

应用网络流理论的停电系统恢复路径混合整数线性优化模型

宋坤隆¹, 谢云云¹, 殷明慧¹, 邹 云¹, 周 前², 汪成根²

(1. 南京理工大学自动化学院, 江苏省南京市 210094; 2. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏省南京市 211103)

摘要: 停电系统恢复路径优化是一个组合优化问题, 其计算规模随着系统规模的扩大呈指数级增长, 加快恢复路径搜索速度是当前研究的热点之一。考虑到现有研究中的连通性约束尚未解析表达, 使停电系统恢复路径优化问题难以建模为混合整数优化模型。为此, 通过构建停电系统的单源多汇网络, 以节点投运状态和线路流量作为决策变量, 基于流量注入和到达节点间路径连通的基本原理, 分别设定网络中各节点的流量守恒约束和容量约束, 解析表达了网络连通性约束; 在此基础上, 将目标函数转换为线性表达形式, 建立了恢复路径优化的混合整数线性优化模型, 并采用 CPLEX 求解最优恢复路径。IEEE 标准系统和江苏电网系统的仿真结果表明, 基于所述模型的路径优化方法能够有效提高最优恢复路径的搜索速度。

关键词: 电力系统恢复; 路径优化; 连通性约束; 网络流

0 引言

虽然目前电力系统已经非常强壮, 但仍然存在大停电的风险^[1]。为了加快停电系统的恢复, 减小电网停电损失, 需要对停电系统的恢复路径进行优化^[2-4]。搜索已恢复节点到目标节点间的最优恢复路径是一个组合优化问题^[5], 随着系统规模的扩大, 最优路径求解的计算规模呈指数级增加, 故加快路径优化的计算速度, 对其在电力系统恢复中的应用具有重要意义。

停电系统恢复路径的优化是在满足约束条件的基础上, 求解使优化目标达到最优的恢复路径。现有研究中采用的目标函数主要有发电量最大^[6-10]、恢复线路加权和最小^[5,11-20]以及多个目标的综合^[21-24], 约束条件主要有过电压和自励磁约束、机组的启动时间和功率约束^[6-10]以及路径连通性约束^[5,11]等。由于恢复过程中已恢复机组和负荷会对后续恢复产生很大影响, 停电系统恢复是一个复杂的多阶段决策优化问题^[7]。因为恢复路径优化问题中约束条件的复杂性, 常采用分时步的思路简化部分约束, 提高计算速度^[5-7,20,23]。具体地, 先确定一个时步内需要恢复的节点^[16], 再优化单个时步内恢复路径。对单个时步内恢复路径的优化, 主要采用

先优化重要节点(包括待恢复机组和重要负荷)的投运顺序再搜索节点间最短路的思路, 利用智能算法进行求解^[5,16,20]。

与停电系统恢复路径优化问题类似, 电力系统调度、规划等问题同样是组合优化问题, 这些问题的求解中广泛采用了将组合优化问题建模为混合整数线性优化模型, 再通过商业化软件快速求解的思路, 已经取得了很好的效果^[25-26]。在电力系统恢复的研究中, 也已经有学者采用了建立混合整数优化模型的思路, 如文献[8]将机组恢复顺序优化问题建模为混合整数线性优化模型, 大幅提高了寻优效率, 但是尚未考虑恢复路径优化问题。为此, 本文尝试将电力系统恢复路径优化问题建模为混合整数线性优化模型, 但是建模的难点在于恢复路径优化问题中连通性约束难以解析表达。而图论中的网络流理论能够建立确保网络连通的约束条件, 适用于本文恢复路径优化问题中连通性约束的建模。且查阅文献发现, 在恢复路径优化问题中尚未有基于该方法的研究。

基于此, 本文基于网络流理论将恢复路径优化问题中的连通性约束解析表达, 构建了恢复路径优化的混合整数线性模型。本文针对以恢复路径加权和最小为目标的恢复路径优化问题, 将停电网络构建为单源多汇网络, 采用网络流理论建立连通性约束的线性表达式; 进一步, 建立与连通性约束相一致的线性化目标函数, 将恢复路径优化问题建模为混合整数线性模型, 从而采用 CPLEX 软件求解最优

