

考虑光伏和储能的三阶段联合负荷恢复算法

张 彤, 邹 楠, 杨广忠, 郭金江

(国家电网辽宁省大连供电公司, 辽宁 大连 110004)

摘要: 本文结合光伏电站和储能对三阶段联合负荷恢复优化算法进行了研究。首先分析了负荷恢复中的约束条件,根据在线机组出力、光伏出力以及机组启动功率提出了负荷恢复的上限和下限约束。然后综合考虑负荷恢复的主要目标及系统规模、网架结构、可用发电量、储能和光伏电站等因素,提出适用于黑启动、网架重构和负荷恢复三阶段联合负荷恢复算法。39节点系统验证结果表明所提算法能综合考虑三阶段负荷恢复的作用与目标,提高系统整体恢复效率,实现最优的负荷恢复计划。

关键词: 黑启动; 负荷恢复; 网架重构; 光伏; 储能

DOI: 10.12067/ATEEE1808041 **文章编号:** 1003-3076(2019)07-0073-08 **中图分类号:** TM76

1 引言

大停电后的电力系统恢复一般可分为三个主要阶段:黑启动阶段、网架重构阶段和负荷恢复阶段^[1]。电力系统恢复的最终目的是失电负荷的恢复,这也是贯穿于整个恢复过程的优化目标。在恢复过程不同时期,由于系统规模、网架结构、可用发电量和运行调节能力的变化,不同阶段负荷恢复作用及优化目标不同^[2,3]。

国内外学者已对不同阶段的负荷恢复进行了相关研究。黑启动阶段,文献[4]分析了负荷恢复与机组启动的协调关系,针对平衡机组出力和线路充电两种情况下负荷恢复进行优化求解。文献[5]在机组启动过程交替进行最大恢复负荷量求解和频率仿真校核,保证负荷恢复过程中不会出现状态越限问题。文献[6]分析机组恢复及负荷恢复的交互影响,建立了考虑重要负荷恢复的机组分层协调恢复方案优化数学模型。网架重构阶段,文献[7]采用分时步的恢复策略,根据前一时步系统的实际恢复情况,基于权重分析得到当前时步恢复的负荷及线路。文献[8,9]分别将网络重构问题表示为以重要负荷恢复量和负荷恢复总量最高为目标的非线性优

化问题。负荷恢复阶段是在网络框架已经完全恢复并保持不变的情况下,确定负荷恢复的优化策略。文献[10]将负荷恢复问题松弛为只考虑系统稳态频率的0-1规划问题,采用大规模背包问题的近似解法求得了最大可恢复负荷量。文献[11]提出了考虑冷负荷特性的最优负荷恢复模型,确保在恢复尽可能多负荷的同时,使系统维持合理的运行频率和网络电压水平。文献[12]将网架重构及负荷恢复问题解耦为混整线性规划和连续非线性规划的两阶段优化问题,提高了负荷恢复效率。负荷恢复过程是一个连续的动态过程,各个阶段紧密联系,现有的研究工作都将三个阶段的负荷恢复分开进行相对独立的研究,不利于系统整体恢复效率的提高,无法实现最优的负荷恢复计划,此外黑启动研究选择范围局限于火电和水电等常规机组,没有考虑分布式电源和储能的积极作用^[13]。

为了克服上述研究的不足,本文结合光伏电站和储能对三阶段联合负荷恢复优化算法进行了研究。首先分析了负荷恢复中的约束条件,根据在线机组出力、光伏出力以及启动功率需求提出了负荷恢复的上限和下限约束。然后综合考虑系统规模、网架结构、可用发电量、储能和光伏电站等因素,提

收稿日期: 2018-08-21
基金项目: 国网辽宁省电力有限公司科技项目“基于大连超大容量储能电站的黑启动关键技术研究”(SGLNDL00DKJS1800564)
作者简介: 张 彤(1987-),男,辽宁籍,工程师,硕士,研究方向为电力系统安全防御与恢复控制;
邹 楠(1980-),男,辽宁籍,工程师,硕士,研究方向为电力系统安全防御与恢复控制。

出适用于黑启动、网架重构和负荷恢复三阶段联合负荷恢复算法。三阶段联合方法的应用提高了负荷恢复效率,可以帮助运营商优化负荷恢复计划。

2 负荷恢复约束条件

为确保电力系统的稳定运行,在整个负荷恢复过程中必须满足以下约束条件。

(1) 稳态电压约束

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_s \quad (1)$$

式中, V_{\min} 和 V_{\max} 表示最小和最大允许稳态电压; V_i 表示第 i 个变电站的稳态电压; N_s 表示变电站的数量。

(2) 暂态电压约束

$$V_{t_{\min}} \leq V_{t_i} \leq V_{t_{\max}} \quad i = 1, 2, \dots, N_s \quad (2)$$

