

# 基于光伏电站的两阶段网架恢复综合优化方法

项添春,李国栋

(国网天津市电力公司电力科学研究院,天津 300010)

**摘要:**与传统发电技术相比,光伏发电由于其分布范围广,并网迅速,以及具有良好的自启动能力,在电力系统黑启动中有着巨大的应用潜力。针对光伏发电不同于常规黑启动机组的特点,制定了基于光伏发电的分阶段网架恢复策略。阶段一利用光伏发电机组,以最大化启动成功的概率为目标,启动网架内的第一台机组;阶段二以该被启动机组为主要电源,分布式电源为辅助,以在最短时间内恢复最大出力为目标,实现整体的网架恢复。综合两阶段的启动特性,提出了一种启动策略的综合优化方法,在保证网架恢复效率的同时,又能够有效解决光伏系统惯性差,黑启动能力弱的问题。算例分析验证了所提方法的实用性和有效性。

**关键词:**网架恢复;光伏电站;两阶段;综合优化

**中图分类号:**TM76

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2017)05-0021-08

## 0 引言

近年来,随着“坚强智能电网”概念的提出和建设,电力系统在可靠性、灵活性等方面有了长足的发展,但恶劣天气、自然灾害、设备故障等原因引发的大面积停电事故却仍然难以避免<sup>[1,2]</sup>。随着电网规模的不断增大,电网的恢复工作也变得越来困难,因此对大停电后电力系统恢复的研究显得尤为重要。

目前电网大停电后的网架恢复工作,一般采用常规具有自启动能力的机组,如水轮发电机组以及具备FCB功能的火电机组。光伏发电作为一种清洁能源,分布范围广,并网迅速,具有良好的自启动能力,在电力系统黑启动中有着巨大的应用潜力<sup>[3]</sup>。

完整的电力系统恢复一般包括黑启动、网架恢复与负荷恢复3个阶段<sup>[4,5]</sup>。光伏发电可以广泛地参与这3个阶段的恢复工作。电网发生大停电时,光伏发电能够向周边负荷提供持续的电力供应,形成局部的小系统,待系统主干网架恢复之后进行并网<sup>[6]</sup>;甚至可以作为黑启动电源,直接向火电机组厂用负荷及原动机供电,从而启动没有自启动能力的发电机组,在一定程度上避免重要负荷的停电损失并且加快电网黑启动进程。

目前国内外对以光伏发电作为黑启动电源的网架恢复还只处于初步研究阶段,尚未见文献对此进行详细阐述。文献[7]提出了一种针对黑启动场

景的微电网运行模式,并印证了利用微电网恢复系统服务的可行性;文献[8]对微源的黑启动能力进行了分析,并提出了并行恢复的策略,但并没有涉及到由微源直接启动大型发电机组;文献[9]提出了光伏机组并行启动的路径优化策略,将电网分区,每个区内有一台光伏电站用以启动其他常规机组,但忽视了光伏电站与常规类型的机组黑启动能力上的不同;文献[10]利用萤火虫算法研究了分布式新能源发电对于黑启动过程的辅助作用,但没有考虑到所在地区没有其他自启动机组的情况。此外许多针对光伏发电参与黑启动的研究大多集中在光伏逆变器或多逆变器的控制策略上<sup>[11-13]</sup>,而对于整体的网架恢复和路径优化问题并没有过多涉及。

对于传统的电力系统停电后恢复问题,国内外围绕恢复路径寻优<sup>[14]</sup>、网架重构<sup>[15]</sup>、系统分区优化<sup>[16]</sup>及启动效率和风险评估<sup>[17]</sup>等方面已有相当的研究成果,这些成果对于光伏场景下的系统恢复有一定的借鉴意义。文献[18]提出了一种输电网架恢复的分层协同方法,采用分层次独立优化与受电点指标值整体寻优相结合的方法,有效降低了问题求解规模,并能够兼顾求解全局性与各层级的恢复偏好。文献[19]提出了一种电力系统扩展黑启动方案,由一个黑启动电源同时启动多个被启动电厂,以一定时间内恢复发电量的加权和最大为优化目标,将优化问题转化为二维背包问题求解,但在求解过程中没有考虑被启动机组对后续恢复过程的有利作用。文献[20]提出应该综合考虑恢复容量和停电损失作为网架重构效率指标。文献[21]将黑启动决策视为混合整数非线性规划问题,开发

收稿日期:2017-03-27;修回日期:2017-05-27

基金项目:国家电网公司科技项目(售电市场环境下的智慧城市多能源综合利用关键技术研究及应用)