收稿日期: 2016-03-30; 修回日期: 2016-09-07。

上网日期: 2016-11-23。

国家自然科学基金资助项目(51507080); 江苏省博士后基金资助项目(1402042C)。

恢复路径。最后,通过 IEEE 标准系统和实际系统的仿真算例对本文方法的有效性进行了验证。

1 恢复路径优化模型

1.1 目标函数

以恢复路径加权和最小为目标的停电系统恢复路径优化是寻找已投运节点到待恢复节点的最短加权送电路径,其目标函数为:

$$\min F = \sum_{\epsilon_{ij} \in \Gamma} f(\epsilon_{ij}) c(\epsilon_{ij}) \quad (1)$$

式中: ϵ_{ij} 为节点 i 和 j 之间的路径; Γ 为指定节点间的路径集合; $f(\epsilon_{ij})$ 为路径 ϵ_{ij} 的权值; $c(\epsilon_{ij})$ 为路径的投运状态,为决策变量,1 表示投运,0 表示不投运; F 为该恢复路径方案所包含线路的权值之和。

1.2 约束条件

1) 过电压和自励磁约束

恢复路径上空载线路的投入,一方面会产生大量无功,造成母线过电压,另一方面可能导致发电机自励磁。因此,可以采用无功约束将两个约束简化为^[6]:

$$\sum_{j=1}^{n_L} Q_{Lj} < \min\left(\sum_{r=1}^{n_B} Q_r^{\max}, \sum_{r=1}^{n_B} K_{CBr} S_{Br}\right) \quad (2)$$

式中: n_L 为恢复路径的线路总数; n_B 为已并网机组数量; Q_{Lj} 为线路 j 产生的无功功率; Q_r^{\max} 为机组 r 能吸收的最大无功功率; K_{CBr} 为机组 r 的短路比; S_{Br} 为机组 r 的额定容量。

2) 启动功率约束

为了使待启动机组在带电后能够启动,待启动机组所需的启动功率应小于已恢复机组所能提供的功率,即

$$\sum_{i=1}^{n_G} P_{CR,i} < \sum_{j=1}^{n_B} P_{CB,j} \quad (3)$$

式中: n_G 为待启动机组数量; $P_{CR,i}$ 为机组 i 所需的启动功率; $P_{CB,j}$ 为已并网机组 j 能够提供的功率。

3) 机组启动时间约束

被启动的火电机组具有冷热启动时间限制:

$$\begin{cases} 0 < T_{Ai} \leq T_{CH,i} \\ T_{Ai} \geq T_{CC,i} \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_{Ai} 为机组 i 的启动时间; $T_{CH,i}$ 为机组 i 的最大临界热启动时间; $T_{CC,i}$ 为冷启动机组 i 的最小临界冷启动时间。

4) 连通性约束

已投运线路集 $E_1 = \{c(\epsilon_{ij}) = 1 | \epsilon_{ij} \in \Gamma\}$ 除了保证目标函数最小外,还需要保证所有目标节点与黑启动电源点间通过恢复路径进行连接。

由停电系统恢复路径优化模型可见,由于存在

机组冷热启动时间约束,停电系统恢复是一个复杂的多阶段决策优化问题,具有复杂的约束条件,非常难以求解。为了简化计算复杂性,加快寻优速度,现有研究中常采用分时步优化的思路,先确定一个时步内需要恢复的节点,再优化单个时步内恢复路径。对单个时步内恢复路径的优化,同样是组合优化问题,但约束条件得到简化。由于本文作为建立恢复路径混合整数线性优化模型工作的开始,目前仅优化一个时步内待恢复节点的恢复路径。

本文研究借鉴文献[5, 10, 12-13]中思路,在一个时步内,将已通过过电压和自励磁约束、启动功率约束和启动时间约束的节点作为待恢复节点,故本文恢复路径优化模型仅考虑连通性约束。但在上述文献中,由于连通性约束未能解析表达,主要采用智能算法先优化节点投运顺序再搜索节点间恢复路径的方法求解。本文工作在于将连通性约束解析表达,构建恢复路径优化的混合整数模型,从而可以使用户商业化软件 CPLEX 快速求解。

2 基于网络流理论的连通性约束解析表达

恢复路径连通性的解析表达将使恢复路径优化模型成为线性模型。本节采用网络流^[27-29]建立恢复路径优化中连通性约束的解析表达式。

2.1 网络流理论的基本原理

对由若干节点和将其连接的弧构成的网络,当网络中从起点流向终点的流满足每一条弧上流量小于额定容量、中转节点流入量等于流出量两个约束时,该流称为网络(可行)流。在此基础上,搜索最小费用或最大流是网络流的两个经典问题^[27],而网络流保证了搜索过程中网络的连通性。目前网络流方法已经广泛应用于电力系统经济调度、系统规划和可靠性评估等方面^[30]。