式中, $V_{t_{\min}}$ 和 $V_{t_{\max}}$ 表示最小和最大允许暂态电压; V_{t_i} 表示第 i 个变电站的暂态电压。

(3) 恢复路径电流约束

$$I_j \leq I_{\max}^j \quad j = 1, 2, \dots, N_e \quad (3)$$

式中, I_{\max}^j 表示第 j 条线路的最大允许电流; I_j 表示第 j 条线路的电流; N_e 表示恢复路径上的线路数量。

(4) 频率波动约束

$$|\Delta f| \leq \sigma_t \quad (4)$$

式中, $|\Delta f|$ 表示最大频率波动; σ_t 表示允许的瞬态频率波动。

(5) 逐步恢复的负荷不是连续值而是一组离散值,并且每一步的恢复负荷都有最大值。最大频率和电压偏差的约束决定了可以在单步恢复的最大负荷。单步最大负荷增量取决于在线机组的负荷类型、网络拓扑、激励系统和调速系统等。PJM 公司的运行经验表明,如果最大负荷增量不超过在线机组额定容量的 5%,电源系统可以保持频率和电压稳定^[14]。

$$L_{im} \leq 0.05 \sum_{i=1}^{N_o} Gr_i \quad (5)$$

式中, L_{im} 表示单步最大负荷增量; Gr_i 表示第 i 个在线机组的额定功率; N_o 表示在线机组个数。

(6) 频率控制的备用功率的确定必须考虑许多方面,例如恢复负荷的最大波动和可再生能源输出的预测误差。太阳能电站的预测输出和实际输出差异必须由常规电源和储能承担^[15]。当太阳能电站预测输出大于或者小于实际输出时,电力系统必须具有足够的正储备和负储备功率来控制频率。

$$P_N \geq \sum_{i=1}^{N_r} Fr_i^- + \sum_{j=1}^{N_l} FL_j^- \quad (6)$$

$$P_p \geq \sum_{i=1}^{N_r} Fr_i^+ + \sum_{j=1}^{N_l} FL_j^+ \quad (7)$$

式中, P_N 表示由具有一次和二次频率控制的传统黑启动机组 (Black Start generation, BS)、非黑启动机组 (Non-Black Start generation, NBS) 和储能单元提供的负有功率储备; P_p 表示具有一次和二次频率控制的传统 BS、NBS 和储能单元提供的正有功功率储备; Fr_i^+ 和 Fr_i^- 分别表示第 i 个光伏的最大正波动和最大负波动; FL_j^+ 和 FL_j^- 分别表示第 j 个负荷的最大负波动和最大正波动; N_r 表示光伏个数; N_l 表示负荷个数。

(7) 在线机组的爬坡率必须大于备用功率和负荷增量的总和,即

$$G_{\text{up}} \geq \max(P_N, P_p) + L_{im} \quad (8)$$

式中, G_{up} 表示在线机组的爬坡率; L_{im} 表示该步恢复负荷增量。

(8) 负荷恢复上限 L_{ru} 需满足保证有充足的启动功率启动非黑启动机组,即

$$L_{\text{ru}} \leq \sum_{i=1}^{N_g} B_i + \sum_{j=1}^{N_b} NB_j + \sum_{q=1}^{N_q} S_q - P_p - \sum_{k=1}^{N_k} Gs_k - \sum_{m=1}^{N_s} Lr_m \quad (9)$$

式中, B_i 表示第 i 个 BS 机组的最大有功输出; N_g 表示 BS 的数目; NB_j 表示第 j 个 NBS 机组的最大有功输出; N_b 表示已经并网的 NBS 机组的数量; Gs_k 表示第 k 个 NBS 机组的启动功率; N_k 表示在启动过程中 NBS 机组的个数; S_q 表示第 q 个储能放电量; N_q 表示储能的个数; Lr_m 表示第 m 个变电站恢复的负荷总量; $\sum_{m=1}^{N_s} Lr_m$ 表示已经恢复的总负荷。

(9) 负荷恢复下限 L_{rl} 需满足网内功率平衡约束:

$$L_{\text{rl}} \leq \sum_{i=1}^{N_o} Gm_i - P_N \quad (10)$$

式中, Gm_i 表示第 i 个在线机组的最小有功输出。

(10) 储能容量约束

$$W(t + \Delta t) = W(t) - SQ(t) \quad (11)$$

式中, W 表示储能 SOC; $SQ(t)$ 表示 t 时刻储能放电容量。

(11) 储能经过放电需满足最低 SOC 要求:

$$W(t) \geq \underline{SOC} \quad (12)$$

式中, \underline{SOC} 表示 SOC 下限约束。

3 三阶段负荷联合恢复方法

3.1 黑启动阶段

三阶段负荷恢复目的如图 1 所示。在黑启动阶段和网架重构阶段,恢复部分必要负荷平衡机组出力 and 吸收恢复路径中产生过多的无功功率,保证系统中有功平衡和无功平衡,维持系统稳定。在负荷恢复时,随着更多机组的恢复,主网架已基本建立,系统具有足够大的发电能力和更强的调节特性,此时的恢复任务是在满足安全约束条件下,尽快尽可能多地恢复负荷,以减少经济损失和社会影响。

