

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220864

考虑系统恢复能力的快速切负荷机组最优布点策略

李明明^{1,2}, 孙磊^{1,2}, 丁明^{1,2}

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009;
2. 新能源利用与节能安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要: 具有快速切负荷(fast cut back, FCB)功能的火电机组在电力系统发生大停电事故后能够维持厂用电运行并迅速为停电区域供电, 是一种性能优异的黑启动电源。FCB机组的布点策略会影响电力系统的恢复能力。在此背景下, 建立了考虑系统恢复能力的FCB机组最优布点模型。首先, 分析了FCB机组和非黑启动机组在电力系统恢复过程中的功率特性及其差异。然后, 以最大化系统恢复能力为目标函数, 考虑机组出力特性、FCB机组改造台数、恢复过程中电力潮流等约束条件, 构建了FCB机组最优布点优化模型。采用线性化处理方法, 将所提出的模型转化为混合整数线性规划模型, 并采用高效商业求解器求解。最后, 采用IEEE 39节点系统算例和IEEE 118节点系统算例验证了所提模型的有效性。算例结果表明, 所提FCB机组布点方案能够有效提升系统的恢复能力。

关键词: 电力系统恢复; 快速切负荷机组; 最优布点; 混合整数线性规划

An optimal location strategy of units with FCB function considering the restorability of power systems

LI Mingming^{1,2}, SUN Lei^{1,2}, DING Ming^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Anhui Province Key Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving, Hefei 230009, China)

Abstract: Thermal power units with fast cut back (FCB) function, which can continue to provide power to auxiliary equipment in power plants and supply power to the power outage area quickly after a blackout accident occurs, are excellent black start sources. The location strategy of FCB units can affect the restorability of the power system. Given this background, an optimal location model of FCB units considering system restorability is proposed. First, the power generation characteristics of the FCB unit and non-black start unit in the power system restoration process as well as the differences of power generation characteristics between these units are analyzed. Second, the optimal location model of FCB units is proposed to maximize power system restorability, and relevant constraints, such as power generation characteristics of units, the number of thermal units to be upgraded to FCB ones, and the power flows in the power system restoration process, are taken into account. The optimal location model of FCB units is constructed. The proposed model is reformulated as a mixed-integer linear programming one by employing linearization methods, and efficiently solved by commercial solvers. Finally, the IEEE 39-bus and 118-bus power systems are employed to verify the effectiveness of the proposed model. The simulation results show that the proposed location strategy of FCB units can effectively improve the restorability of power systems.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51907043).

Key words: power system restoration; fast cut back unit; optimal location; mixed integer linear programming

0 引言

近年来, 由于极端天气、网络攻击和人为破坏

等因素导致多个国家和地区发生了大停电事故^[1-5], 给社会和经济造成了重大损失。大停电事故发生后合理的恢复策略有助于提高系统的恢复能力, 加快电力系统恢复速度, 减少因停电事故导致的损失。因此, 如何提高电力系统的恢复能力是一个迫切需

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51907043)

要研究的重要问题。

电力系统恢复方案通常是以水电机组作为黑启动电源, 水电机组自启动后逐步恢复不具备自启动能力的机组, 进而恢复整个电力系统。然而由于水资源分布的不均衡, 在部分地区水电机组的建设受到限制。具有快速切负荷(fast cut back, FCB)功能的火电机组(以下简称为 FCB 机组)在外部电网发生故障后能够与电网解列, 甩掉全部对外供电负荷, 并保持锅炉在最低负荷运行, 维持带厂用电运行, 其等待并网时间几乎为 0, 可以快速向系统输出发电功率, 加快电力系统的恢复, 因此 FCB 机组是一种优异的黑启动电源^[6]。近年来, FCB 技术迅速发展, 如 2013 年我国广东 1000 MW 火电机组^[7]利用 FCB 技术完成黑启动试验; 2018 年老挝 3×626 MW 燃煤电站触发 FCB 动作后实现黑启动功能^[8]; 2019 年我国上海 2×1000 MW 超临界机组利用 FCB 技术完成黑启动实验^[9]。FCB 机组扩大了黑启动电源在地理位置和容量上的选择范围, 同时 FCB 机组的位置和容量会影响系统的恢复效率, 因此, 有必要开展 FCB 机组最优布点策略的研究。

国内外已开展了关于 FCB 机组优化布点模型的研究。文献[6]提出了以 FCB 机组作为黑启动电源的电力系统恢复策略, 并建立了 FCB 机组在系统恢复阶段的稳态模型。文献[10]对 FCB 机组配置方案进行经济性评估, 建立了经济指标函数, 确定了经济性最优的 FCB 机组配置方案。文献[11]以电力系统中机组恢复时间最短为目标函数, 建立了 FCB 机组优化布点模型, 并引入序优化理论优化得到最优的布点方案。文献[12]考虑 FCB 机组布点方案的投资成本和经济效益, 建立了布点方案的经济效益指标, 并基于递推法计算结果, 得到同时满足安全性和经济性要求的 FCB 机组最优布点方案。虽然在电力系统恢复过程中应充分考虑各阶段的潮流约束, 然而现有研究中鲜有文献在制定 FCB 机组最优布点策略时综合考虑恢复过程中的潮流约束, 且现有 FCB 机组最优布点方案未考虑节点有功和无功功率平衡约束。

本文提出了一种考虑系统恢复能力的 FCB 机组最优布点策略, 旨在将选取的常规火电机组改造为 FCB 机组使其成为黑启动电源。所构建的模型以最大化电力系统恢复能力为目标函数, 并考虑机组出力特性、FCB 机组改造台数、节点有功和无功功率平衡约束、恢复过程中电力潮流等约束条件。采用线性化方法将所提出的模型转换为混合整数线性规划模型。

1 电力系统恢复过程中的机组模型

1.1 FCB 机组

FCB 机组在电力系统发生大停电事故后能够维持带厂用电运行, 且具备快速向系统输出功率的能力, 是一种理想的黑启动电源。FCB 机组作为黑启动电源时无需启动功率。FCB 机组在电力系统恢复阶段的功率输出曲线如图 1 所示。

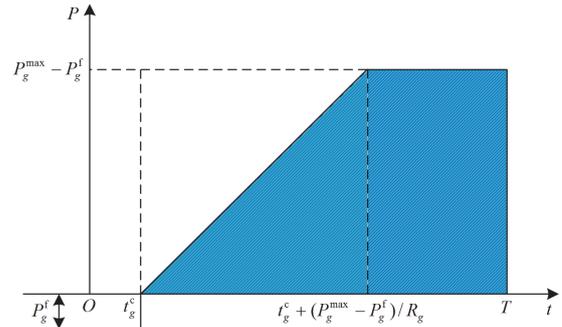


图 1 FCB 机组在电力系统恢复阶段的功率输出曲线
Fig. 1 Curve of power generation outputs of an FCB unit in the power system restoration process

在图 1 中, 假设停电时刻为恢复过程的起始时刻, 用 $t = 0$ p.u. 表示。 R_g 、 P_g^{\max} 、 P_g^f 和 t_g^c 分别为机组 g 的爬坡速率、最大输出功率、厂用电功率和等待并网时间; T 为恢复时长。FCB 机组在并网前维持厂用电运行, 在 t_g^c 时刻开始爬坡并向系统输出功率, 在 $t_g^c + (P_g^{\max} - P_g^f)/R_g$ 时刻, 其输出功率达到最大值, 即机组的最大输出功率与厂用电功率之差。在系统恢复阶段, FCB 机组发出的有功电量 W_g^{FCB} 为图 1 中阴影部分面积, 可由式(1)表示。

$$W_g^{\text{FCB}} = (P_g^{\max} - P_g^f) \left(T - t_g^c - \frac{(P_g^{\max} - P_g^f)}{R_g} \right) + \frac{(P_g^{\max} - P_g^f)^2}{2R_g}, \quad \forall g \in G^{\text{FCB}} \quad (1)$$