文献[31]在配电网拓扑结构约束研究中证明只要满足四个条件,生成的网络为连通网络。由于配电网约束比主网更为严格,将其推广至本文网络连通性约束,可归纳为如下四个条件:①网络中仅存在一个源点;②汇点需有流量到达;③满足基尔霍夫第一定律;④优化目标为最优网络拓扑结构。换言之,通过合理地设定优化问题的决策变量和约束条件,使网络流满足上述四个条件即可确保停电系统恢复路径优化问题中的网络连通性。

本文应用网络流理论建立连通性约束解析表达的基本思路为:从网络中唯一的源点注入 y_0 个单位的流量(决策变量);通过节点流量守恒约束确保流量在直接相连的节点之间流动且满足基尔霍夫第一定律,通过容量约束确保有来流的节点状态为投运,

同时消耗一个单位的流量;每一个汇点均需要有一个单位的流量到达,保证了源点到每一个汇点的连通性。

根据上述原则,在停电恢复路径优化中分别设定源点、汇点、中转点的流量守恒约束和容量约束,则满足约束条件的恢复路径即为连通路径。因此,通过容量约束和流量守恒约束可以解析表达连通性约束。

2.2 停电系统的单源多汇网络构建

基于网络流构建连通性约束需要使用有向图,而停电系统恢复路径优化中采用的网络拓扑为无向图,故本节将停电恢复系统描述为单源多汇的有向网络。本文以图 1 中所示网络为例说明单源多汇网络。

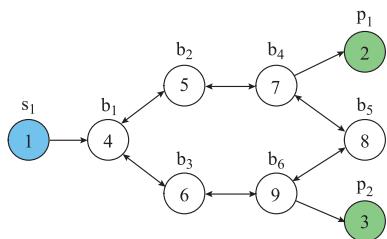


图 1 单源多汇网络

Fig.1 Single-source multi-sinks network

为了下文描述方便,首先参考图论中的定义对下文中使用的名词进行定义^[32],具体如下。

1)入度:设 v 为有向图中的一个节点, v 的入度是指指向 v 的边的数目,入度为 0 的节点为源节点。

2)出度: v 的出度是指从 v 出发的边的数目,出度为 0 的节点为汇节点。

3)反向边:简单有向图中两点 u 和 v 间可以有方向相反的两条边,这样的两条边称为一对反向边。

图 1 中网络为 IEEE 标准 3 机 9 节点系统网络,其中节点 1,2,3 为发电机组节点;节点 4 至 9 为母线节点。节点 1 是黑启动机组,为源节点;节点 2 和 3 是待恢复节点,为汇节点。

图 1 中网络可以用单源多汇网络 $N = (V, S, P, E)$ 描述,其中: V 为所有节点集合; S 为网络的源节点集,节点的入度为 0; P 为网络的汇节点集,节点的出度为 0; E 为单源多汇网络的有向边,与源节点和汇节点相连的弧分别呈发散和汇聚单边指向,而拓扑相连的中转点之间存在一对反向边。网络中其他节点为中转节点。

对于停电系统,将其已带电节点进行合并,生成停电系统的源节点;未带电节点中的指定目标节点(待恢复节点)和非指定节点,分别设定为汇节点和中转节点,生成停电系统的单源多汇网络;后续待恢

复节点可以是汇节点或中转节点。

2.3 基于网络流的连通性约束解析表达

当恢复路径对应网络中流满足容量约束和流量守恒约束时,该恢复路径为连通路径,故连通性约束转化为网络中流的容量约束和流量守恒约束。

1)容量约束

由于停电电网对应网络中每条弧上的流量仅用于辅助分析,不具备实际物理意义,本文通过设定可行流途径节点流量消耗的方式得到每条弧上的流量。对于每一个节点 $i \in V$,引入二进制 0-1 决策变量 x_i ,表示该节点投运状态,1 为节点投运,0 为未投运;同时, x_i 也代表节点的流量消耗,投运节点消耗一个单位的流量,反之则不消耗流量。源节点和汇节点的状态作为已知条件设为投运,将中转节点的状态作为决策变量。从而,有向边 $(i, j) \in E$ 的流量 y_{ij} (表示从节点 i 流向节点 j 的流量)可由网络中节点状态获得。