主要内容	恢复被启动机组 恢复充电路径上 负荷	恢复变电站 恢复重要负荷	恢复负荷供电 恢复其他线路
恢复阶段	黑启动	网架重构	负荷恢复
负荷恢复 目的	维持功率平衡	恢复尽可能多 重要负荷	尽快恢复 所有负荷

图 1 三阶段负荷恢复目的

Fig. 1 Purpose of load restoration at three stages

黑启动阶段的主要目标是根据 BS 机组的输出功率重新启动尽可能多的 NBS 机组。BS 机组开始重新启动,按照预定的启动顺序,通过最短恢复路径向 NBS 机组发送启动功率。若同时启动多个 NBS,可为后续的网架重构提供更大的功率支持,加快系统恢复进程^[16]。本文考虑同时采用水电机组和储能作为 BS 实现并行启动。黑启动过程中,BS 的输出功率不得低于最小输出功率以确保稳定运行,同时为了确保频率和电压波动在可允许范围内,需恢复一定数量的负荷^[17]。图 2 为黑启动阶段的恢复流程图,具体流程如下:

- (1)根据 NBS 启动参数确定启动顺序^[18]。
- (2)根据 BS 的输出功率和 NBS 的启动功率,确定初始阶段可同时启动的 BS 数目。
- (3)根据最短路径算法确定 NBS 和 BS 之间的恢复路径^[19],然后确定该路径对应的负荷集合 LRP 。
- (4)根据式(9)和式(10)确定负荷恢复上限 L_m 和下限 L_n 。
- (5)根据在线机组额定容量的 5% 确定单步最大负荷增量 L_{im} 。
- (6)将 LRP 中小于 L_{im} 的负荷移入待恢复集合 LS 。
- (7)如果集合 LS 中有待恢复的负荷,则根据重

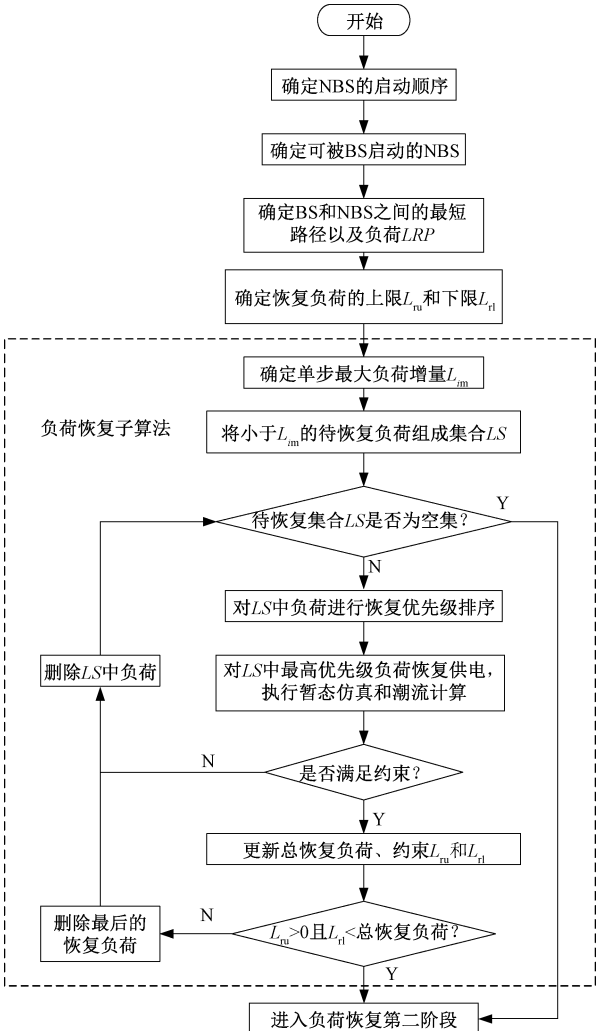


图 2 黑启动阶段负荷恢复流程图

Fig. 2 Flow chart of load restoration at black start stage

要性和容量确定负荷优先级权重,按照权重值对负荷进行降序排列。如果集合 LS 为空集,则进入网络重构阶段。

(8)优先恢复权重最高的负荷 L_{sh} , 执行暂态仿真和潮流计算,获得系统稳态/瞬态频率和电压波动。如果频率或电压波动超过允许范围,则从集合 LS 中删除 L_{sh} , 总恢复负荷保持不变,否则总恢复负荷添加 L_{sh} 。