式中, G^{FCB} 为 FCB 机组集合。

1.2 非黑启动机组

不具备自启动能力的发电机组称为非黑启动机组(non-black start unit, NBSU), 非黑启动机组需要从电力系统获取一定的启动功率才能够启动^[13-15]。非黑启动机组的启动功率曲线和功率输出曲线分别如图 2 和图 3 所示。在图 2 中, t_g^{st} 和 P_g^{st} 分别为非黑启动机组 g 的启动时间和启动功率。



图2 非黑启动机组的启动功率曲线

Fig. 2 Curve of start-up power of a non-black start unit

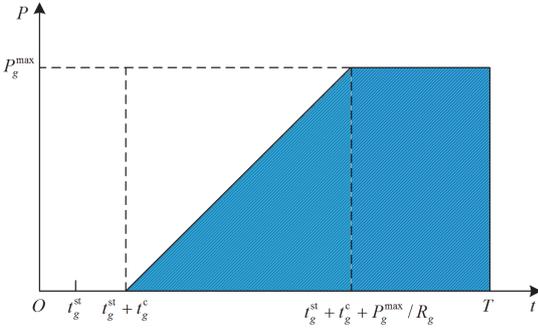


图3 非黑启动机组的功率输出曲线

Fig. 3 Curve of power generation outputs of a non-black start unit

由图3可知,非黑启动机组在 t_g^{st} 时刻启动,在 $t_g^{\text{st}} + t_g^{\text{c}}$ 时刻开始爬坡输出功率,在 $t_g^{\text{st}} + t_g^{\text{c}} + P_g^{\text{max}} / R_g$ 时刻达到最大输出功率。

在电力系统恢复阶段,非黑启动机组发出的有功电量 W_g^{NBSU} 为其发出的有功功率与启动功率的差值在整个恢复阶段的积分,即图3中阴影部分面积减去图2中的阴影部分面积,在数学上可由式(2)表示。

$$W_g^{\text{NBSU}} = \frac{(P_g^{\text{max}})^2}{2R_g} + P_g^{\text{max}} \left(T - t_g^{\text{st}} - t_g^{\text{c}} - \frac{P_g^{\text{max}}}{R_g} \right) - P_g^{\text{st}}(T - t_g^{\text{st}}), \quad \forall g \in G^{\text{NBSU}} \quad (2)$$

式中, G^{NBSU} 为系统中非黑启动机组集合。

随着停电时间的增加,非黑启动机组的气缸温度会降低,其启动后的等待并网时间也会随之增加^[16],因此需要分析等待并网时间 t_g^{c} 与启动时间 t_g^{st} 的数学关系。本文将非黑启动机组的启动状态分为4种,分别为极热启动状态、热启动状态、温启动状态、冷启动状态^[17]。非黑启动机组在不同启动状态下的等待并网时间如图4所示。机组 g 的等待并网时间可由式(3)一式(5)表示。

$$t_g^{\text{c}} = \sum_{k=1}^K \delta_{g,k} t_{g,k}^{\text{c}} \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K \delta_{g,k} = 1 \quad (4)$$

$$t_{g,k-1} - (1 - \delta_{g,k})M \leq t_g^{\text{st}} \leq t_{g,k} + (1 - \delta_{g,k})M \quad (5)$$

$$\forall k \in [1, \dots, K]$$

式中: $t_{g,k}^{\text{c}}$ 、 $\delta_{g,k}$ 、 $t_{g,k}$ 分别为机组 g 处于第 k 种启动状态时的等待并网时间、是否处于第 k 种启动状态的布尔变量、第 k 种状态的截止时刻; K 为非黑启动机组启动状态的个数; M 为无穷大的值。式(3)表示机组 g 的等待并网时间等于其在各个启动状态时的等待并网时间之和。式(4)表示机组 g 只能处于一种启动状态。式(5)用于约束非黑启动机组 g 的启动时间。

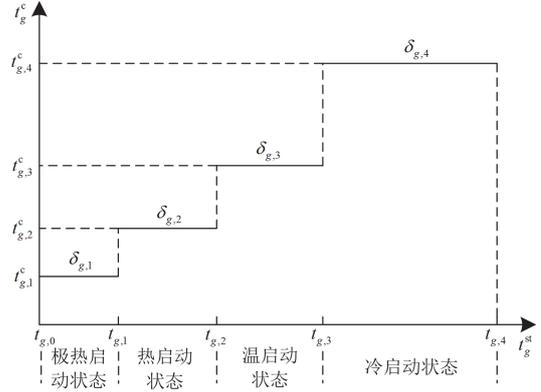


图4 机组 g 在不同启动状态下的等待并网时间

Fig. 4 Cranking time of unit g at different start-up states

2 FCB 机组最优布点模型

2.1 目标函数

在电力系统恢复阶段,恢复能力被认为是一个重要的弹性指标^[18-19]。恢复能力可被定义为在电力系统恢复阶段,所有机组发出的总电量除以恢复时长^[16],可由式(6)表示。

$$R_c = \frac{\sum_{g \in G^{\text{FCB}}} W_g^{\text{FCB}} + \sum_{g \in G^{\text{NBSU}}} W_g^{\text{NBSU}}}{T} \quad (6)$$

式中, R_c 为电力系统的恢复能力。

本文所提出模型的目标函数为最大化电力系统的恢复能力,可由式(7)表示。

$$\max R_c \quad (7)$$

本文假设机组被改造为FCB机组后厂用电功率与被改造前作为非黑启动机组的启动功率相同^[6],即 P_g^{f} 等于 P_g^{st} 。当固定恢复时长时,目标函数可转化为最大化所有机组的有功电量,删去目标函数中的常数项,引入与FCB机组布点方案相关的布尔变量,式(7)可转化为

$$\min \left(\begin{array}{l} \sum_{g \in G} (P_g^{\max} (t_g^{\text{st}} + t_g^{\text{c}}) - P_g^{\text{st}} t_g^{\text{cu}} - P_g^{\text{st}} t_g^{\text{u}}) + \\ \sum_{g \in G} \frac{u_g^{\text{BS}} ((P_g^{\text{st}})^2 - 2P_g^{\max} P_g^{\text{st}})}{2R_g} \end{array} \right) \quad (8)$$

式中: G 为系统中全部机组集合; u_g^{BS} 为布尔变量, 其值为 1 表示机组 g 被改造为 FCB 机组; t_g^{u} 和 t_g^{cu} 为引入的辅助变量, 分别满足 $t_g^{\text{u}} = (1 - u_g^{\text{BS}}) t_g^{\text{st}}$ 和 $t_g^{\text{cu}} = u_g^{\text{BS}} t_g^{\text{c}}$ 。应用 big-M 法, 可将 t_g^{u} 和 t_g^{cu} 线性化, 线性化的公式详见附录 A。

2.2 约束条件

2.2.1 含与布点方案相关的布尔变量的机组约束

1) 临界最大时间和临界最小时间约束

$$t_g^{\text{st}} \geq (1 - u_g^{\text{BS}}) T_g^{\min}, \quad \forall g \in G \quad (9)$$

$$t_g^{\text{st}} \leq (1 - u_g^{\text{BS}}) T_g^{\max}, \quad \forall g \in G \quad (10)$$

式中, T_g^{\min} 和 T_g^{\max} 分别为机组 g 的最小和最大临界启动时间。式(9)和式(10)表示当机组 g 为非黑启动机组时, 其启动时间应不小于最小临界启动时间, 不大于最大临界启动时间; 当机组 g 为 FCB 机组时其启动时间为 0。