了一种针对孤立电网的决策支持系统。

上述文献在制定网架恢复策略时,并没有过多考虑光伏发电作为启动电源在特性上与常规黑启动电源的差异性,但实际上由于其分布式特性,出力的不稳定性,以及系统惯性等与常规黑启动机组有较大的不同,在启动特性上必然有一定的差异,因此有必要对基于光伏电站的系统恢复策略进行研究。

## 1 基于光伏电站的两阶段黑启动策略

适合作为黑启动电源的机组,应该至少具备3个条件:

(1) 具有良好的自启动能力。由于系统停电之后,厂用电几乎全部失去,常规的火电机组通常不具备自启动能力,因此目前的黑启动电源通常选取抽水蓄能电站中的水轮机组和燃气轮机组<sup>[22]</sup>。

(2) 具有良好的调频调压能力。防止因负荷突增引起的频率震荡和过电压导致启动失败,这要求该机组具备较强的抗干扰能力。

(3) 具有充足发电容量。能够保证对带启动机组大型辅机以及周边负荷的电能供应,并能够承受其他非黑启动电源启动时的短时功率冲击。

显然光伏发电在自启动能力上具有卓越的优势,其启动只需依靠太阳能,成本低廉且无需过多投入,但光伏发电用于黑启动同样存在一些问题。首先,光伏主要通过电力电子逆变器并网,其系统惯性很低,抗干扰能力差,在突加负荷时造成的冲击效应,不仅可能导致黑启动失败,甚至可能对原有光伏系统造成破坏性后果;其次,光伏电源实现调压调频主要依靠逆变器的控制策略,调节能力有限<sup>[23]</sup>;另外,考虑到分布式光伏电站容量通常较小(一般在20 MW以下),且出力受环境影响具有不稳定性,再加上沿线充电功率的损耗,一个分布式电源发出的功率往往不能单独启动一台常规火电机组,而需要多个分布式电源配合启动同一个电厂。

由以上分析可知,光伏发电在黑启动的过程中更适合作为辅助电源,而主要任务仍需要由常规机组承担。文中针对光伏场景下的黑启动启动过程提出了一种两阶段的机组启动策略,并针对具体的启动目标设计了综合优化方法。

### 1.1 阶段一

考虑在一个区域内的不同地点分布有多个分布式光伏电源,同时有多个发电厂需要启动,首先集中多个分布式电源为一个发电厂供电,使其成功启动。问题的核心可以转化为利用弗洛伊德算法

求多源最短路径问题,考虑多种约束条件设置路径权值<sup>[10]</sup>,得到一个在技术上最有可能启动成功的电厂目标。

#### 1.1.1 目标函数

假设所在区域内没有具有自启动能力的其他机组,光伏电站是唯一的黑启动电源。鉴于目前光伏电站的容量较小,且由于天气状况往往不能做到全功率运行,除启动初期为维持系统平衡而供应部分本地负荷外,还需要考虑充电路径过程中的功率损失,而火电机组启动时所需的启动功率一般在十兆瓦到几十兆瓦,因此在第一阶段如何有效地聚集各个光伏电站的能量以成功启动第一台机组显得至关重要。火电机组成功启动后一般能够发出的容量为几百兆瓦,对于启动其他机组显得绰绰有余,因此第二阶段一般不需着重考虑启动功率是否充足的问题,而重点解决如何更高效快速的恢复整个网架。

考虑到分布式电源的黑启动能力较弱,为了最大化黑启动成功的概率,应该选择网络内最容易启动的一台机组进行启动,而这取决于充电路径的线路充电无功功率、被启动机组的启动功率和光伏电站的容量等因素。

文中引入图论中的最短路径思想,将整个网络抽象成一个带权无向连通图。在黑启动时为防止因线路充电无功功率引起过电压而导致黑启动失败,希望在充电时由电源点到目标点的沿线充电无功功率最小,因此将考虑高抗或低抗补偿后线路的剩余充电功率作为该线路所对应边的权值。为分析问题方便,本文线路的充电无功功率和电抗器消耗的无功功率均取为额定电压时的值。另外,由于电压转换次数的增加将会增加变压器铁磁谐振和三相不同期合闸的概率,恢复路径中电压转换的次数应该尽量少,一般不应超过3次<sup>[24]</sup>,因此将含变压器线路的权值设置为一个较大的数值,以减少电压转换的次数。