(9)如果总恢复负荷小于 L_n , 则算法继续搜索集合 LS 中的下一个负荷,直到更新后总恢复负荷不大于 L_m 。

3.2 网架重构阶段

完成黑启动阶段后,BS 机组和 NBS 机组之间的恢复路径通电,并形成基本网架。基于该初始网架,在线机组增加的输出可用于继续恢复骨干网络、负荷中心变电站以及线路。恢复供电的重要变电站

可为下一阶段大规模负荷恢复奠定良好的基础。需根据变电站节点权重因子确定变电站的恢复顺序^[20],同时根据负荷优先级和在线机组的可用功率,对已恢复变电站中的失电负荷进行供电。网架重构阶段负荷恢复流程图如图 3 所示,详细计算步骤如下:

- (1)将所有未通电的变电站作为候选变电站。
- (2)根据主变压器容载比、出线回路数和输出功率计算候选变电站的节点权重因子。

$$\left\{ \begin{aligned} J &= \frac{KP_o(1+r)}{S_B\eta} \\ \eta &= \frac{S_N}{\sqrt{P^2+Q^2}} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式中, K 表示出线回路数; P_o 表示输出功率; r 表示节点重要负荷比例系数; S_B 表示基准值 $100\text{MV}\cdot\text{A}$; η 表示变压器容载比; P 表示节点有功负荷; Q 表示节点无功负荷; S_N 表示主变压器额定容量。

- (3)通过最短路径算法计算已恢复网架和具有最高排名值的候选变电站之间的最短路径^[21]。
- (4)将最短路径作为恢复路径,恢复候选变电站,根据节点权重因子重新计算剩余候选变电站的优先级,并更新网络拓扑。

- (5)当在线机组数量变化后,需更新单步负荷增量约束 L_{im} 。
- (6)通过黑启动阶段中的子算法恢复失电负荷。

(7)如果恢复的负荷超过可恢复负荷上限 L_m ,则负荷恢复过程必须暂停直到新的 NBS 开始向电网注入电力。

(8)如果所有 NBS 机组都已接收到启动功率,则使用黑启动阶段中的子算法继续恢复失电负荷。

(9)当所有变电站都通电时,网络重构阶段负荷恢复过程终止。

3.3 负荷恢复阶段

网络重构完成后负荷恢复的目标是在满足系统运行安全约束下在最短的时间内尽可能多地恢复供电负荷^[22]。根据优先级和大小对受最大负荷增量限制的可恢复负荷进行排序,然后实施贪算算法确定负荷恢复序列。在恢复负荷之前,通过执行暂态仿真和潮流计算保证系统频率和节点电压不越限、线路上功率不过载。负荷恢复阶段的负荷恢复流程图如图 4 所示,详细的计算过程如下:

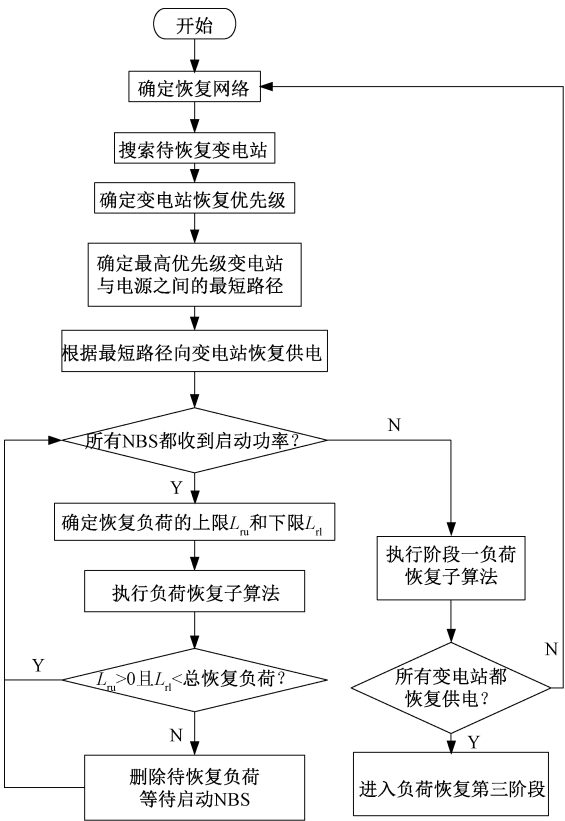


图 3 网架重构阶段负荷恢复流程图
Fig. 3 Flow chart of load restoration at network reconfiguration stage