2) 机组等待并网时间约束

在 FCB 机组最优布点模型中, 机组的等待并网时间除了应满足式(4)和式(5)外, 还应满足式(11)和式(12)。

$$-u_g^{\text{BS}} M \leq t_g^{\text{c}} - \sum_{k=1}^K \delta_{g,k} t_{g,k}^{\text{c}} \leq u_g^{\text{BS}} M, \quad \forall g \in G \quad (11)$$

$$t_g^{\text{c}} \geq 0, \quad \forall g \in G \quad (12)$$

式(11)表示非黑启动机组的等待并网时间等于其在各个启动状态时的等待并网时间之和。式(12)表示机组的等待并网时间均大于等于 0。

3) 机组启动功率约束

$$\sum_{g \in G} (P_{g,t} - P_{g,t}^{\text{st}}) \geq 0, \quad \forall t \in T^{\text{R}} \quad (13)$$

式中: $P_{g,t}$ 为机组 g 在 t 时刻发出的有功功率; $P_{g,t}^{\text{st}}$ 为启动机组 g 在 t 时刻所需要的启动功率, 如果机组未启动, 则其值为 0, 否则其值为 P_g^{st} ; T^{R} 为离散的恢复时段集合。式(13)表示在系统恢复期间所有机组发出的有功功率不小于非黑启动机组的启动功率。式(13)可转化为如式(14)所示的线性表达形式^[16]。

$$\sum_{g \in G} (w_{g,1,t} t R_g - v_{g,1,t} R_g - T_{g,1,t}^{\text{au,c}} R_g + w_{g,2,t} P_g^{\max} - w_{g,t}^{\text{u2}} P_g^{\text{st}}) - \sum_{g \in G} P_{g,t}^{\text{ust3}} \geq 0, \quad \forall t \in T^{\text{R}} \quad (14)$$

式中: $w_{g,h,t}$ 为机组 g 在 t 时刻是否处于 h 阶段 ($h=1,2,3$), 在本文中定义第 1 阶段 ($h=1$) 为机组的爬坡阶段, 第 2 阶段 ($h=2$) 为机组向系统输出的功率达到最大值的阶段, 第 3 阶段 ($h=3$) 为机组已启动阶段; $v_{g,h,t}$ 、 $T_{g,h,t}^{\text{au,c}}$ 、 $P_{g,t}^{\text{ust3}}$ 和 $w_{g,t}^{\text{u2}}$ 分别为引入的辅助变量, 分别满足 $v_{g,h,t} = w_{g,h,t} t_g^{\text{st}}$ 、 $T_{g,h,t}^{\text{au,c}} = w_{g,h,t} t_g^{\text{c}}$ ($h'=1,2$)、 $P_{g,t}^{\text{ust3}} = w_{g,3,t} P_g^{\text{st}} (1 - u_g^{\text{BS}})$ 、 $w_{g,t}^{\text{u2}} = w_{g,2,t} u_g^{\text{BS}}$ 。应用 big-M 法, 可将 $v_{g,h,t}$ 、 $T_{g,h,t}^{\text{au,c}}$ 、 $P_{g,t}^{\text{ust3}}$ 和 $w_{g,t}^{\text{u2}}$ 线性化, 线性化后的公式详见附录 A。

变量 $w_{g,1,t}$ 、 $w_{g,2,t}$ 、 $w_{g,3,t}$ 、 $v_{g,1,t}$ 、 $v_{g,2,t}$ 、 $v_{g,3,t}$ 、 $T_{g,1,t}^{\text{au,c}}$ 、 $T_{g,2,t}^{\text{au,c}}$ 满足式(15)一式(21)。

$$0 \leq w_{g,1,t} + w_{g,2,t} \leq 1, \quad \forall g \in G \quad (15)$$

$$t(w_{g,1,t} + w_{g,2,t}) \geq t - t_g^{\text{st}} - t_g^{\text{c}}, \quad \forall g \in G \quad (16)$$

$$v_{g,1,t} + T_{g,1,t}^{\text{au,c}} \leq t, \quad \forall g \in G \quad (17)$$

$$t w_{g,1,t} \leq t_g^{\text{st}} + t_g^{\text{c}} + \frac{(P_g^{\max} - u_g^{\text{BS}} P_g^{\text{st}})}{R_g}, \quad \forall g \in G \quad (18)$$

$$v_{g,2,t} + T_{g,2,t}^{\text{au,c}} + \frac{(w_{g,2,t} P_g^{\max} - w_{g,t}^{\text{u2}} P_g^{\text{st}})}{R_g} \leq t, \quad \forall g \in G \quad (19)$$

$$v_{g,3,t} \leq t, \quad \forall g \in G \quad (20)$$

$$t w_{g,3,t} \geq t - t_g^{\text{st}}, \quad \forall g \in G \quad (21)$$

式(15)表示机组 g 不能同时处于爬坡状态和输出功率达到最大值的状态。式(16)表示机组 g 在 $t_g^{\text{st}} + t_g^{\text{c}}$ 时刻后才能处于爬坡或向系统输出的功率达到最大值的状态。式(17)和式(18)表示非黑启动机组 g 在 $t_g^{\text{st}} + t_g^{\text{c}}$ 时刻后且 $t_g^{\text{st}} + t_g^{\text{c}} + P_g^{\max} / R_g$ 时刻前处于爬坡状态, FCB 机组在 $t_g^{\text{st}} + t_g^{\text{c}}$ 时刻后且 $t_g^{\text{st}} + t_g^{\text{c}} + (P_g^{\max} - P_g^{\text{st}}) / R_g$ 前处于爬坡状态。式(19)表示非黑启动机组 g 在 $t_g^{\text{st}} + t_g^{\text{c}} + P_g^{\max} / R_g$ 时刻后向系统输出功率达到最大值, FCB 机组在 $t_g^{\text{st}} + t_g^{\text{c}} + (P_g^{\max} - P_g^{\text{st}}) / R_g$ 时刻后向系统输出功率达到最大值。式(20)和式(21)表示在 t_g^{st} 时刻后, 机组 g 处于启动状态, $w_{g,3,t}$ 为 1, 否则其值为 0。

4) 机组无功功率约束

$$(w_{g,1,t} + w_{g,2,t}) Q_g^{\min} \leq Q_{g,t} \leq (w_{g,1,t} + w_{g,2,t}) Q_g^{\max} \quad (22)$$

式中: $Q_{g,t}$ 为 t 时刻机组 g 发出的无功功率; Q_g^{\min} 和 Q_g^{\max} 分别为机组 g 发出的最小和最大无功功率。式(22)用于约束机组发出的无功功率。

5) 发电机自励磁约束

黑启动机组带长距离空载线路充电时容易出现自励磁问题,导致机组的过电压和过电流,故在制定黑启动方案时,应避免自励磁。在实际工程中,当黑启动机组的额定容量与短路比的乘积大于发电机外电路输电线路充电无功功率时,认为不发生自励磁^[20],即发电机自励磁约束为

$$\sum_{g \in G} u_g^{\text{BS}} k_g P_g^{\text{max}} > \sum_{(ij) \in E} Q_{ij,t}, \forall t \in T^{\text{R}} \quad (23)$$