由于多台黑启动电源同时启动一台机组,因此本阶段的目标为寻找图中的某一点,使其到各个黑启动电源的路径权值的和最小,即:

$$\min_{1 \leq i \leq M} \left\{ \sum_{j=1}^{j=N} w(i, j) \right\} \quad (1)$$

式(1)中: $M$ 为待启动机组数量; $N$ 为分布式光伏电源数量; $w$ 为节点 $i$ 与 $j$ 之间的最短路径值。

#### 1.1.2 约束条件

(1) 启动功率约束。为了被启动机组在送电路径恢复后能顺利启动,所有被启动机组所需的启动

功率之和应小于黑启动电源所能提供的初始启动功率之和(包括后来启动成功的机组发出的功率)。即:

$$\sum_{i=1}^{ng} P_{r,i} < K_1 \cdot \sum_{i=1}^{ns} P_{s,i} \quad (2)$$

式(2)中: $ng$  为待启动的机组数量; $ns$  为已启动并能够提供功率的机组数量; $P_{r,i}$  为被启动机组  $i$  所需的启动功率; $K_1$  为有功可靠性系数,取小于 1 的值; $\sum P_{s,i}$  为黑启动电源所能提供的全部启动功率。

(2) 过电压约束。过电压问题常被认为是导致黑启动失败的重要因素之一。高压输电线路由于分布电容效应,在空载充电时会产生大量的容性无功功率。若黑启动电源的无功吸收能力不足,将导致线路末端电压高于正常水平,即工频过电压现象。即:

$$\sum_{j=1}^{nl} Q_{Lj} < K_2 \cdot \sum_{i=1}^{ns} Q_{s,i} \quad (3)$$

式(3)中: $nl$  为扩展黑启动方案恢复路径的线路条数; $Q_{Lj}$  为线路  $j$  的充电无功功率; $Q_{s,i}$  为黑启动电源能吸收的最大无功功率; $K_2$  为无功可靠性系数。

需要指出的是,由于光伏电站发出的是直流电,其无功功率主要来源于逆变装置中的滤波元件,无功功率有限,因此必须要采取相应的措施,如调节变压器分接头、适量投入负荷等以避免过电压现象的发生。这些措施需要一定的时间实施,将拖慢网架恢复进程。

(3) 其他约束。当被启动电厂的大型辅机启动时,可能造成系统频率震荡和电压跌落;另外,在系统的恢复过程中,系统的运行状态量必须满足潮流的约束、发电机的有功无功出力范围不能越限等约束。

### 1.1.3 算法求解

利用 Floyd 算法解决多源最短路径问题<sup>[25]</sup>。设图  $G=(V,E)$ , 顶点集记作  $v_1, v_2, \dots, v_n$  的每条边赋有一个权值,  $w_{ij}$  表示边  $v_i, v_j$  上的权,若  $v_i, v_j$  不相邻,则令  $w_{ij} = +\infty$ 。

令  $d_{ij}^k$  是从顶点  $i$  到顶点  $j$ , 且所有中间顶点皆属于集合  $\{1, 2, \dots, k\}$  的一条最短路径的权值, 则 Floyd 算法是按照递归的方式从下至上按照  $k$  值递增顺序计算  $d_{ij}^k$ , 其基本步骤为:

(1) 得到权矩阵  $W$ 。对所有  $i, j$ , 有  $d_{ij}^1 = w_{ij}, k = 1$ ;

(2) 更新  $d_{ij}^k$  得:

$$d_{ij}^k \leftarrow \min(d_{ij}^{(k-1)}, d_{ik}^{(k-1)} + d_{kj}^{(k-1)}) \quad (4)$$

(3) 若  $k = n$  停止, 否则转到(2)。

设  $W$  为权值矩阵; $n$  为节点数量; $D^{(k)}$  为迭代过程中记录最短路径权值的矩阵,  $D^{(0)}$  即为  $W$ , 迭代结束后  $D^{(n)}$  中的元素  $d_{ij}^{(n)}$  即为任意 2 点之间的最短路径值; $k, j, i$  为标志迭代过程的变量。阶段一求解算法流程图如图 1 所示。

