

考虑线路分组投运的恢复路径方案制定

周光奇, 李少岩, 顾雪平, 梁海平

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要:大停电事故后送电路径的恢复是电力系统恢复过程中的一项重要任务,合理的送电路径及其充电方式将有助于系统安全、快速恢复。结合理论分析与仿真给出了典型参数下线路的极限充电距离;针对给定的送电路径提出了线路分组投运方式以缩短系统恢复时间,建立了以分组数量最少为目标的整数线性规划模型,同时针对某一恢复路径存在多个分组投运方案的情况,定义了恢复可靠性指标对分组方案进行优选。为了给运行人员提供多个备选路径方案,建立了基于网络流理论的前 K 条送电路径优化的整数线性规划模型。采用高效的商业优化软件联合求解前 K 条路径优化模型与线路分组投运模型,获得前 K 个最优路径方案及其分组投运方案。算例结果验证了合理的线路分组充电方案能够在保证恢复安全性的前提下加快系统的恢复进程。

关键词:系统恢复;线路投运;极限充电距离;线路分组充电;整数线性规划

中图分类号:TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201909039

0 引言

近年来大停电事故时有发生,如2016年的南澳9·28大停电、2018年的巴西3·21大停电。这一系列大停电事故警示着电网运行人员,大面积停电事故发生的概率虽然极低,但是一旦发生将会带来严重的负面影响。因此,开展大停电事故后电力系统恢复控制问题的研究十分重要^[1-3],其中送电路径的恢复是系统重构过程中的一项重要任务。

目前,关于恢复路径优化问题的研究已有很多,主要集中在模型的建立^[4-6]和模型的求解^[7-9]这2个方面。根据不同时段的特点,文献[4]将系统的重构阶段分为“串行”和“并行”2个送电阶段,其中在“串行”送电阶段,系统的可用功率有限且电压和频率调节能力不足,只能一个一个厂站接力式恢复,此时送电路径优化问题就转化为如何确定某2个厂站之间的最“短”路径。在已有的研究中,“串行”恢复阶段的最优送电路径通常采用图论中的经典最短路径算法(如Floyd算法、Dijkstra算法以及Bellman-Ford算法等)进行求取。在采用此类算法前需要将电网抽象成简单的无向加权图,支路的权重常取线路充电无功、操作时间^[10]或者边的介数^[5]等单一指标或者综合指标^[11]。考虑到实际恢复过程中系统的状态复杂多变,单一送电路径往往不能满足操作需求,有必要对前 K 条最短路径开展研究以保证恢复的可靠性^[12]。

在确定送电路径后,下一步的工作是投入构成此路径的线路以及变压器实现功率的输送。文献[4,13]指出送电路径上的线路往往并非一次性投入的,需要在满足各项规程的要求下分批投入,尤其要注意线路操作时的过电压问题。当前关于线路投运方式的研究尚少,在仿真研究或者黑启动试验中常采用逐条线路充电以及送电路径全线充电这2种方式。然而不同的投运方式下所需要的操作时间是不同的,而操作时间的长短又直接关系到某些具有临界时间限制机组的启动情况,进而影响整个恢复进程。因此,有必要研究合理的线路投运方式,保证送电路径的安全、快速恢复。

鉴于系统恢复任务的紧迫性,操作人员往往希望单次对尽可能多的线路进行充电,若仅对较少线路充电将延缓系统的恢复进程。然而,过分追求恢复速度可能产生电气设备无法承受的过电压,破坏设备绝缘^[14]。针对此问题,本文提出了一种线路分组投运的合理思路。首先确定线路极限充电距离以保证恢复的安全性;基于此,建立给定送电路径下以分组数量最少为目标的线路分组投运整数线性规划ILP(Integer Linear Programming)迭代模型,求解所有满足恢复安全性要求的最优分组投运方案。对于可能出现多种最优方案的情况,定义恢复可靠性指标进行二次优选,确定给定送电路径最终的投运方案。最后,采用高效的商业优化软件联合求解基于网络流理论的前 K 条送电路径优化模型和线路分组投运优化模型,快速确定恢复路径方案。算例结果表明了本文所提模型和方法的有效性,可为调度人员快速提供丰富的备选方案。本文旨在研究线路分组投运的可行性与有效性,并结合基于网络流理论的路径优化方法构造通用的恢复路径搜索模块。实