- (1)根据在线机组确定最大负荷增量 L_{im} 。
- (2)将小于 L_{im} 的未恢复负荷放入集合 LR 。
- (3)集合 LR 中的负荷根据负荷优先级和负荷大小进行排序。可以在单步操作恢复的负荷集 LT 表示为:

$$\left\{ \begin{aligned} LT &= \max(\sum_{i=1}^{N_{lt}} L_{t_i}) \quad N_{lt} \leq N_{lr} \\ LT &\leq L_{im} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

式中, L_{t_i} 表示 LT 集合中的第 i 个负荷; i 表示排名值索引; N_{lt} 表示 LT 中可恢复负荷的总数; N_{lr} 表示 LR 中未恢复负荷的总数。

- (4)假设恢复 LT 中全部负荷,执行暂态仿真和潮流计算检查是否满足约束。
- (5)如果所有操作约束都在可接受的范围内,则可以恢复 LT , 否则删除 LT 中优先级最低的负荷,再次进行约束校验,直到确定满足约束条件的待恢复负荷。
- (6)当所有负荷恢复或达到所有发电机的最大输出时,负荷恢复过程终止。

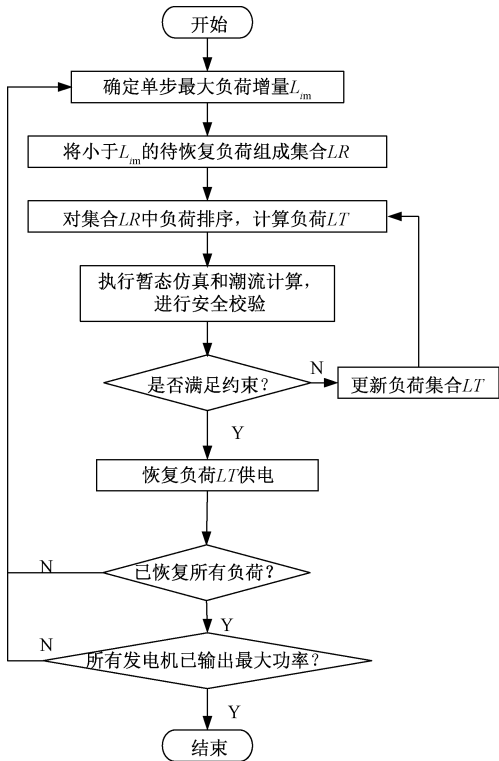


图4 负荷恢复阶段负荷恢复流程图
Fig. 4 Flow chart of load restoration at load restoration stage

4 实验和结果

本文采用修改后的新英格兰 39 节点网络验证所提的负荷恢复算法,如图 5 所示。图 5 中,G1 是额定容量为 120MW 的水力发电厂,其爬坡率和最小输出功率为 20MW/min 和 12MW;G4 是额定容量为 120MW 储能,SOC 下限为 20%;G2 和 G6 分别是 300MW 和 200MW 的火力发电厂;发电机 G3 是额定容量为 55MW 的光伏电站;原网络中其余发电机被替换为负荷;G1 和 G4 作为 BS,G2、G3、G5 和 G6 作为 NBS,具体数据如表 1 所示。最大负荷波动为恢复负荷的±10%,光伏电站的波动为±5%。线路通电操作时间、光伏电站预测时间跨度和负荷恢复操作时间都假设为 5min。

4.1 黑启动阶段

在黑启动阶段同时启动 G1 和 G4 作为黑启动电源,加快恢复过程。G1 重新启动后激励恢复路径 S39-S9-S8-S7-S6-S31,最终经过变电站 S31 将功率传输到 G2。G4 重新启动后激励恢复路径 S34-S20-S19-S16-S21-S22-S35,最终经过变电站 S35 将输出功率传输到 G5。图 5 中的虚线表示恢复路径,表 2

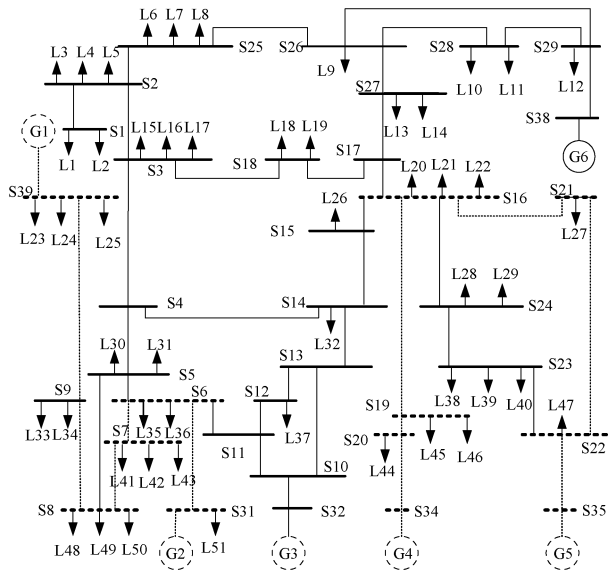


图5 黑启动阶段的恢复路径
Fig. 5 Recovery path at black start stage

表 1 NBS 发电机的数据

Tab. 1 Data of NBS

发电机	最大输出 /MW	最小输出 /MW	启动时间 /min	启动功率 /MW	爬坡率 /(MW/min)
G2	300	80	70	12	13
G3	55	0	8	3	4
G5	150	65	50	5	10
G6	200	70	60	5	11.5