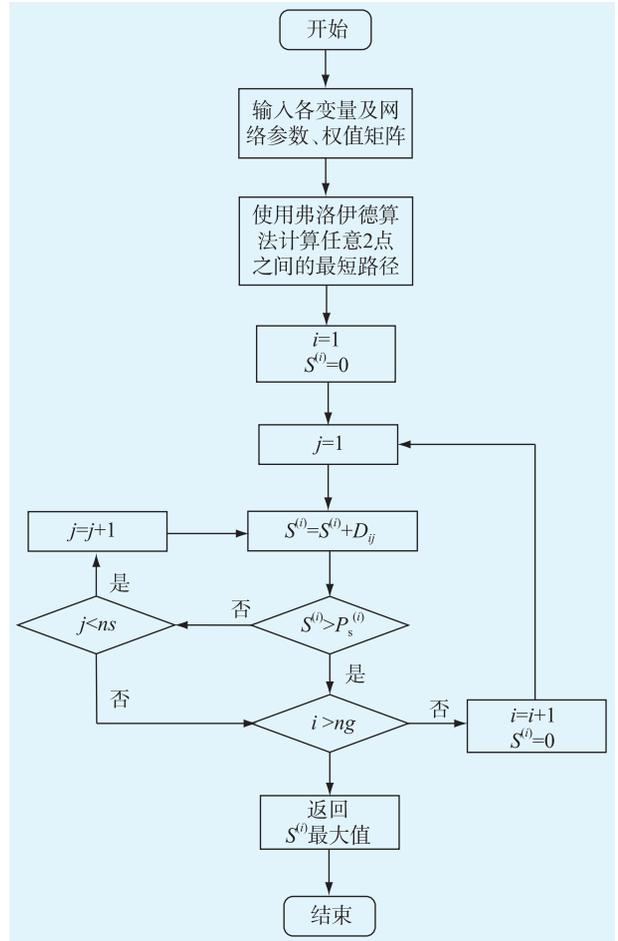


图 1 阶段一求解算法流程图

Fig.1 Flowchart of solution algorithm of phase I

在求得每个待启动机组到各电源点的最短路径之后,将其求和,然后进行比较,权值和最小的即为阶段一的目标待启动机组。

### 1.2 阶段二

已经有一台发电厂成功启动,鉴于分布式电源与常规水火电厂容量相比较小,主要考虑以该发电厂作为主要黑启动电源,各光伏电站作为辅助电源,进而启动网络内其他电厂。该问题可以转化为利用 Dijkstra 算法搜寻最优充电路径,以及利用回溯法进行启动方案的优选,求得最短时间内发出最大电量的启动方案。

#### 1.2.1 目标函数

当第一台火电机组被成功启动之后,接下来的任务便是以其为中心点陆续启动其他机组,并为后续的网络重构提供最大的功率支持。由于本阶段

以常规火电机组作为主要电源,其启动过程与常规的网架恢复过程较为类似,不同之处在于部分线路和节点已经得到了恢复。

本阶段主要考虑待启动机组以及恢复路径的选择,希望在满足机组启动与系统运行的各种约束条件下,在最短的时间内恢复尽量多的电能供应<sup>[26]</sup>。考虑到在启动初期恢复的出力在整个黑启动过程中尤为重要,因此引入时间权值,随 $t$ 的增加而逐渐减小<sup>[19]</sup>。定义目标函数为:

$$F = \max \frac{\sum_{i=1}^n \int_{T_{on,i}}^{T_{off}} \alpha(t) \cdot P_{Gi}(t) dt}{T_{off}} \quad (5)$$

式(5)中: $n$ 为网络内发电机组的数量; $T_{on,i}$ 和 $T_{off}$ 分别为机组 $i$ 的启动时间和黑启动过程完全结束的时间; $P_{Gi}(t)$ 为机组 $i$ 在 $t$ 时刻发出的有功功率,其值可由简化的机组出力曲线<sup>[27]</sup>得到,如图2所示。

$$P_{Gi}(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq T_{Si} + T_{ai} \\ K_{pi}(t - T_{Si} - T_{ai}) & T_{Si} + T_{ai} \leq t \leq T_{Si} + T_{ai} + T_{bi} \\ P_{mi} & t \geq T_{Si} + T_{ai} + T_{bi} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: $T_{Si}$ 为机组 $i$ 的启动时刻; $T_{ai}$ 为机组 $i$ 从启动到向外输送功率所需的时间; $T_{bi}$ 为机组 $i$ 从爬坡到达最大出力所需的时间; $K_{pi}$ 为机组 $i$ 的最大爬坡率; $P_{mi}$ 为机组 $i$ 的最大出力。

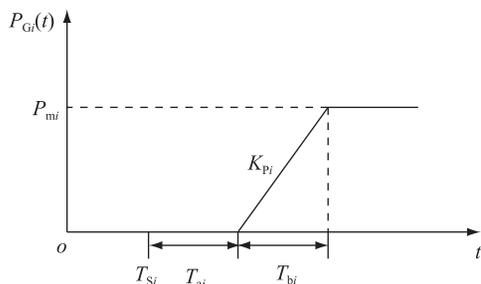


图2 简化的机组出力曲线

Fig.2 Power output curve of a generating unit

需要指出的是,黑启动除了考虑发电机的启动时间外,还应考虑线路、变压器的标准操作间隔以及无功补偿装置等的投切时间。

### 1.2.2 约束条件

阶段二启动过程需要满足的约束条件,除阶段一所列的因素之外,还应包括发电机自励磁约束和机组启动约束。

(1) 发电机自励磁约束。工程实际中,一般认为当黑启动机组的额定容量与短路比之积大于发电机外电路经过补偿后的线路剩余充电功率时,不会发生自励磁,即发电机自励磁约束为:

$$\sum_{j=1}^{nL} Q_{Lj} < \sum_{i=1}^{ns} K_i S_i \quad (7)$$

(2) 机组启动时间约束。被启动机组大多为火电机组,而火电机组具有最小和最大临界启动时间约束,机组从启动到并网经历的时间与其被启动时刻有关。机组启动时间约束为:

$$T_{start} = \begin{cases} T_{sh} & 0 < t_{start} < T_{CH} \\ T_{sc} + T_{CC} & t_{start} \geq T_{CH} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: $T_{start}$ 为机组启动到并网所需的时间; $T_{sh}$ 为机组热启动时间; $T_{sc}$ 为机组冷启动时间; $T_{CH}$ 为机组最大临界热启动时间; $T_{CC}$ 为机组最小临界冷启动时间; $t_{start}$ 为为机组启动时刻。

### 1.2.3 算法设计

阶段二采用“并行”启动,即同时对所有符合启动约束条件的待启动机组充电,从而提高网架恢复的效率。本阶段的路径权值仍然使用考虑高抗或低抗补偿后本线路的剩余充电功率。

本阶段使用回溯法(Backtracking)进行启动方案的优选,从黑启动电源开始,按照深度优先的规则搜索下一层待启动机组,同时调用Dijkstra算法为得到的机组搜索恢复路径,然后判断搜索到的充电路径以及该机组的启动功率等是否满足当前网络的约束条件。若满足则为一个可行方案,将该机组压入已启动机组队列,将该点与电源点的路径权值设为一极小值,以有效利用带电网络,接下来搜索下一层待启动机组;若不满足约束条件则搜索该层的下一备选机组。重复该过程,直到搜索到达最后一层,此时应计算该方案的目标函数值,并判断其是否为当前最优方案。当回溯法搜索完毕,所记录的方案即为最优方案。阶段二整体求解算法的流程图如图3所示。

## 2 综合优化方法

至此已对光伏电站作为黑启动电源的系统恢复的两个阶段进行了阐述,并制定了相应的求解算法。但由于两个阶段的算法实现目标不同,如果分别求解,可能并不能达到整体上的最优解,比如第一阶段求出的目标启动机组可能与其他机组相距较远,以其作为第二阶段的电源机组并不能实现整体网架的快速高效恢复,因此在实际操作过程中,有必要综合的考虑两个阶段的目标和特点,从全局出发制定最优的启动策略。

文中将阶段一和阶段二综合求解,求解目标在式(5)的基础上,包含了阶段一的启动时间、恢复出力,即:

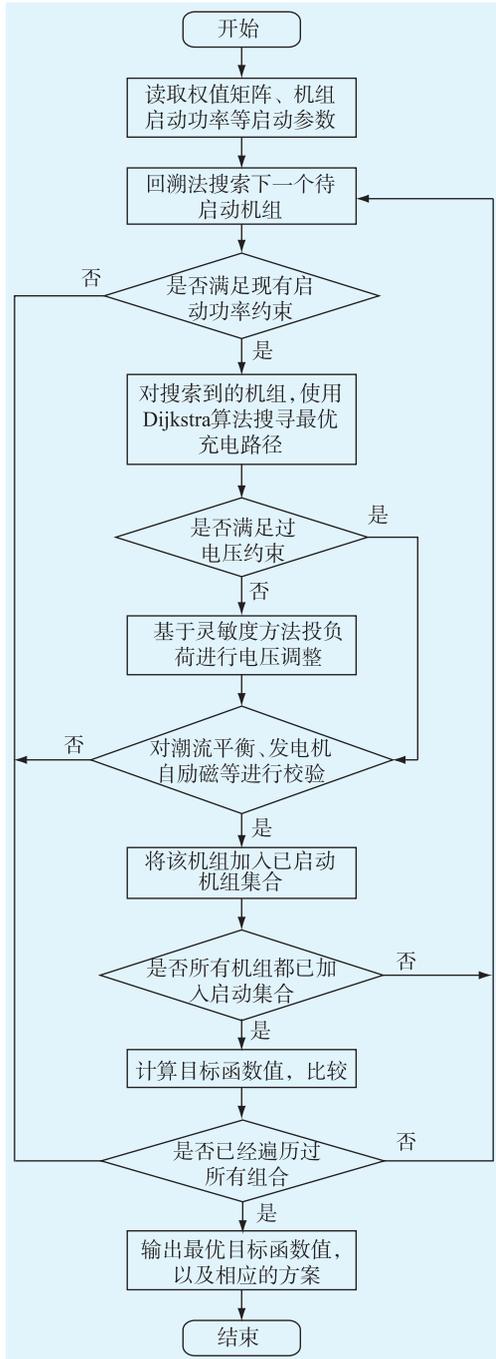


图3 阶段二求解算法流程图

Fig.3 Flowchart of solution algorithm of phase 2

$$F = \max \frac{\sum_{i=1}^n \int_{T_{on}}^{T_{off}} \alpha(t) \cdot P_{Gi}(t) dt}{T_{off}} \quad (9)$$