网络上每条弧的流量是由投运节点决定,故每条弧上所能流过的最大容量不能超过节点数量。因此,每条弧的容量约束为:

$$0 \leq y_{ij} \leq nx_j \quad (5)$$

式中: n 为总节点数。

需要说明的是,因为节点 x_j 是二进制 0-1 决策变量,式(5)保证了节点 x_j 的来流 $y_{ij} > 0$ 时,节点状态为投运。

2)流量守恒约束

网络中的节点包括源节点、汇节点和中转节点。网络流必须经过源节点和汇节点,故将其状态设为投运,节点消耗一个单位流量。因此,源节点和汇节点的状态约束为:

$$x_i = 1 \quad \forall i \in S \text{ 或 } \forall i \in P \quad (6)$$

中转节点状态为决策变量,且其取值为布尔数,因此,中转节点状态约束为:

$$x_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \bar{S} \cap \bar{P} \quad (7)$$

式中: $\bar{S} = V - S$; $\bar{P} = V - P$ 。

源节点注入流量等于相连支路上流量与节点消耗流量之和,设源节点注入流量为 y_0 ,则源节点流量守恒约束为:

$$y_0 = \sum_j y_{ij} + x_i \quad i \in S \quad (8)$$

由于网络中流量与投运节点有关,故节点注入总流量不能超过节点总数。因此,源节点注入流量约束为:

$$0 \leq y_0 \leq n \quad (9)$$

中转节点具有多个流入弧和流出弧,其总流入流量等于流出流量与节点消耗流量之和。因此,中

转节点流量守恒约束为:

$$\sum_j y_{ji} = \sum_j y_{ij} + x_i \quad \forall i \in \bar{S} \cap \bar{P} \quad (10)$$

若 i 为投运节点, $x_i=1$, 式(10)表示节点 i 的流入流量等于流出和消耗单位流量之和; 若 i 为非投运节点, $x_i=0$, 节点无流量消耗, 只有当节点的流入和流出也均为 0 时才能满足式(10)的约束。非投运节点的流量守恒体现为: 无来流、不消耗流量、无流量流出。

由于汇节点没有流出流量, 节点流入流量等于节点消耗流量。因此, 汇节点流量守恒约束为:

$$\sum_j y_{ji} = x_i \quad \forall i \in P \quad (11)$$

3 恢复路径优化的混合整数线性模型

为了解析表达连通性约束, 停电系统的网络拓扑被描述为单源多汇网络, 而原有目标函数是基于无向图的, 与目标函数的表达不一致。因此, 本节将优化目标表达为基于单源多汇网络模型的目标函数, 并做线性化处理, 建立停电系统恢复路径优化的混合整数线性规划模型。

1) 线路投运状态确定

式(1)中停电系统恢复路径优化的目标函数为线路状态加权求和最小, 但线路状态未考虑线路方向。在单源多汇网络中, 线路均为有向边, 两点之间存在两条弧。每条弧上流量 y_{ij} , $(i, j) \in E$ 可以描述线路的投运情况, 如果节点 i 到节点 j 之间有流量流过, 则表示线路 (i, j) 投运; 反之, 则不投运。因此, 线路状态可以表示为:

$$\eta_{ij} = \begin{cases} 0 & y_{ij} = 0 \\ 1 & y_{ij} > 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: η_{ij} 为有向边 $(i, j) \in E$ 投运状态, 为布尔变量, 1 表示节点 i 到节点 j 之间线路投运, 0 表示未投运。

上式中包含逻辑判断的非线性表达方式, 求解不方便, 故将其转化为如下线性约束:

$$\frac{y_{ij}}{n} \leq \eta_{ij} < 1 + \frac{y_{ij}}{n} \quad \forall (i, j) \in E \quad (13)$$

2) 恢复路径优化模型

通过上述处理, 停电系统恢复路径优化建模为混合整数线性规划, 输入电网拓扑和线路权值, 根据式(6)设定黑启动机组节点和目标节点, 停电系统最短恢复路径的线性优化模型如下:

$$\begin{cases} \min F = \sum_{(i, j) \in E} f(\epsilon_{ij}) \eta_{ij} \\ \text{s.t.} \quad \text{式(5)至式(13)} \end{cases} \quad (14)$$

3) 模型求解

上述模型中包含大量 0-1 整数变量和连续型变量, 属于典型的混合整数优化问题。本文将采用广泛应用于电力系统运行优化的商业软件 CPLEX 进行求解, 以提高寻优效率。

4 算例分析

采用 IEEE 标准 3 机 9 节点系统对本文路径优化模型的有效性进行机理解释; 采用 IEEE 14, 30, 57, 118 节点系统对本文模型和现有模型进行仿真分析; 最后通过实际电网拓扑验证本文模型的有效性。

