of weak receiving AC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 23-29.
- [13] 刘昌盛, 谢云云, 周前, 等. 高压直流输电参与的电网恢复路径优化方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2579-2589.
- LIU Changsheng, XIE Yunyun, ZHOU Qian, et al. Optimization of restoration path for blackout grid with the aid of high-voltage direct current transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2579-2589.
- [14] 陈兵, 汪成根, 李群, 等. 电网黑启动初期优先启动HVDC输电系统的方法[J]. 电力电子技术, 2017, 51(3): 106-110.
- CHEN Bing, WANG Chenggen, LI Qun, et al. The method of priority starting HVDC power transmission system in the early stage of power grid black-start[J]. Power Electronics, 2017, 51(3): 106-110.
- [15] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统短路比的定义和应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 1-8.
- LIN Weifang, TANG Yong, BU Guangquan. Definition and application of short circuit ratio for multi-infeed AC/DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 1-8.
- [16] 周剑, 苏寅生, 王新宝. 云广直流在南方电网黑启动及系统恢复过程的作用[J]. 南方电网技术, 2010, 4(4): 48-51.
- ZHOU Jian, SU Yinsheng, WANG Xinbao. The role of Yunnan-Guangdong ± 800 kV DC project in CSG black-start and recovery process[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(4): 48-51.
- [17] COFFRIN C, VAN HENTENRYCK P. A linear-programming approximation of AC power flows[J]. Inform Journal on Computing, 2014, 26(4): 718-734.
- [18] 蔺呈倩, 王洪涛, 赵瑾, 等. 基于可信性理论的含直流落点系统风电与负荷协调恢复优化[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 410-417.
- LIN Chengqian, WANG Hongtao, ZHAO Jin, et al. Wind power-load coordinated restoration optimization of power system with DC terminal location based on credibility theory[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 410-417.

作者简介:



王洪涛

王洪涛(1973—),男,山东菏泽人,教授,博士研究生导师,博士,从事电力系统恢复控制与新能源并网方面的研究(E-mail: whtwhm@sdu.edu.cn);

蔺呈倩(1992—),女,山东滨州人,硕士,通信作者,从事电力系统恢复决策与控制方面的研究(E-mail: ilsunlcq@163.com);

杨冬(1984—),男,山东日照人,高级工程师,博士,研究方向为电力系统运行与控制(E-mail: yangdong_epri@163.com);

赵艳军(1987—),女,河南新郑人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统分析和电网规划(E-mail: 471187204@qq.com);

龙霏(1985—),女,湖南长沙人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统分析与控制(E-mail: longfei198505@126.com);

王铃(1978—),男,四川绵阳人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统分析及新能源并网(E-mail: wangqian@gddky.csg.cn)。

Coordinated optimization of multi-infeed HVDC system power regulation and generator output restoration

WANG Hongtao¹, LIN Chengqian², YANG Dong³, ZHAO Yanjun⁴, LONG Fei⁵, WANG Qian⁴

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. State Grid Materials Co., Ltd., Beijing 100120, China;

3. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China;

4. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;

5. Electric Power Dispatch and Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China)

Abstract: After the blackout of the receiving-end power grid with multi-infeed HVDC (High Voltage Direct Current) system, it is an important means to speed up the load restoration process to give full play to the regulation ability of HVDC system after its startup. At the same time, higher requirements are put forward for system recovery control. In this context, a coordinated optimization method of multi-infeed HVDC system power regulation and generator output restoration in the receiving-end power grid is proposed. Firstly, the power regulation characteristics of multi-infeed HVDC system are analyzed from two aspects, namely the power regulation characteristics of HVDC system inverter station and the interaction effects between multi-infeed HVDC system and sending- / receiving-end AC systems, and the corresponding power regulation constraint model is established. Then, aiming at minimizing the generator climbing time and the power regulation time of HVDC system, the power adjustment model of multi-infeed HVDC system is set up by comprehensively considering the constraints of HVDC system, sending- / receiving-end systems and operation recovery of conventional generators, and the generator output optimization model of receiving-end system is constructed by considering the constraints of power balance, voltage and frequency security, spinning reserve and so on. On this basis, the problem is modeled as a bi-level mixed integer linear programming model, which realizes the coordinated optimization of traditional generator output and the tie-line power of HVDC system, minimizes the adjustment time of generator output regulation, and achieves the scheduling goal of avoiding small adjustment of HVDC system. Finally, the validity of the proposed model is verified by examples of IEEE 30-bus and 118-bus systems with multi-infeed HVDC system and IEEE 30-bus system with multiple wind farms.

Key words: HVDC power transmission; multi-infeed HVDC; restoration of power system; network reconfiguration; black start; load restoration