式(9)中: $T_{on}$ 和 $T_{off}$ 为整个黑启动过程的开始和结束时间,其他与式(5)相同,由于假设光伏电站从开始到整个恢复过程结束一直处于发电状态,因此在式(9)中没有计入光伏电站所发的电量。

另外,把阶段一所得结果作为一个内部约束条件,对阶段一中各机组的启动路径和进行排序,规定只有前几位的机组可以作为阶段二的备选机组。这样既能有效降低阶段一启动机组时的风险性,又

能给予阶段二的选择方案空间,从而实现全局最优。

### 3 算例分析

选用 IEEE10 机 39 节点系统作为算例,对提出的黑启动优化方法进行验证(如图 4 所示)。

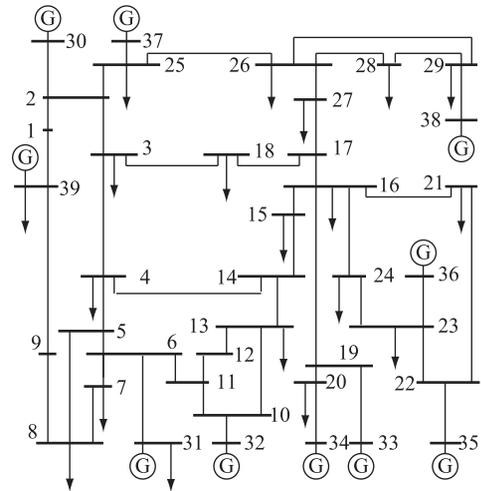


图4 IEEE 10 机 39 节点系统

Fig.4 IEEE 10-unit 39-bus power system

假设网络中存在 4 个分布式光伏电站,其容量、逆变效率等参数如表 1 所示。各待启动机组的参数如表 2 所示。

表 1 光伏电站参数

Table 1 Parameters of the photovoltaic generators

所在节点	容量/MW	逆变效率/%	交流侧功率因数
9	26.0	96	0.9
19	20	96	0.9
33	13.6	96	0.9
14	12	96	0.9
16	10	96	0.9

表 2 被启动机组参数

Table 2 Parameters of the units to be restored

节点编号	$P_c$ /MW	$P_r$ /MW	$K_p$ /MW	$T_a$ /h	$T_b$ /h
30	350	17.5	127.3	0.67	2.75
31	400	30.0	160.0	0.5	3.75
32	250	13.0	108.2	0.67	2.31
33	250	13.0	154.0	0.67	1.62
34	300	15.0	179.6	1.10	1.67
35	250	13.0	149.7	0.83	1.67
36	330	16.5	120.0	1.10	2.75
37	320	16.0	160.0	1.00	2.00
38	300	15.0	200.0	0.83	1.50
39	300	15.0	179.6	0.83	1.67

假设由于天气的情况,所有光伏电站只能发出额定容量 60%的电量,每条线路投运时间为 10 min,

可靠性系数分别为  $K_1=0.8$ ,  $K_2=0.6$ 。只有阶段一求出的权值和最小的前 5 个机组可以进入阶段二的启动过程。

使用本方法搜索所有可能的黑启动方案,阶段一选出的 5 个机组及其充电路径分别如表 3 所示。

表 3 阶段一求解结果

被启动机组节点编号	作为电源的光伏电站节点编号	启动所需时间/h
33	19, 33	2.61
35	16, 19	3.62
34	16, 19	3.57
32	14, 16, 19	4.5
36	14, 16, 19	5.05

结果表明,以 33 号发电机组作为阶段一的被启动机组和阶段二的主力电源,能够实现最优启动,相应最优的机组启动顺序为:33 → 36 → 34 → 35 → 30 → 37 → 39 → 38 → 32 → 31。其具体启动路径如表 4 所示。

表 4 最优恢复方案

启动顺序	启动机组节点编号	充电路径	启动所需时间/h
1	36	33→19→16→24→23→36	3.41
2	34	19→20→34	3.89
3	35	36→23→22→35	4.37
4	30	16→17→18→3→2→30	5.49
5	37	30→2→25→37	5.97
6	39	2→1→39	6.45
7	38	37→25→26→29→38	7.09
8	32	14→13→10→32	8.21
9	31	10→11→6→31	8.85