上述仿真均针对机组启动的路径优化问题, 最小编号机组为黑启动机组, 设定为源节点; 待恢复机组设定为汇节点, 其他节点为中转节点。线路充电功率作为恢复线路的权值^[33], 用于衡量线路恢复的难易程度, 本文采用的线路权值见附录 A。

通过 MATLAB 软件编制仿真程序, 本文仿真使用计算机配置为 Intel Core i5 3.10 GHz 处理器和 8 GB 内存。

4.1 本文路径优化模型有效性的机理解释

以图 2 所示 IEEE 标准 3 机 9 节点系统为例, 节点 1 上机组是黑启动机组, 该节点为源节点; 节点 2 和 3 是待恢复的目标节点, 为汇节点; 其他节点为中转节点。

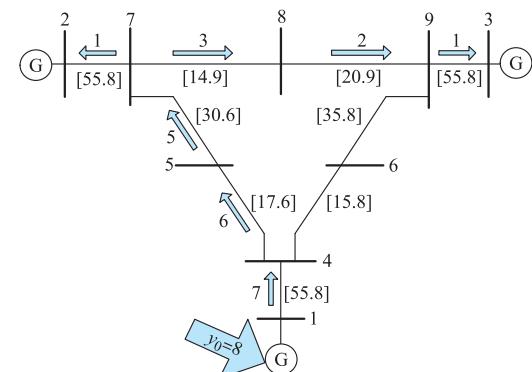


图 2 IEEE 标准 3 机 9 节点系统的网络流分布示意图

Fig.2 Schematic diagram of network flow distribution in IEEE 3-unit 9-bus system

采用本文混合整数线性优化模型求解得到的网络流分布如图 2 中箭头所示, 箭头旁边的数值为网络流每个弧上的流量, 中括号中的数值为线路权值。从图中可以看出: ① 流量从节点 1 注入后沿网络输送到汇节点 2 和 3, 网络连通性约束使得目标节点均有来流到达, 确保了源节点与目标节点之间的连通性; ② 基于本文模型搜索到的恢复路径为最短恢复路径, 目标函数值为 251.4。

4.2 与现有路径优化算法的比较分析

本文分别以 IEEE 标准 5 机 14 节点系统、6 机 30 节点系统、7 机 57 节点系统、54 机 118 节点系统作为算例,将本文基于混合整数线性规划模型的优化方法与当前基于非解析方式处理网络连通性的算法进行对比,包括贪婪算法(Greedy)^[17]、基于非连通个体淘汰策略(ES)的遗传算法^[5]和基于最短路径法调用的交叉粒子群智能排序算法(ISM)^[13]。对 IEEE 标准系统,均采用最小编号机组作为黑启动电源,其他机组作为待恢复节点。智能算法的仿真参数设置与参考文献一致。

寻优效率是路径优化方法实际应用的关键评价指标。对每种方法均重复计算 50 次,每种方法的平均目标函数值和平均运行时间分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 不同方法的目标函数值

Table 1 Objective function value of different methods

系统规模	恢复路径权值			
	Greedy	ES	ISM	本文方法
5 机 14 节点	44.74	45.64	44.16	44.16
6 机 30 节点	44.42	45.41	43.98	43.98
7 机 57 节点	40.94	155.13	40.94	40.94
54 机 118 节点	941.06	1 165.23	947.31	940.83

表 2 不同方法的计算时间

Table 2 Computation time of different methods

系统规模	计算时间/s			
	Greedy	ES	ISM	本文方法
5 机 14 节点	0.13	13.37	30.27	0.52
6 机 30 节点	0.25	34.11	95.77	0.70
7 机 57 节点	0.54	145.59	137.02	1.17
54 机 118 节点	194.21	691.38	7 877.75	5.87

从表 1 中可以看出,本文方法对于不同规模的系统均找到了目标函数值最小的恢复路径。在系统规模较小时(前三个算例),ISM 的路径优化结果与本文方法一致,其他方法均未找到最优恢复路径;在 IEEE 标准 54 机 118 节点系统中,基于非解析方式处理网络连通性的算法均未找到更好的结果。