式中: E 为输电线路集合; k_g 为机组 g 的短路比; $Q_{ij,t}$ 为 t 时刻输电线路 ij 上的无功功率。

2.2.2 FCB 机组改造台数约束

$$\sum_{g \in G} u_g^{\text{BS}} = B \quad (24)$$

式中, B 为改造为 FCB 机组的机组总台数。式(24)表示系统中有 B 台机组被改造为 FCB 机组。

2.2.3 节点有功和无功功率平衡约束

$$\sum_{j:(ji) \in E} P_{ji,t} + \sum_{g \in G(i)} (w_{g,1,t} R_g - v_{g,1,t} R_g - T_{g,1,t}^{\text{au,c}} R_g + w_{g,2,t} P_g^{\text{max}} - w_{g,2,t}^2 P_g^{\text{st}} - P_{g,t}^{\text{ust3}}) - \sum_{j:(ij) \in E} P_{ij,t} = \quad (25)$$

$$P_i^{\text{load}} - P_{i,t}^{\text{sh}}, \forall i \in N, t \in T^{\text{R}}$$

$$\sum_{j:(ji) \in E} Q_{ji,t} - \sum_{j:(ij) \in E} Q_{ij,t} + \sum_{j:(ji) \in E} \frac{1}{2} c_{ji}^c u_{ji,t}^b + \sum_{j:(ij) \in E} \frac{1}{2} c_{ij}^c u_{ij,t}^b + \sum_{g \in G(i)} Q_{g,t} + Q_{i,t}^{\text{ix}} = (P_i^{\text{load}} - P_{i,t}^{\text{sh}}) \tan(\phi_i^{\text{load}})$$

$$\forall i \in N, t \in T^{\text{R}} \quad (26)$$

式中: N 为节点集合; $P_{ij,t}$ 为 t 时刻输电线路 ij 上的有功功率; $G(i)$ 为与节点 i 相连的发电机集合; P_i^{load} 为节点 i 的有功负荷值; $P_{i,t}^{\text{sh}}$ 和 $Q_{i,t}^{\text{ix}}$ 分别为 t 时刻节点 i 的甩负荷量和位于节点 i 的调相器的无功功率; $u_{ij,t}^b$ 为表示输电线路 ij 在 t 时刻恢复状态的布尔变量, 其值为 1 表示输电线路 ij 在 t 时刻恢复; c_{ij}^c 为输电线路 ij 的对地电容; ϕ_i^{load} 为节点 i 上负荷的功率因数角。式(25)和式(26)分别为节点有功和无功功率平衡方程。

节点 i 在 t 时刻的甩负荷量满足式(27)和式(28)。

$$(1 - u_{i,t}) P_i^{\text{load}} \leq P_{i,t}^{\text{sh}} \leq P_i^{\text{load}}, \forall i \in N, t \in T^{\text{R}} \quad (27)$$

$$P_{i,t}^{\text{sh}} \leq P_{i,t-1}^{\text{sh}}, \forall i \in N, t-1, t \in T^{\text{R}} \quad (28)$$

式中, $u_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻恢复状态的布尔变量, 其值为 1 表示节点 i 在 t 时刻恢复。式(27)表示节点 i 未恢复时, 节点 i 的甩负荷量等于有功负荷值, 当节点 i 恢复时, 节点 i 的甩负荷量不小于 0 且不大

于有功负荷值。式(28)表示节点 i 的甩负荷量随时间递减。

2.2.4 输电线路的热极限约束

输电线路的热极限约束^[21]可由式(29)一式(32)所示。

$$-u_{ij,t}^b S_{ij}^{\text{max}} \leq P_{ij,t} \leq u_{ij,t}^b S_{ij}^{\text{max}}, \forall (ij) \in E, t \in T^{\text{R}} \quad (29)$$

$$-u_{ij,t}^b S_{ij}^{\text{max}} \leq Q_{ij,t} \leq u_{ij,t}^b S_{ij}^{\text{max}}, \forall (ij) \in E, t \in T^{\text{R}} \quad (30)$$

$$-\sqrt{2} u_{ij,t}^b S_{ij}^{\text{max}} \leq P_{ij,t} + Q_{ij,t} \leq \sqrt{2} u_{ij,t}^b S_{ij}^{\text{max}} \quad (31)$$

$$\forall (ij) \in E, t \in T^{\text{R}}$$

$$-\sqrt{2} u_{ij,t}^b S_{ij}^{\text{max}} \leq P_{ij,t} - Q_{ij,t} \leq \sqrt{2} u_{ij,t}^b S_{ij}^{\text{max}}, \quad (32)$$

$$\forall (ij) \in E, t \in T^{\text{R}}$$

式中, S_{ij}^{max} 为输电线路 ij 的热极限阈值。

2.2.5 交流潮流约束

根据文献[22]中关于潮流建模的方法, 输电线路 ij 的交流潮流可由式(33)和式(34)表示。

$$P_{ij,t} = \left[g_{ij} \cdot \frac{v_{i,t}^2 - v_{j,t}^2}{2} - b_{ij} (\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \right] u_{ij,t}^b, \forall (ij) \in E, t \in T^{\text{R}} \quad (33)$$

$$Q_{ij,t} = \left[-b_{ij} \cdot \frac{v_{i,t}^2 - v_{j,t}^2}{2} - g_{ij} (\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \right] u_{ij,t}^b, \forall (ij) \in E, t \in T^{\text{R}} \quad (34)$$

式中: g_{ij} 和 b_{ij} 分别为输电线路 ij 的电导和电纳; $v_{i,t}^2$ 和 $\theta_{i,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 的电压幅值的平方和电压相角。

应用 big-M 法, 可将式(33)和式(34)线性化, 线性化后的公式详见附录 A。

2.2.6 节点电压与相角约束

从与 FCB 机组相连的节点集合中选取 1 个节点作为参考点, 该节点在 t 时刻的电压相角需满足式(35)一式(37)。

$$z_g \leq u_g^{\text{BS}}, \forall g \in G \quad (35)$$

$$\sum_{g \in G} z_g = 1 \quad (36)$$

$$-(1 - z_g)M \leq \theta_{i,t} \leq (1 - z_g)M \quad (37)$$

$$\forall i \in N, g \in G(i), t \in T^{\text{R}}$$

式中, z_g 为表示与机组 g 相连的节点是否被选作参考点的布尔变量, 当与机组 g 相连的节点被选作参考点时, z_g 的值为 1, 否则为 0。式(35)表示只有与 FCB 机组相连的节点才能被选作参考点。式(36)表示只有一个节点被选作参考点。式(37)表示参考点的电压相角为 0。

节点 i 在 t 时刻电压的平方和相角分别满足式(38)和式(39)。

$$u_{i,t}(v^{\min})^2 \leq v_{i,t}^2 \leq u_{i,t}(v^{\max})^2, \forall i \in N, t \in T^R \quad (38)$$

$$u_{i,t}\theta^{\min} \leq \theta_{i,t} \leq u_{i,t}\theta^{\max}, \forall i \in N, t \in T^R \quad (39)$$

式中: v^{\min} 和 v^{\max} 分别为节点电压的最小值和最大值; θ^{\min} 和 θ^{\max} 分别为节点电压相角的最小值和最大值。式(39)表示节点 i 在 t 时刻的电压相角应不小于节点电压相角的最小值且不大于节点电压相角的最大值。

2.2.7 变量间的逻辑关系约束

1) FCB 机组与与之相连的节点恢复状态的约束

$$u_{i,0} = u_g^{\text{BS}}, \forall g \in G, i \in N^g \quad (40)$$

式中, N^g 表示与机组 g 相连的节点集合。式(40)表示如果机组 g 为 FCB 机组, 则与之相连的节点在第 0 min 时即可恢复。

2) FCB 机组与与之相连的输电线路恢复状态的约束

$$\sum_{t \in T^R} (1 - u_{ij,t}^b) \geq t_g^c - (1 - u_g^{\text{BS}})M, \forall g \in G, (ij) \in E^g \quad (41)$$

式中, E^g 表示与机组 g 相连的输电线路集合。式(41)表示如果机组 g 为 FCB 机组, 则与之相连的输电线路的恢复时间不小于机组 g 的等待并网时间。

3) 输电线路与其两端节点恢复状态的约束

$$u_{ij,t}^b \leq u_{i,t-1} + u_{j,t-1}, \forall (ij) \in E, t-1, t \in T^R \quad (42)$$

$$u_{i,t} \leq \sum_{j:(ij) \in E} u_{ij,t}^b + \sum_{j:(ji) \in E} u_{ij,t}^b, \forall i \in N, t \in T^R \quad (43)$$

$$u_{i,t} \geq \left(\sum_{j:(ij) \in E} u_{ij,t}^b + \sum_{j:(ji) \in E} u_{ij,t}^b \right) / M, \forall i \in N, t \in T^R \quad (44)$$