按照该启动顺序进行启动时,平均每小时发出的电量可以达到 1122 MW,并行启动时最后一台机组(31 号机组)被成功启动用时 8.85 h。

由求解结果可以看出,在阶段二,首先得到启动的是距离 33 号机组较近的 36,34,35 号机组,这是因为在启动的初期,黑启动电源发出的功率相对于机组的启动功率来说较为充裕,不需等待后续机组的加入即可启动多台机组,因此启动过程所消耗的时间主要来自于对线路的充电时间。同时我们还可以看出,虽然 31 号机组的发电量在所有机组中是最大的,但由于其启动功率较大,且恢复出力时间较长,所以并没有首先启动。

在本例中,如果不按照文中提出的分阶段启动方法,而是按照常规电源进行分区,每个分区内只

有一个黑启动电源的启动方案,则仅有 38 号机组满足启动条件,得到优先启动。对该情况进行黑启动仿真,结果显示整个黑启动过程历时 9.6 h,平均每小时发电量为 992 MW,小于采用本方法制定的启动方案,充分说明了本方法的高效性。

为了体现无功约束对于黑启动方案的影响,统计了不同无功容量下使用回溯法搜索到的可行方案数量,如图 5 所示,随着无功可吸收量的减少,备选的黑启动方案数量呈明显下降的趋势。因此,以光伏发电作为黑启动电源时必须要保证充足的无功供应量。

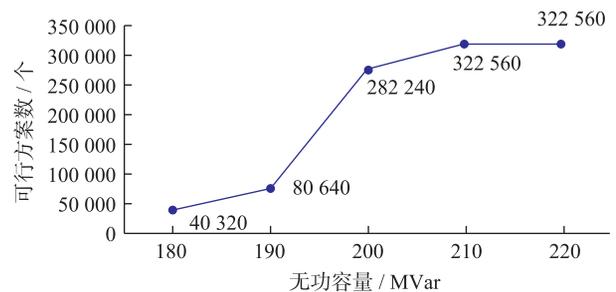


图 5 无功容量与可行方案数折线图

Fig.5 Number of feasible plans-reactive capacity curve

## 4 结论

文中针对分布式光伏电站的特点,提出了一种基于光伏电站的分阶段黑启动策略。将黑启动分解为两个相互关联的阶段,阶段一利用多个光伏机组启动网络内第一台被启动机组,主要考虑最大化成功启动机组的概率;阶段二以该被启动机组为主要电源,其启动策略近似于常规电源类型的黑启动过程。本方法对两个阶段分别设立独立的优化目标,并从全局考虑,兼顾两个阶段的启动特性,提出了综合优化方法,有效地解决了分布式电源黑启动能力弱的问题。

该方法是对分布式电源参与电力系统停电后恢复过程的初步探讨,不仅适用于黑启动电源仅有光伏电站的场合,对于多种类型的黑启动电源的恢复场景也有一定的指导和启发意义。与此同时,还可以进一步研究光伏出力的不确定性对于电网架构恢复过程的影响,并在算法的执行效率以及启动效果的评估等方面进一步研究与论证,使该方法能够更广泛地适用于多场景的电网黑启动恢复过程。

### 参考文献:

- [1] ALLEN E H, STUART R B, WIEDMAN T E. No light in August: power system restoration following the 2003 north American blackout [J]. Power and Energy Magazine, IEEE,