由于恢复路径优化的计算规模跟系统规模和设定的目标节点数直接相关,IEEE 标准 6 机 30 节点系统和 IEEE 标准 7 机 57 节点系统的目标节点数量接近,仅系统规模小幅增加;而 IEEE 标准 54 机 118 节点系统的系统规模最大,且目标节点相对 IEEE 标准 7 机 57 节点系统的目标节点大幅增加。因此,IEEE 标准 7 机 57 节点系统相对于 IEEE 标准 6 机 30 节点系统的恢复路径权值和计算时间未大幅增加,IEEE 标准 54 机 118 节点系统相对于 IEEE 标准 7 机 57 节点系统的恢复路径权值和计算

时间均大幅增加。

从表 2 中可以看到,本文方法计算时间相对于 ES 和 ISM 方法有大幅减少;当系统规模较小时,计算时间比 Greedy 方法长,但当系统规模较大时,本文方法计算时间未随系统规模大幅增加,相对于 Greedy 方法有明显减少。

综合来看,ISM 方法虽然在小规模系统优化结果与本文方法类似,但计算时间却大幅增加;Greedy 方法在系统规模较小时,计算时间比本文方法少,但在系统规模较大时的计算时间和优化结果均不如本文方法。因此,本文方法相对于现有方法在寻优效率上更优。

4.3 实例分析

1) 江苏电网三分区系统算例

为进一步验证本文路径优化模型在实际系统中的有效性,本文以江苏电网为例进行仿真分析。宜兴抽蓄设为黑启动电源,黑启动电源所在三个分区作为仿真系统,系统规模为 78 个节点,95 条线路,以厂站为单位的三个分区系统拓扑图见图 3,其中,各厂站内部母线联络未作标注,图示系统规模小于实际仿真系统规模。

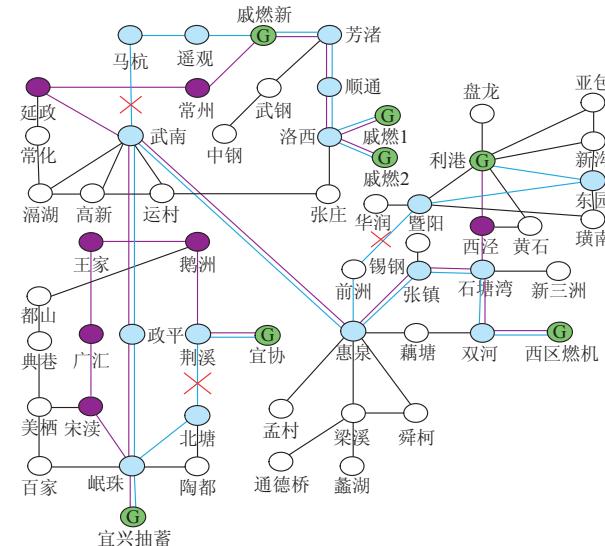


图 3 江苏电网三个分区系统恢复示意图

Fig.3 Power system restoration diagram for three sub-systems of Jiangsu power system

仿真算例中黑启动电源升压变压器高压端母线作为源节点,分区内的其他 6 座电站作为待恢复节点。采用本文方法搜索到的恢复路径共投运 24 座厂站,详见图 3 中蓝色线路和节点。本文方法计算的路径总权值为 1 191.626,计算时间为 1.47 s,具有较好的时效性。

2) 考虑线路故障的恢复路径优化算例

当停电事故发生后,因线路故障使得已规划的路径恢复方案无法实施时,本文方法可以通过设定故障线路权值的方法,将故障线路设为一个较大数据值,重新规划恢复路径。如图3算例中红叉所标注的北塘—荆溪、武南—马杭、暨阳—前洲三条线路无法投运,通过设定故障线路权值,获得故障情况下的恢复路径由紫色线表示,路径总权值为1 198.024,计算时间为1.49 s。

可见,当停电事故发生后的故障线路信息能够准确获取时,本文方法可以通过设定故障线路权值的方法,快速重新规划恢复路径。而对于故障线路信息难以准确获取的情况,则需要预先设定故障集,以应对不确定因素对恢复路径方案实施的影响。

5 结语

停电系统恢复路径优化是一个典型的组合优化问题,本文仅针对单个时步,借鉴电力系统中类似组合优化问题的建模思路,基于网络流理论解析表达网络连通性约束,进而建立停电系统恢复路径的混合整数线性优化模型,使其可以采用快速的混合整数模型求解方法。多组 IEEE 标准系统和实际系统的仿真结果表明,本文方法具有较高的求解效率。

后续研究将会致力于建立考虑多时步的混合整数优化模型,使其能够考虑本文研究中所忽略的约束,进一步提高本文优化模型的精度。

本文在完成过程中受到国网江苏省电力公司科技项目(J201532)资助,在此表示感谢。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