为恢复路径上的负荷。根据负荷恢复上限、下限约束以及最大单步负荷增量,可知单步恢复负荷不能超过 30MW。负荷对 (L23, L46)、(L25, L45)、(L33, L27) 和 (L42, L47) 之和小于 30MW,可以逐步被恢复。黑启动阶段负荷恢复过程如表 3 所示。由表 3 可知,在 25min,G2 已接收到启动功率,开始考虑通过恢复变电站 S38 实现 G6 启动。G5 则到 30min 才接收到启动功率,在 20~35min 内,由于在线发电机组可用于恢复负荷的功率不足,因此总恢复负荷保持不变,黑启动阶段共恢复 115.3MW 失电负荷。

4.2 网架重构阶段

网架重构阶段负荷恢复过程如表 4 所示。在第二恢复阶段开始时,G2 和 G5 已接收来自 G1 和 G4 的启动功率并开始重新启动。G1 通过最短恢复路径 S39-S1-S2-S25-S26-S29-S38 输出启动功率到 G6,此操作需耗时 35min。在这段时间内,即 30~65min,G1 的增加输出可用于恢复已通电变电站中的负荷。在 G5 接收到启动功率后,G4 通过 S15-

表 2 黑启动阶段恢复路径上的负荷

Tab. 2 Load of recovery path at black start stage

变电站	负荷 编号	负荷 容量/MW	优先级
S39	L23	20. 0	1
	L24	22. 5	2
	L25	19. 9	2
S9	L33	18. 6	1
	L34	22. 2	2
S8	L48	23. 0	2
	L49	24. 3	1
	L50	21. 6	2
S7	L41	39. 2	1
	L42	18. 8	2
	L43	22. 8	2
S6	L35	22. 0	1
	L36	21. 9	2
S31	L51	35. 4	2
S20	L44	15. 0	1
S19	L45	8. 0	1
	L46	9. 0	2
S16	L20	20. 0	1
	L21	15. 0	2
	L22	12. 0	2
S21	L27	11. 0	1
S32	L47	10. 0	2

表 3 黑启动阶段负荷恢复过程

Tab. 3 Load restoration at black start stage

时间 /min	恢复 变电站	恢复 负荷	总恢复 负荷/MW	目标 变电站
0~5	S39/S34	L23/L46	29. 0	S31/S35
5~10	S9/S20	L33/L45	55. 6	S31/S35
10~15	S8/S29	L25/L27	86. 5	S31/S35
15~20	S7/S16	L42/L47	115. 3	S31/S35
20~25	S6/S21	—	115. 3	S31/S35
25~30	S31/S22	—	115. 3	S38/S35
30~35	S1/S35	—	115. 3	S38/S24

S14-S13-S10-S32 启动光伏电站 G3。G3 和 G5 分别在 80min 和 85min 完成启动过程,开始向电网注入电力。整个电力系统恢复过程中光伏电站的预测输出功率超过 20MW,可视为稳定电源。G1、G5 和 G3 增加的输出可继续恢复重要变电站以及高优先级负荷。G4 启动 G3 后继续放电恢复部分负荷,在 85min 达到最低容量约束时停止放电,等待负荷全面恢复后再进行充电操作。G2 和 G6 分别在 100min 和 125min 完成启动过程,开始向电网注入

电力。在全部机组恢复后,逐步恢复所有变电站,期间最大负荷增量增加到 43. 8MW。

表 4 网架重构阶段负荷恢复过程

Tab. 4 Load restoration at network reconfiguration stage

时间 /min	恢复 变电站	恢复 负荷	总恢复 负荷 /MW	目标 变电站	预测光 伏功率 /MW
30~35	S1	L1	128. 4	S38	—
35~40	S2	—	128. 4	S38	—
40~45	S25	L6	139. 7	S38	—
45~50	S26	L9	156. 8	S38	—
50~55	S28	—	156. 8	S38	—
55~60	S29	L12	167. 4	S38	—
60~65	S38	—	167. 4	S32	—
65~70	S11	—	167. 4	S32	—
70~75	S10	—	167. 4	S32	—
75~80	S32	—	167. 4	S32	—
80~85	S24	L3	185. 4	S32	—
85~90	S23	L39、L10	204. 6	S12	23
90~95	S15	L36、L41	222. 8	S12	35
95~100	S14	L32、L44	251. 6	S12	22
100~105	S13	L48	269. 7	S12	28
105~110	S12	L37	292. 3	S4	30
110~115	S17	L20、L28	321. 4	S4	25
115~120	S18	L18、L13、L36	345. 8	S4	22
120~125	S3	L15、L7、L4	372. 9	S4	21
125~130	S4	L3、L31、L34、L35	392. 6	S4	18