式(42)表示输电线路在 t 时刻恢复的必要条件是输电线路至少有一个节点在 $t-1$ 时刻恢复。式(43)和式(44)表示当输电线路恢复时, 其两端节点也处于已恢复状态。

4) 节点恢复状态约束

$$u_{i,t-1} \leq u_{i,t}, \forall i \in N, \forall t-1, t \in T^R \quad (45)$$

式(45)表示节点恢复后一直保持已恢复状态。

5) 输电线路恢复状态约束

$$u_{ij,t-1}^b \leq u_{ij,t}^b, \forall (ij) \in E, \forall t-1, t \in T^R \quad (46)$$

式(46)表示输电线路恢复后一直保持已恢复状态。

6) 非黑启动机组与与之相连的节点恢复状态的约束

$$u_{i,t} \geq w_{g,3,t} - u_g^{\text{BS}}M, \forall i \in N, g \in G(i), t \in T^R \quad (47)$$

式(47)表示只有当非黑启动机组所在节点恢复后, 该非黑启动机组才能启动。

综上所述, 本文提出的 FCB 机组最优布点规划模型可由式(48)表示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \left[\sum_{g \in G} (P_g^{\max} (t_g^{\text{st}} + t_g^{\text{c}}) - P_g^{\text{st}} t_g^{\text{cu}} - P_g^{\text{st}} t_g^{\text{u}}) + \sum_{g \in G} \frac{u_g^{\text{BS}} ((P_g^{\text{st}})^2 - 2P_g^{\max} P_g^{\text{st}})}{2R_g} \right] \\ \text{s.t. 式(4), 式(5), 式(8)一式(12), 式(14)一式(47)} \end{array} \right. \quad (48)$$

3 算例分析

3.1 IEEE 39 节点系统

本节以 IEEE 39 节点系统来验证所提出模型的有效性。基于 AMPL 平台撰写程序, 并调用商业求解器 CPLEX^[23]对模型进行求解。运行环境是 Intel(R) Core(TM) i7-9700H、8 GB 内存的计算机。

IEEE 39 节点系统包含 39 个节点、10 台机组和 46 条输电线路。IEEE 39 节点系统中机组的参数如表 1 所示, 机组的爬坡率数据来自文献[13]。其他参数比如节点有功无功负荷和线路的阻抗等来自 matpower7.0。机组处于不同启动状态时的等待并网时间和各个启动状态的起止时刻详见附录 B 表 B1 和表 B2。假设 FCB 机组改造的总台数为 1 台, 候选改造机组集合为 {G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G10}, 由于机组 G8 和 G9 的装机容量较大, 改造难度较高, 所以机组 G8 和 G9 不作为候选的改造机组。总恢复时长设置为 5 h, 离散化的恢复时间间隔为 10 min。

表 1 IEEE 39 节点系统中机组的参数

机组	机组最大 出力/MW	机组启动 功率/MW	临界最大 时间/min	临界最小 时间/min
G1	572.9	5.5	—	40
G2	650	8	—	0
G3	632	7	120	0
G4	508	5	—	70
G5	650	8	120	0
G6	560	6	—	0
G7	540	6	—	0
G8	830	13.2	—	0
G9	1000	15	—	0
G10	250	10	—	0

3.1.1 FCB 机组布点方案

求解所提出的模型, 可得最优的 FCB 机组布点方案是将机组 G10 改造为 FCB 机组, 求解时间为 35 s。在最优的 FCB 机组布点方案中各机组的启动时间如表 2 所示。由表 2 可以看出: 机组 G10 被改造为 FCB 机组, 具有自启动能力, 在第 0 min 时即可启动, 而其他机组受启动功率、最大最小启动时间等约束, 依次启动, 其中, 机组 G5、G6 和 G7 在第 80 min 时得以启动。

表 2 最优的 FCB 机组布点方案中各机组的启动时间

Table 2 Start-up time of generation units in the optimal location scheme of FCB units

机组	启动时间/min	机组	启动时间/min
G1	40	G6	80
G2	60	G7	80
G3	70	G8	30
G4	70	G9	50
G5	80	G10	0

为了验证本文所提出模型的有效性，遍历计算所有候选的 FCB 机组布点方案，如表 3 所示。由表 3 可以看出：当 FCB 机组的布点方案是将机组 G10 改造为 FCB 机组时，机组全部启动所需时间为 80 min，系统的恢复能力为 2832.6 MW，在所有候选布点方案中是最大的，因此将 G10 改造为 FCB 机组是最优的 FCB 布点方案，从而验证了本文模型的有效性。

表 3 所有候选的 FCB 机组布点方案

Table 3 All candidate location schemes of FCB units

被改造的机组	机组全部启动所需时间/min	系统恢复能力/MW
G1	90	2788.7
G2	90	2629.6
G3	90	2599.7
G4	80	2811.4
G5	90	2559.0
G6	90	2592.3
G7	90	2607.4
G10	80	2832.6

为了验证本文目标函数的优势，本文对比分析了基于 3 种典型目标函数得到的最优 FCB 机组布点方案，对比结果如表 4 所示。3 种典型目标函数分别如下。目标函数 1：本文提出的最大化系统恢复能力；目标函数 2：文献[11]提出的最小化机组全部达到最大输出功率所需时间；目标函数 3：文献[24]提出的当机组全部启动所需时间不超过给定时间阈值时最小化投资费用。为了便于对比，本文假设给定时间阈值为 80 min。由表 4 可以看出：基于 3 种典型目标函数得到的最优 FCB 机组布点方案，均为将机组 G10 改造为 FCB 机组。基于 3 种典型目标函数得到的最优 FCB 机组布点方案相同，但在不同目标函数条件下，机组启动顺序有所不同，导致机组全部达到最大输出功率所需时间以及系统恢复能力不同。采用本文提出的目标函数得到的最优方案中，机组全部达到最大输出功率所需时间较小，且系统恢复能力最大。因此，可以验证本文模型目标

函数的有效性。

表 4 基于 3 种典型目标函数得到的最优 FCB 机组布点方案对比

Table 4 Comparison of optimal location schemes of FCB units based on three different typical objective functions

不同的目标函数	被改造的机组	机组全部达到最大出力所需时间/min	系统恢复能力/MW
目标函数 1	G10	270	2832.6
目标函数 2	G10	270	2475.2
目标函数 3	G10	280	2778.4

3.1.2 电力系统恢复方案

求解所构建的模型可知，最优的 FCB 机组布点方案是将机组 G10 改造为 FCB 机组，在此方案中各时刻的电力系统恢复结果如表 5 所示。由表 5 可以看出：所有机组在第 80 min 时全部得以启动。与 G10 相连的节点 30 在第 0 min 时恢复，与 G10 相连的输电线路 l_{30-2} 在第 10 min 时恢复，在第 120 min 时所有节点得以恢复，在第 130 min 时所有的输电线路得以恢复。

表 5 各时刻的系统恢复结果

Table 5 Power system restoration solutions at each time interval

时间/min	恢复的机组	恢复的节点	恢复的输电线路
0	G10	30	—
10	—	2	l_{30-2}
20	—	1, 3, 25	$l_{1-2}, l_{2-3}, l_{2-25}$
30	G8	4, 18, 26, 37, 39	$l_{1-39}, l_{3-4}, l_{3-18}, l_{25-26}, l_{25-37}$
40	G1	5, 9, 14, 17, 29	$l_{4-5}, l_{4-14}, l_{9-39}, l_{17-18}, l_{26-29}$
50	G9	6, 8, 13, 15, 16, 28, 38	$l_{5-6}, l_{5-8}, l_{8-9}, l_{13-14}, l_{14-15}, l_{16-17}, l_{26-28}, l_{28-29}, l_{29-38}$
60	G2	7, 10, 11, 19, 21, 24, 31	$l_{6-11}, l_{6-31}, l_{7-8}, l_{10-13}, l_{16-19}, l_{16-21}, l_{16-24}$
70	G3, G4	20, 22, 23, 32, 33	$l_{10-11}, l_{10-32}, l_{19-20}, l_{19-33}, l_{21-22}, l_{23-24}$
80	G5, G6, G7	34, 35, 36	$l_{6-7}, l_{20-34}, l_{22-35}, l_{23-36}$
90	—	12	l_{12-11}
110	—	—	l_{22-23}
120	—	27	l_{12-13}, l_{26-27}
130	—	—	l_{15-16}, l_{17-27}