- 2014,12(1): 24-33.
- [2] 薛禹胜,肖世杰. 综合防御高风险的小概率事件: 对日本相继天灾引发大停电及核泄漏事件的思考[J]. 电力系统自动化,2011,35(8): 1-11.
- XUE Yusheng, XIAO Shijie. Comprehensively defending high risk events with low probability: reflections on Japan's successive natural disasters causing blackouts and nuclear leakage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 1-11.
- [3] CASTILLO A. Microgrid provision of blackstart in disaster recovery for power system restoration [C] // IEEE International Conference on Smart Grid Communications, IEEE, 2013: 534-539.
- [4] FINK L H, LIOU K L, LIU C C. From generic restoration actions to specific restoration strategies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 745-752.
- [5] ADIBI M M, FINK L H. Power system restoration planning [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 09(1): 22-28.
- [6] LI J, MA X Y, LIU C C, et al. Distribution system restoration with microgrids using spanning tree search [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 3021-3029.
- [7] MOREIRA C L, RESENDE F O, LOPES J. Using low voltage microgrids for service restoration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 395-403.
- [8] 牟龙华,夏明栋,刘仲. 微电网的黑启动研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 32-37.
- MU Longhua, XIA Mingdong, LIU Zhong. Research on black-start for microgrid [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 32-37.
- [9] 董栋. 含微电网电力系统黑启动策略研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- DONG Dong. Black start strategy for power system with microgrid [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [10] EL-ZONKOLY A M. Renewable energy sources for complete optimal power system black-start restoration [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 09(6): 531-539.
- [11] LI J, SU J, YANG X, et al. Study on microgrid operation control and black start [C] // Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on IEEE, 2011: 1652-1655.
- [12] THALE S, AGARWAL V. A smart control strategy for the black start of a microgrid based on PV and other auxiliary sources under islanded condition [C] // Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2011 37th IEEE. IEEE, 2011: 2454-2459.
- [13] DUTTA S, RAMACHANDARAN V, BHATTACHARYA S. Black start operation for the solid state transformer created micro-grid under islanding with storage [C] // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2014: 3934-3941.
- [14] WANG C, VITTAL V, KOLLURI V S, et al. PTFD-based automatic restoration path selection [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1686-1695.
- [15] LIU Y, GU X. Skeleton-network reconfiguration based on topological characteristics of scale-free networks and discrete particle swarm optimization [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1267-1274.
- [16] WANG C, VITTAL V, SUN K. OBDD-based sectionalizing strategies for parallel power system restoration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1426-1433.
- [17] 刘艳,张凡,顾雪平. 大停电后的机组投运风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 106-113.
- LIU Yan, ZHANG Fan, GU Xueping. Risk assessment for restoring units following large-scale blackout [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 106-113.
- [18] 曹曦,王洪涛,刘玉田. 输电网架恢复的分层协同优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4906-4917.
- CAO Xi, WANG Hongtao, LIU Yutian. A Hierarchical Collaborative Optimization Method for Transmission Network Restoration [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4906-4917.
- [19] 顾雪平,钟慧荣,贾京华,等. 电力系统扩展黑启动方案的研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 25-32.
- GU Xueping, ZHONG Huirong, JIA Jinghua, et al. Extended black-start schemes of power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 25-32.
- [20] 刘连志,顾雪平,刘艳. 不同黑启动方案下电网重构效率的评估[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 24-28.
- LIU Lianzhi, GU Xueping, LIU Yan. Investigation on the efficiencies of power system reconfiguration with different black-start schemes [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(5): 24-28.
- [21] CHOU Y T, LIU C W, WANG Y J, et al. Development of a black start decision supporting system for isolated power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2202-2210.
- [22] 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.
- [23] MOREIRA C L, RESENDE F O. MicroGrids black start and islanding operation [J]. Proceedings of 15th PSCC, Liege, Belgium, 2005: 102-106.
- [24] 钟慧荣,顾雪平. 基于模糊层次分析法的黑启动方案评估及灵敏度分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 34-37.
- ZHONG Huirong, GU Xueping. Optimal planning of distribution networks based on common information model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 34-37.
- [25] 马慧远. 考虑恢复序列的电力系统黑启动分区研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2011.
- MA Huiyuan. Study on black start subarea of power system

- considering restoration sequence [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2011.
- [26] ANCONA J J. A framework for power system restoration following a major power failure [J]. Power Systems IEEE Transactions on, 1995, 10(3): 1480-1485.
- [27] 刘强, 石立宝, 周明, 等. 电力系统恢复中机组恢复的优化选择方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 164-170.  
LIU Qiang, SHI Libao, ZHOU Ming, et al. Optimal strategy for units start-up during power system restoration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 164-170.

作者简介:



项添春

项添春(1977—),男,浙江龙游人,高级工程师,研究方向为配电网安全运行、分布式电源与清洁能源(E-mail:375413708@qq.com);  
李国栋(1978—),男,天津人,硕士研究生,研究方向为配电网安全运行、分布式电源与清洁能源和园区能源管理。

## A Two-phase Integral Optimization Strategy for Network Restoration with Photovoltaic Generation

XIANG Tianchun, LI Guodong

(State Grid Electric Power Research Institute of Tianjin, Tianjin 300010, China)

**Abstract:** Compared with traditional generation technology, photovoltaic generation, which is widely spread and easily connected to the grid, has an excellent ability of self-starting, making it a promising alternative of black-start sources. Given the difference between PV and traditional black-start sources, a two-phase network restoration strategy was presented. In phase 1, PV units are used to restart the first traditional unit within the network, with the objective to maximize the possibility of starting successfully. In phase 2, the one generator started in phase 1 is used as the main power source, while PV units as the auxiliary source, to finish the whole restoration procedure, with the objective to maximize the power generated and minimize the time needed during the restoration. Taking the objectives of the two phases into consideration, an integral optimization method was proposed, which could fix the disadvantages of PV systems such as low inertia and relatively poorer starting ability, while guaranteeing the restoration efficiency. The case study of IEEE 30-bus system has proved the practicability and the effectiveness of the method proposed.

**Key words:** restoration; photovoltaic generation; two-phase; integral optimization

(编辑 钱悦)