4.3 负荷恢复阶段

负荷恢复阶段的目标是在最短的时间内尽可能地恢复负荷。未恢复的负荷根据负荷优先级和负荷大小进行排名,整个负荷恢复过程在 160min 后结束。该阶段的负荷恢复过程如表 5 所示。

表 5 负荷恢复阶段负荷恢复过程

Tab. 5 Load restoration at load restoration stage

时间/min	恢复负荷	总恢复负荷/MW
135~140	L5、L24、L34、L29	446. 7
140~145	L8、L11、L40、L50	550. 4
145~150	L2、L38、L51、L48	575. 4
150~155	L49、L45、L14、L21、L35	604. 9
155~160	L16、L19、L22、L43	658. 4

4.4 对比分析

分别单独考虑黑启动阶段、重构阶段和负荷恢复阶段进行负荷恢复优化,与本文所提三阶段联合负荷恢复算法进行对比分析,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,三阶段单独考虑负荷恢复无法实现全局的最优负荷顺序,导致在 210min 后才对全部负荷恢复供电,造成更多的经济损失。本文所提算法在 160min 恢复全部负荷,在黑启动阶段充分发挥储能灵活调节的电源特性,实现就近启动和供电,网

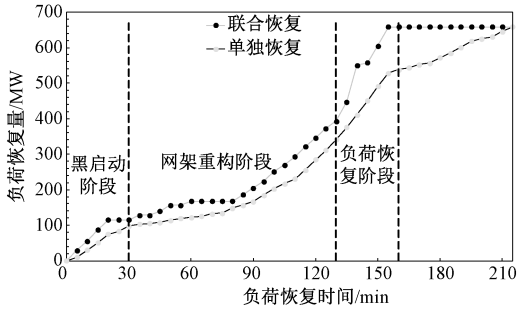


图6 负荷恢复效率比较

Fig. 6 Comparison of load recovery efficiency

络重构阶段可以将光伏作为被启动机组,在负荷恢复过程中发挥积极作用,将三个阶段的负荷恢复看作动态过程,综合考虑当前操作的负荷恢复效应和对后续阶段的影响,实现了全局的最优负荷恢复计划。

5 结论

本文提出了一种考虑可再生能源和储能的三级电力系统恢复方法。分析了负荷恢复中的约束条件,根据在线机组出力、光伏出力以及启动功率需求提出了每个阶段的负荷恢复的上限和下限约束。在黑启动阶段,优先恢复机组启动路径上的负荷。重构阶段根据在线机组容量优先向已恢复重要变电站中的负荷供电。负荷恢复阶段则根据负荷容量和重要性进行排序恢复。所提算法充分使用储能和光伏电站的输出功率,将三个阶段的负荷恢复看作动态过程,综合考虑当前操作的负荷恢复效应和对后续阶段的影响,实现全局的最优负荷恢复计划。下一阶段需研究光储联合系统作为黑启动电源的自启动策略,进一步提高黑启动效率。

参考文献 (References):

[1] Bahrman M, Bjorklund P E. The new black start: System restoration with help from voltage-sourced converters [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2014, 12 (1): 44-53.

[2] 龚薇, 刘俊勇, 贺星棋, 等 (Gong Wei, Liu Junyong, He Xingqi, et al.). 电力系统恢复初期考虑动态特性的负荷恢复优化 (Load restoration optimization considering dynamic constraints during initial period of power system recovery) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2014, 38 (9): 2441-2448.

[3] 陈彬, 王洪涛, 曹曦 (Chen Bin, Wang Hongtao, Cao Xi). 计及负荷模糊不确定性的网架重构后期负荷恢

复优化 (Load restoration optimization during the last stage of network reconfiguration considering load fuzzy uncertainty) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2016, 40 (20): 6-12.

[4] 瞿寒冰, 刘玉田 (Qu Hanbing, Liu Yutian). 机组启动过程中的负荷恢复优化 (Load restoration optimization during unit start-up stage) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2011, 35 (8): 16-21.

[5] 刘映尚, 吴文传 (Liu Yingshang, Wu Wenchuan). 黑启动过程中的负荷恢复 (Load recovery during power system blackstart) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2007, 31 (13): 17-22.

[6] 杨可, 刘俊勇, 贺星棋 (Yang Ke, Liu Junyong, He Xingqi). 黑启动中考虑动态过程的负荷最优恢复 (Optimal load restoration considering dynamic constraints during blackstart) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2009, 29 (10): 88-92.