在本文提出的 FCB 机组布点模型中考虑了恢复过程中各时刻的电力潮流，因此有必要分析输电线路在不同时刻的有功功率。表 6 展示了分别与机组 G10、G8、G2 相连的 3 条输电线路 $l_{30-2}, l_{25-37}, l_{6-31}$ 在不同时刻的有功功率。定义线路 l_{i-j} 上的有功功率为正值，则表示线路上的有功功率由节点 i 流

向节点 j , 反之, 则表示线路上的有功功率由节点 j 流向节点 i 。由表 6 可以看出: 与 FCB 机组 G10 相连的线路 l_{30-2} 的有功功率在第 10 min 时为 0 MW, 这是因为与 G10 相连的线路 l_{30-2} 两端节点均无负荷, 若 G10 在第 0 min 时并网, 则在第 10 min 时系统无法满足节点功率平衡约束, 因此 G10 推迟其并网时间, 在第 10 min 时才开始并网并向系统输出功率。随着恢复时间的增加, 线路 l_{30-2} 的有功功率的幅值不断增大, 在第 100 min 时达到最大值 240 MW 并保持不变, 这是因为与线路 l_{30-2} 相连的 FCB 机组 G10 能够向系统输出功率的最大值为其最大输出功率减去厂用电功率。

表 6 在不同时间部分输电线路的有功功率

Table 6 Active power through selected transmission lines at different time intervals

时间/ min	线路 l_{30-2} 上的 有功功率/MW	线路 l_{25-37} 上的 有功功率/MW	线路 l_{6-31} 上的 有功功率/MW
0	0	0	0
10	0	0	0
20	27	0	0
30	54	13.2	0
60	135	-44.46	8
100	240	-275.1	-33.0
110	240	-332.76	-74.0
150	240	-563.4	-238.0
200	240	-816.8	-443.0
250	240	-816.8	-632.8
300	240	-816.8	-632.8

表 7 展示了采用线性化的潮流约束和标准交流潮流约束得到的部分线路的有功功率和视在功率结果对比。由表 7 可以看出: 相比于采用标准交流潮流约束得到的解, 采用线性化的潮流约束带来的最大误差小于 2%, 在电力工程实践中, 是可以被接受的。

表 7 部分线路的有功功率和视在功率结果对比

Table 7 Comparison of solutions of active power flows and apparent power flows through selected lines

部分线路	线路有功功率/ 视在功率(MW/MVA)		因线性化导 致的有功功 率/视在功 率误差/%
	考虑线性化的 潮流约束	考虑标准交流 潮流约束	
l_{2-3}	435.33/600.34	436.02/599.50	0.16/0.14
l_{5-6}	497.82/530.69	496.85/531.21	0.20/0.10
l_{21-22}	533.45/555.94	533.96/557.06	0.10/0.20
l_{26-29}	272.57/276.29	273.70/277.09	1.35/1.22
l_{28-29}	428.93/501.74	425.21/508.18	0.87/1.27

3.2 IEEE 118 节点系统

IEEE 118 节点系统包含 118 个节点、54 台机组和 186 条输电线路, 系统拓扑图详见附录 C 图 C1。采用的机组参数如启动功率、爬坡率等数据来自文献[25], 采用的其他参数如有功无功负荷和线路的阻抗等数据来自 matpower7.0。FCB 机组改造的总台数为 2 台, 系统中所有的机组均作为候选改造机组。总恢复时长设置为 10 h, 离散化的恢复时间间隔为 10 h。求解所提出的模型, 可得最优的 FCB 机组布点方案是将机组 G30 和 G45 改造为 FCB 机组, 系统恢复能力为 6448.8 MW。在最优的 FCB 机组布点方案中各机组的启动时间如表 8 所示。由表 8 可以看出: 机组 G30 和 G45 被改造为 FCB 机组, 在第 0 min 时即可启动, 所有机组全部启动所需时间为 80 min。

表 8 最优的 FCB 机组布点方案中各机组的启动时间

Table 8 Start-up time of generation units in the optimal

location scheme of FCB units						
机组	G1	G2	G3	G4	G5	G6
启动时间/min	80	70	70	50	70	70
机组	G7	G8	G9	G10	G11	G12
启动时间/min	60	60	60	20	50	50
机组	G13	G14	G15	G16	G17	G18
启动时间/min	50	50	70	50	60	30
机组	G19	G20	G21	G22	G23	G24
启动时间/min	60	40	60	20	40	30
机组	G25	G26	G27	G28	G29	G30
启动时间/min	60	60	60	60	60	0
机组	G31	G32	G33	G34	G35	G36
启动时间/min	10	30	30	20	70	10
机组	G37	G38	G39	G40	G41	G42
启动时间/min	50	30	50	40	30	20
机组	G43	G44	G45	G46	G47	G48
启动时间/min	10	20	0	30	10	20
机组	G49	G50	G51	G52	G53	G54
启动时间/min	20	20	30	30	50	60

为了验证本文模型的有效性, 将采用本文布点方案与文献[11]布点方案得到的系统总发电量进行对比, 对比结果如图 5 所示。在图 5 中红色曲线表示采用本文布点方案得到的结果, 最优的 FCB 机组布点方案是将机组 G30 和 G45 改造为 FCB 机组, 在整个恢复过程中, 采用本文布点方案得到的系统总发电量为 64 488.3 MWh, 系统恢复能力为 6448.8 MW; 黑色曲线表示采用文献[11]布点方案得到的结果, 最优的 FCB 机组布点方案是将机组 G5 和 G37 改造为 FCB 机组, 在整个恢复过程中, 采

用文献[11]布点方案得到的系统总发电量为 61476.7 MWh, 系统恢复能力为 6147.7 MW。由图 5 可知: 相比于文献[11]的布点方案, 采用本文布点方案时系统恢复能力有所增加。因此, 采用本文的布点方案可以有效提升系统的恢复能力, 本文 FCB 机组布点方案更优。

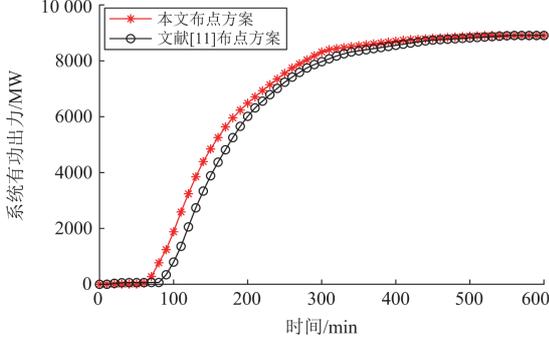


图 5 采用本文布点方案和文献[11]布点方案得到的系统有功出力

Fig. 5 Active power output of FCB units by employing the proposed location method and Ref. [11]

4 结语

本文分析了 FCB 机组和非黑启动机组在系统恢复过程中的功率特性, 提出了以最大化系统恢复能力为目标函数的 FCB 机组最优布点模型, 将所选取的常规火电机组改造为 FCB 机组, 使其具有快速向系统供电的能力, 从而提高电力系统恢复能力。通过调用商业求解器 CPLEX 求解所建立的模型, 采用 IEEE 39 节点系统和 IEEE 118 节点系统验证所提出模型的可行性和有效性, 并得到如下结论:

1) 所提出的模型能够有效解决 FCB 机组最优布点问题, 并提升电力系统的恢复能力。通过与已有文献的布点方案进行对比, 表明采用本文 FCB 机组布点模型能够有效提升系统总发电量和系统恢复能力。

2) 通过与两个典型目标函数的对比, 验证了本文提出的以最大化系统恢复能力为目标函数的有效性, 有助于实现系统的快速恢复。

附录 A

应用 big-M 法, 对式(8)中的 t_g^u 、 t_g^{cu} 和式(14)中的 $v_{g,h,t}$ 、 $T_{g,h',t}^{au,c}$ 、 $P_{g,t}^{ust3}$ 、 $w_{g,t}^{u2}$ 以及式(33)和式(34)进行线性化, 线性化后的公式如式(A1)一式(A16)所示。

变量 t_g^u 满足 $t_g^u = (1 - u_g^{BS})t_g^{st}$, 线性化后如式(A1)

和式(A2)所示。

$$0 \leq t_g^u \leq (1 - u_g^{BS})M \quad (A1)$$

$$-u_g^{BS}M \leq t_g^u - t_g^{st} \leq u_g^{BS}M \quad (A2)$$

变量 t_g^{cu} 满足 $t_g^{cu} = u_g^{BS}t_g^c$, 线性化后如式(A3)和式(A4)所示。

$$0 \leq t_g^{cu} \leq u_g^{BS}M \quad (A3)$$

$$-(1 - u_g^{BS})M \leq t_g^{cu} - t_g^c \leq (1 - u_g^{BS})M \quad (A4)$$

变量 $v_{g,h,t}$ 满足 $v_{g,h,t} = w_{g,h,t}t_g^{st}$, 线性化后如式(A5)和式(A6)所示。

$$0 \leq v_{g,h,t} \leq w_{g,h,t}M, \quad \forall g \in G, t \in T^R \quad (A5)$$

$$-(1 - w_{g,h,t})M \leq v_{g,h,t} - t_g^{st} \leq (1 - w_{g,h,t})M, \quad \forall g \in G, t \in T^R \quad (A6)$$

变量 $T_{g,h',t}^{au,c}$ 满足 $T_{g,h',t}^{au,c} = w_{g,h',t}t_g^c$, 线性化后如式(A7)和式(A8)所示。

$$0 \leq T_{g,h',t}^{au,c} \leq w_{g,h',t}M, \quad \forall g \in G, t \in T^R \quad (A7)$$

$$-(1 - w_{g,h',t})M \leq T_{g,h',t}^{au,c} - t_g^c \leq (1 - w_{g,h',t})M, \quad \forall g \in G, t \in T^R \quad (A8)$$

变量 $P_{g,t}^{ust3}$ 满足 $P_{g,t}^{ust3} = w_{g,3,t}P_g^{st}(1 - u_g^{BS})$, 线性化后如式(A9)和式(A10)所示。

$$0 \leq P_{g,t}^{ust3} \leq w_{g,3,t}M, \quad \forall g \in G, t \in T^R \quad (A9)$$

$$-(1 - w_{g,3,t})M \leq P_{g,t}^{ust3} - P_g^{st}(1 - u_g^{BS}) \leq (1 - w_{g,3,t})M, \quad \forall g \in G, t \in T^R \quad (A10)$$

变量 $w_{g,t}^{u2}$ 满足 $w_{g,t}^{u2} = w_{g,2,t}u_g^{BS}$, 线性化后的公式如式(A11)和式(A12)所示。

$$0 \leq w_{g,t}^{u2} \leq u_g^{BS}M \quad (A11)$$

$$-(1 - u_g^{BS})M \leq w_{g,t}^{u2} - w_{g,2,t} \leq (1 - u_g^{BS})M \quad (A12)$$

对式(33)进行线性化, 如式(A13)和式(A14)所示。

$$-(1 - u_{ij,t}^b)M \leq P_{ij,t} - \left[g_{ij} \cdot \frac{v_{i,t}^2 - v_{j,t}^2}{2} - b_{ij}(\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \right] \leq (1 - u_{ij,t}^b)M, \quad \forall (ij) \in E, t \in T^R \quad (A13)$$

$$P_{ij,t} - \left[g_{ij} \cdot \frac{v_{i,t}^2 - v_{j,t}^2}{2} - b_{ij}(\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \right] \leq (1 - u_{ij,t}^b)M, \quad \forall (ij) \in E, t \in T^R \quad (A14)$$

对式(34)进行线性化, 如式(A15)和式(A16)所示。

$$\begin{aligned}
 & -(1-u_{ij,t}^b)M \leq Q_{ij,t} - \left[-b_{ij} \cdot \frac{v_{i,t}^2 - v_{j,t}^2}{2} - g_{ij}(\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \right] \\
 & \forall (ij) \in E, t \in T^R \qquad \qquad \qquad (A15)
 \end{aligned}
 \qquad
 \begin{aligned}
 & Q_{ij,t} - \left[-b_{ij} \cdot \frac{v_{i,t}^2 - v_{j,t}^2}{2} - g_{ij}(\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \right] \leq \\
 & (1-u_{ij,t}^b)M, \forall (ij) \in E, t \in T^R \qquad \qquad \qquad (A16)
 \end{aligned}$$

附录 B

表 B1 机组处于不同启动状态时的等待并网时间
Table B1 Cranking time of units at different start-up states

机组	min			
	极热启动状态时的 等待并网时间	热启动状态时的 等待并网时间	温启动状态时的 等待并网时间	冷启动状态时的 等待并网时间
G1	10	20	30	50
G2	10	20	30	50
G3	10	20	30	50
G4	10	20	30	50
G5	10	20	30	50
G6	10	20	30	50
G7	10	20	30	50
G8	10	20	30	50
G9	10	20	30	50
G10	10	20	30	50

表 B2 机组各个启动状态的起止时间
Table B2 Starting and ending intervals of units at each start-up state

机组	min							
	极热启动状 态的起始 时间	极热启动状 态的截止 时间	热启动状态 的起始 时间	热启动状态 的截止 时间	温启动状态 的起始 时间	温启动状态 的截止 时间	冷启动状态 的起始 时间	冷启动状态 的截止 时间
G1	0	10	10	50	50	120	120	300
G2	0	10	10	50	50	120	120	300
G3	0	10	10	50	50	120	120	300
G4	0	10	10	50	50	120	120	300
G5	0	10	10	50	50	120	120	300
G6	0	10	10	50	50	120	120	300
G7	0	10	10	50	50	120	120	300
G8	0	10	10	50	50	120	120	300
G9	0	10	10	50	50	120	120	300
G10	0	10	10	50	50	120	120	300