- [1] 薛禹胜,王昊昊,董朝阳,等.电力市场环境下互联电网恢复控制的评述[J].电力系统自动化,2007,31(21):110-115.
XUE Yusheng, WANG Haohao, DONG Zhaoyang, et al. A review on restorative control in interconnected grids under electricity market environment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 110-115.
- [2] XUE Y S, XIAO S J. Generalized congestion of power systems: insights from the massive blackouts in India [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(2): 91-100.
- [3] KAFKA R J, PENDERS D R, BOUCHEY S H, et al. System restoration plan development for a metropolitan electric system [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(8): 3703-3713.
- [4] LIU Y T, FAN R, TERZIJA V. Power system restoration: a literature review from 2006 to 2016 [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(3): 332-341.
- [5] 刘强,石立宝,倪以信,等.电力系统恢复控制的网络重构智能优化策略[J].中国电机工程学报,2009,29(13):8-15.
LIU Qiang, SHI Libao, NI Yixin, et al. Intelligent optimization strategy of the power grid reconfiguration during power system restoration[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 8-15.
- [6] LIU C C, LIOU K L, CHU R F, et al. Generation capability dispatch for bulk power system restoration: a knowledge-based approach [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 316-325.
- [7] 刘强,石立宝,周明,等.电力系统恢复控制的机组优化启动策略[J].电力自动化设备,2009,29(4):1-5.
LIU Qiang, SHI Libao, ZHOU Ming, et al. Optimal start-up strategy of units during power system restoration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(4): 1-5.
- [8] SUN W, LIU C C, ZHANG L. Optimal generator start-up strategy for bulk power system restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(3): 1357-1366.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] LIU Y, GU X P. Skeleton-network reconfiguration based on topological characteristics of scale-free networks and discrete particle swarm optimization [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(3): 1267-1274.
- [12] 王亮,刘艳,顾雪平,等.综合考虑节点重要度和线路介数的网络重构[J].电力系统自动化,2010,34(12):29-33.
WANG Liang, LIU Yan, GU Xueping, et al. Skeleton-network reconfiguration based on node importance and line betweenness [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 29-33.
- [13] 韩忠晖,顾雪平,刘艳.考虑机组启动时限的大停电后初期恢复路径优化[J].中国电机工程学报,2009,29(4):21-26.
HAN Zhonghui, GU Xueping, LIU Yan. Optimization of restoration paths considering unit start-up time requirements at early stage of power system restoration[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 21-26.
- [14] 刘艳,高倩,顾雪平,基于目标规划的网架重构路径优化方法[J].电力系统自动化,2010,34(11):33-37.
LIU Yan, GAO Qian, GU Xueping. Optimization of restoration sequence of network based on goal programming [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11): 33-37.