[7] 钟慧荣, 顾雪平 (Zhong Huirong, Gu Xueping). 黑启动恢复中网架重构阶段的负荷恢复优化 (Optimization of load restoration during network reconfiguring process of black-start restoration) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2011, 39 (17): 26-32.

[8] 魏智博, 刘艳, 顾雪平 (Wei Zhibo, Liu Yan, Gu Xueping). 基于DPSO算法以负荷恢复为目标的网络重构 (DPSO algorithm based network reconfiguration of power systems for maximizing load recovery efficiency) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2007, 31 (1): 38-42.

[9] 李亚男 (Li Yanan). 不同网络重构方案下的负荷恢复研究 (Research on load restoration under different reconfiguration schemes) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2012.

[10] 周云海, 闵勇 (Zhou Yunhai, Min Yong). 负荷的快速恢复算法研究 (Optimal algorithm for fast load recovery) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2003, 23 (3): 74-79.

[11] 程改红, 徐政 (Cheng Gaihong, Xu Zheng). 基于粒子群优化的最优负荷恢复算法 (Optimal load restoration based on particle swarm optimization) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2007, 31 (16): 62-65.

[12] 廖诗武, 姚伟, 文劲宇 (Liao Shiwu, Yao Wei, Wen Jinyu). 电力系统恢复后期网架重构和负荷恢复的两阶段优化方法 (Two-stage optimization method for network and load recovery during power system restoration) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE),

- 2016, 36 (18): 4873-4882.
- [13] 吴杰, 温晨阳 (Wu Jie, Wen Chenyang). 基于分时电价的光伏-储能系统容量优化配置 (Optimal allocation of PV and accumulator system based on time of use price) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (1): 23-30.
- [14] Kafka R J. Review of PJM restoration practices and NERC restoration standards [A]. Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century [C]. Pittsburgh, PA, USA, 2008. 1-5.
- [15] 朱永强, 郝嘉诚, 赵娜 (Zhu Yongqiang, Hao Jiacheng, Zhao Na). 能源互联网中的储能需求、储能的功能和作用方式 (Demands, functions and action manners of energy storage in Energy Internet) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (2): 68-75.
- [16] 顾雪平 (Gu Xueping). 电力系统扩展黑启动方案的研究 (Extended black-start schemes of power systems) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2011, 31 (28): 25-32.
- [17] 李凯, 顾雪平 (Li Kai, Gu Xueping). 考虑重要负荷恢复的机组分层协调恢复优化 (Coordinated two-layer unit restarting considering important load recovery after blackout) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2017, 45 (18): 54-61.
- [18] 朱海南, 刘玉田, 邱夕兆 (Zhu Hainan, Liu Yutian, Qiu Xizhao). 考虑机组恢复成功率的黑启动阶段待恢复机组优选 (Optimal restoration unit selection considering success rate during black start stage) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2013, 37 (22): 28-34.
- [19] 刘翔宇, 胡雪凯 (Liu Xiangyu, Hu Xuekai). 考虑线路操作时限和恢复概率的机组启动路径优化 (Optimization of unit restoration sequence considering line start-up time and restoration probability) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2016, 44 (10): 24-29.
- [20] 赵达维, 刘天琪, 唐健 (Zhao Dawei, Liu Tianqi, Tang Jian). 基于路径和节点权重因子的黑启动路径寻优新方法 (A new method for black-start path optimization based on path and node weight factors) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2012, 36 (20): 13-18.
- [21] 李通, 薛峰 (Li Tong, Xue Feng). 基于 Dijkstra 算法的电网分区方法研究 (Power network partitioning method based on Dijkstra algorithm) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2018, 46 (5): 159-165.
- [22] 张志毅, 陈允平 (Zhang Zhiyi, Chen Yunping). 电力系统负荷恢复问题的混合遗传算法求解 (Hybrid genetic algorithm for power system load restoration) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2007, 22 (2): 105-109.

Three-stage combined load recovery algorithm considering photovoltaic and energy storage

ZHANG Tong, ZOU Nan, YANG Guang-zhong, GUO Jin-jiang
(State Grid Dalian Power Supply Company, Dalian 110004, China)

Abstract: Considering photovoltaic station and energy storage, the paper discusses three-stage combined load recovery optimization algorithm. Firstly, the constraint conditions of load recovery are analyzed, and the upper and lower limits of load recovery are proposed according to the output of on-line generator and photovoltaic, and also the start-up power demand. Then, the paper proposes a three-stage combined load recovery algorithm applicable to system start-up, network frame reconstruction and subsequent recovery according to system scale, grid structure, usable power generation, operation regulation capacity, energy storage and photovoltaic station. The verification results of the New England 39 node system show that the proposed algorithm has higher load recovery efficiency.

Key words: black start; load recovery; network reconfiguration; photovoltaic; energy storage