附录 C

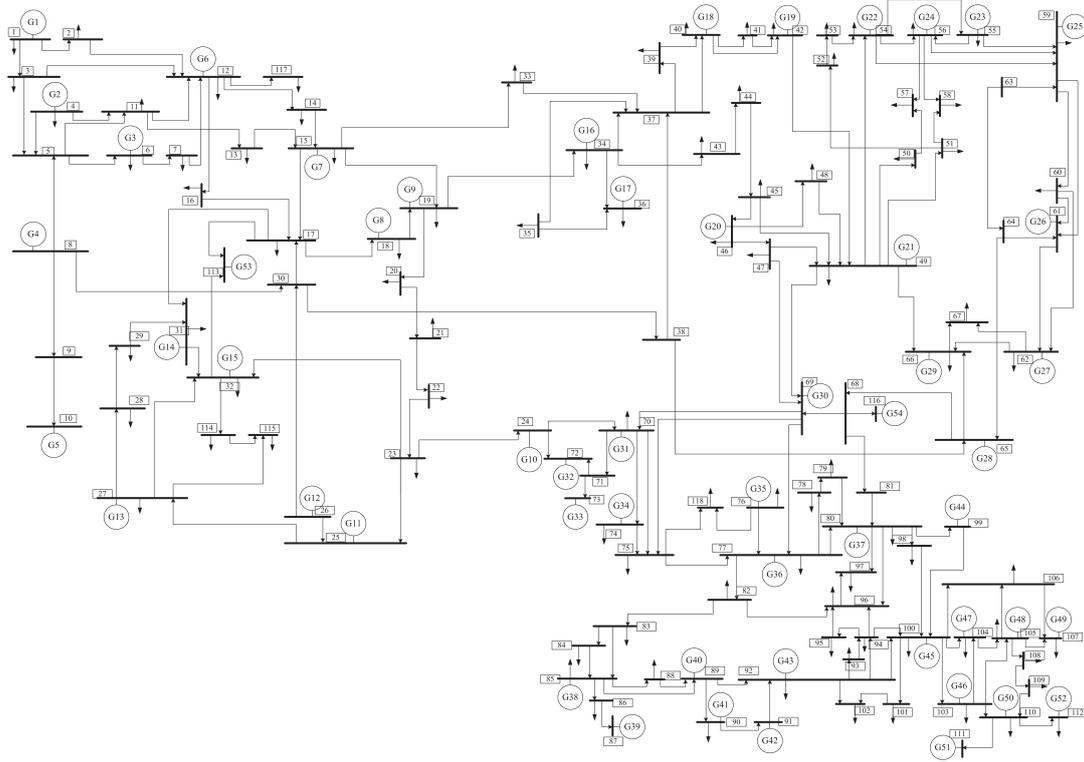


图 C1 IEEE 118 节点拓扑图

Fig. C1 Topology of the IEEE 118-bus system

参考文献

[1] 胡秦然, 丁昊晖, 陈心宜, 等. 美国加州 2020 年轮流停电事故分析及其对中国电网的启示[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(24): 11-18.
 HU Qinran, DING Haohui, CHEN Xinyi, et al. Analysis on rotating power outage in California, USA in 2020 and its enlightenment to power grid of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 11-18.

[2] 林伟芳, 易俊, 郭强, 等. 阿根廷“6.16”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2835-2842.
 LIN Weifang, YI Jun, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in Argentine power grid on June 16, 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2835-2842.

[3] 严道波, 文劲宇, 杜治, 等. 2021 年德州大停电事故分析及其对电网规划管理的启示[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 121-128.
 YAN Daobo, WEN Jinyu, DU Zhi, et al. Analysis of Texas blackout in 2021 and its enlightenment to power system planning management[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 121-128.

[4] 贾伯岩, 李丹, 李雄宇, 等. 电-气综合能源系统多故

障两阶段恢复策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 113-123.
 JIA Boyan, LI Dan, LI Xiongyu, et al. Two-stage restoration strategy for multi fault of an electric gas integrated energy system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 113-123.

[5] XU Yan. A review of cyber security risks of power systems: from static to dynamic false data attacks[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 8-19.

[6] 刘皓明, 丁帅, 卢恩, 等. 含快速切负荷功能火电机组的电力系统黑启动策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 23-28.
 LIU Haoming, DING Shuai, LU En, et al. A power system black-start strategy considering thermal power units with FCB function[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 23-28.

[7] 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 unloaded line energization by large-scale thermal FCB unit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 168-173.

[8] 丁永允, 黄晓鹏, 路军锋, 等. 燃煤电站全厂 FCB 功能

- 实现及控制策略[J]. 热力发电, 2020, 49(12): 151-157.
DING Yongyun, HUANG Xiaopeng, LU Junfeng, et al. Whole plant FCB function realization of coal-fired power plants and the control strategy[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(12): 151-157.
- [9] 施敏. 外高桥第三发电厂#7机组FCB孤岛运行试验分析[J]. 上海节能, 2020(6): 624-629.
SHI Min. FCB isolated island operation test analysis of #7 unit at Waigaoqiao No.3 power plant[J]. Shanghai Energy Conservation, 2020(6): 624-629.
- [10] 刘皓明, 宁健, 吴健超, 等. 快速切负荷机组配置方案经济性评估[J]. 中国电力, 2015, 48(7): 95-100.
LIU Haoming, NING Jian, WU Jianchao, et al. Economic analysis of optimal allocation of fast cut back thermal power units[J]. Electric Power, 2015, 48(7): 95-100.
- [11] 卢恩, 宁健, 刘皓明, 等. 应用序优化理论的快速切负荷机组布点方案[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1216-1222.
LU En, NING Jian, LIU Haoming, et al. An ordinal optimization based locating scheme of fast cut back thermal power units[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1216-1222.
- [12] 刘崇茹, 熊岑, 吴旻昊, 等. 综合考虑投资成本和经济收益的快速切回机组布点方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 46-51.
LIU Chongru, XIONG Cen, WU Minhao, et al. An FCB unit placement scheme considering investment cost and economic benefit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 46-51.
- [13] SUN Wei, LIU C C, ZHANG Li. Optimal generator start-up strategy for bulk power system restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1357-1366.
- [14] 李翠萍, 张世宁, 李军徽, 等. 风储系统作为黑启动电源的容量配置策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 88-95.
LI Cuiping, ZHANG Shining, LI Junhui, et al. Capacity configuration strategy of a wind power and energy storage system as a black-start source[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 88-95.
- [15] 付华, 刘公权, 齐晨飞, 等. 计及微电网黑启动的虚拟同步发电机调频策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 59-68.
FU Hua, LIU Gongquan, QI Chenfei, et al. Frequency regulation strategy of a virtual synchronous generator-based microgrid considering the black start process[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 59-68.
- [16] SUN Lei, LIU Weijia, CHUNG C Y, et al. Improving the restorability of bulk power systems with the implementation of a WF-BESS system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2366-2377.
- [17] GU Xueping, LIU Wenxuan, SUN Cong. Optimisation for unit restarting sequence considering decreasing trend of unit start-up efficiency after a power system blackout[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(16): 4187-4196.
- [18] LI Zhiyi, SHAHIDEHPOUR M, AMINIFAR F, et al. Networked microgrids for enhancing the power system resilience[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1289-1310.
- [19] PANTELI M, MANCARELLA P, TRAKAS D N, et al. Metrics and quantification of operational and infrastructure resilience in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4732-4742.
- [20] 李少岩, 顾雪平, 梁海平. 给定恢复目标的扩展黑启动方案路径优选[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 59-64.
LI Shaoyan, GU Xueping, LIANG Haiping. Energizing path optimization for extended black-start schemes with given recovery targets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 59-64.
- [21] YE Zhigang, CHEN Chen, CHEN Bo, et al. Resilient service restoration for unbalanced distribution systems with distributed energy resources by leveraging mobile generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(2): 1386-1396.
- [22] YANG Zhifang, ZHONG Haiwang, BOSE A, et al. A linearized OPF model with reactive power and voltage magnitude: a pathway to improve the MW-only DC OPF[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1734-1745.
- [23] FOURER R, GAY D M, KERNIGHAN B W. A modeling language for mathematical programming[J]. Management Science, 1990, 36(5): 519-554.
- [24] QIU Feng, WANG Jianhui, CHEN Chen, et al. Optimal black start resource allocation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 2493-2494.
- [25] WANG Dajiang, GU Xueping, ZHOU Guangqi, et al. Decision-making optimization of power system extended blackstart coordinating unit restoration with load restoration[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2017, 27(9): 1-18.

收稿日期: 2022-06-08; 修回日期: 2022-07-26

作者简介:

李明明(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统恢复; E-mail: li_mm1226@163.com

孙磊(1989—), 男, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统恢复、电力系统规划及其可靠性; E-mail: leisun@hfut.edu.cn

丁明(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统规划及其可靠性、新能源技术及其应用。

E-mail: mingding@126.com

(编辑 周金梅)