- [15] 林振智,文福拴.基于加权复杂网络模型的恢复路径优化方法[J].电力系统自动化,2009,33(6):11-15.
LIN Zhenzhi, WEN Fushuan. A new optimization method for determining restoration paths based on weighted complex network model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 11-15.
- [16] 朱海南,刘玉田,邱夕兆.考虑机组恢复成功率的黑启动阶段待恢复机组优选[J].电力系统自动化,2013,37(22):28-34.
ZHU Hainan, LIU Yutian, QIU Xizhao. Optimal restoration unit selection considering success rate during blackstart stage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 28-34.
- [17] 周云海,闵勇.恢复控制中的系统重构优化算法研究[J].中国电机工程学报,2003,23(4):67-70.
ZHOU Yunhai, MIN Yong. Optimal algorithm for system reconstruction[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 67-70.
- [18] HOU Y, LIU C C, SUN K, et al. Computation of milestones for decision support during system restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(3): 1399-1409.
- [19] SHI L B, DING H L, XU Z. Determination of weight coefficient for power system restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(2): 1140-1141.
- [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.DOI:10.7500/AEPS20140811009.
LI Shaoyan, GU Xueping, LIANG Haiping. Energizing path optimization of extended black-start schemes with given recovery targets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 59-64. DOI: 10.7500/AEPS20140811009.
- [21] 王洪涛,刘玉田.基于NSGA-II的多目标输电网架最优重构[J].电力系统自动化,2009,33(23):14-18.
WANG Hongtao, LIU Yutian. Multi-objective optimization of power system reconstruction based on NSGA-II [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 14-18.
- [22] 顾雪平,韩忠晖,梁海平.电力系统大停电后系统分区恢复的优化算法[J].中国电机工程学报,2009,29(10):41-46.
GU Xueping, HAN Zhonghui, LIANG Haiping. Optimization of parallel restoration through power system partitioning after blackout[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 41-46.
- [23] 朱冬雪,顾雪平,钟慧荣.电力系统大停电后机组恢复的多目标优化方法[J].电网技术,2013,37(3):814-820.
ZHU Dongxue, GU Xueping, ZHONG Huirong. A multi-objective optimization method for post-blackout unit restoration [J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 814-820.
- [24] 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 Trans on Power Systems, 2013, 28(3): 2202-2210.
- [25] FARHAT I A, EL-HAWARY M E. Optimization methods applied for solving the short-term hydrothermal coordination problem[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(9): 1308-1320.
- [26] 夏清,钟海旺,康重庆.安全约束机组组合理论与应用的发展和展望[J].中国电机工程学报,2013,33(16):94-103.
XIA Qing, ZHONG Haiwang, KANG Chongqing. Review and prospects of the security constrained unit commitment theory and applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 94-103.
- [27] 王建学,王锡凡,王秀丽.采用网络流理论的分区备用模型[J].中国电机工程学报,2008,28(10):51-55.
WANG Jianxue, WANG Xifan, WANG Xiuli. Regional reserve model based on network flow theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 51-55.
- [28] 陈启鑫,康重庆,程旭东,等.考虑阻塞管理的发电权交易模型及其网络流算法[J].中国电机工程学报,2008,28(34):106-111.
CHEN Qixin, KANG Chongqing, CHENG Xudong, et al. Generation rights trade model and its network flow algorithm considering congestion management [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 106-111.
- [29] 张显,周鑫,耿建,等.基于网络流的发输电计划协调优化方法[J].电力系统自动化,2013,37(19):55-60.
ZHANG Xian, ZHOU Xin, GENG Jian, et al. A coordination and optimization method for generation and transmission scheduling of power system based on network flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 55-60.
- [30] 王锡凡.电网可靠性评估的随机网流模型[J].电力系统自动化,2006,30(12):1-6.
WANG Xifan. Probabilistic network-flow models for reliability evaluation of power networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12): 1-6.
- [31] LAVORATO M, FRANCO J F, RIDER M J, et al. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(1): 172-180.
- [32] 高随祥.图论与网络流理论[M].北京:高等教育出版社,2009.
- [33] 刘崇茹,邓应松,卢恩,等.大停电后发电机启动顺序优化方法[J].电力系统自动化,2013,37(18):55-59.
LIU Chongru, DENG Yingsong, LU En, et al. Optimization of generator start-up sequence in power system restoration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 55-59.

宋坤隆(1986—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统恢复控制。E-mail: skl0071@163.com

谢云云(1985—),男,通信作者,博士,讲师,主要研究方向:电力系统安全稳定控制。E-mail: yunyun-xie@163.com

殷明慧(1978—),男,博士,副教授,主要研究方向:风力发电技术、电力系统暂态稳定性。E-mail: ymhui@21cn.com

(编辑 万志超)

Mixed Integer Linear Optimization Model for Path Restoration of Blackout System Based on Network Flow Theory

SONG Kunlong¹, XIE Yunyun¹, YIN Minghui¹, ZOU Yun¹, ZHOU Qian², WANG Chenggen²

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 211103, China)

Abstract: Optimization of power system path restoration is a combinatorial optimization problem, the time needed for computation is increasing exponentially with system scale. Therefore, speeding up the computation is one of the research hotspots in this field. Considering the connectivity constraint in existing research has not been analyzed as yet, the optimization of power system path restoration cannot be formulated as a mixed-integer programming model. Therefore, the blackout system is translated into a single-source multiple-sinks network. Then the bus operation state and amount of network flow in the transmission path are set as decision variables, while flow conservation and capacity constraints for each bus constitute the analytic expressions of connectivity constraint. According to the fundamental principle that the path between nodes of flow injection and arrival is connective. On this basis, a mixed integer linear programming model for optimization of path restoration is built through the analytic expressions of connectivity constraint and by translating the objective function into linear terms. The optimal path restoration is solved by CPLEX. Finally, the proposed linear model is validated by the IEEE test systems and Jiangsu power grid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507080) and Jiangsu Planned Projects for Postdoctoral Research Funds (No. 1402042C).

Key words: power system restoration; path optimization; connectivity constraint; network flow