收稿日期:2019-02-22;修回日期:2019-08-08

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2018MS085)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2018MS085)

际上送电路径的恢复往往融合在网架重构优化决策中,但鉴于某些已有重构优化决策方法^[10,15-16]的通用性,将本文模块合理嵌入其中即可实现网架重构的优化决策。

1 给定送电路径下线路分组投运方案的确定

当系统恢复时,线路的投入即充电操作是十分耗时的,恢复路径的合闸充电次数决定了其恢复耗时的长短,因此应尽量减少充电次数。当前的电网规划趋于合理,单一高压或超高压交流线路的长度一般远小于空充线路过电压要求的上限值。因此可以通过线路组合充电有效压缩系统的恢复耗时,从而加快系统的恢复进程。

1.1 线路极限充电距离的确定

空充线路时产生的过电压包括工频过电压、操作过电压。工频过电压是由空载或者轻载线路的费兰梯效应引起的,线路上的电压高于电源电压且末端电压最高;操作过电压是开关操作后系统从一种稳态到另一种稳态的过渡过程中出现的暂态性质的过电压,是由工频稳态分量和无限个快速衰减的暂态分量叠加而成的。空载线路合闸示意图如图 1 所示。

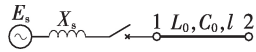


图1 空载线路合闸示意图

Fig.1 Schematic diagram of switching-on operation for no-load transmission line

在不计及线路电导与损耗时,空载线路合闸后线路末端的稳态电压可简化表示为^[17]:

$$U_2 = \frac{1}{1 - \omega^2 L_0 C_0 l^2 - \omega X_s C_0 l} E_s \quad (1)$$

其中, ω 为角频率,是一个固定值。可见线路末端的稳态电压 U_2 与单位长度线路电感 L_0 、单位长度线路电容 C_0 、线路长度 l 、等值电源电势 E_s 以及电源电抗 X_s 有关。操作过电压为暂态性质的过电压,包含稳态工频分量和无限个暂态谐波分量,其影响因素较多,难以精确解析表示。

由式(1)可知,当空充某一输电线路时,工频过电压随着线路长度 l 的增加而提高,操作过电压亦趋于严重,因此有必要研究线路的极限充电距离。考虑到过电压难以精确解析表示,采用 PSCAD 软件对不同电压等级、不同长度输电线路的空载充电过电压进行仿真,由于实际的合闸操作过程具有随机性,表现为合闸初相角的不可控性^[18],故本文统计不同合闸初相角下的过电压情况并记录相应工频过电压、操作过电压的最恶劣数值,以此为依据确定不同电压等级的极限充电距离。仿真模型中线路选用基于

分布式 LC 参数和集总电阻的贝瑞隆模型,将已恢复的系统等效成端电压为 1 p.u. 的理想电压源,开关为理想时间控制开关。以确定 220 kV 和 500 kV 电压等级线路的极限充电距离为例,假设电网中同一电压等级线路的参数相同,基本参数见附录中表 A1。

在没有补偿装置的情况下,220 kV 和 500 kV 电压等级线路的空载充电过电压随长度的变化情况如附录中表 A2 所示。由表可以看出,线路越长,过电压相对越恶劣。国家技术规范《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》规定 500 kV 系统的操作过电压不超过 2.0 p.u.,220 kV 系统的操作过电压不超过 3.0 p.u.;对工频过电压的要求是一般不超过 1.3 p.u.。根据仿真结果可知,若不考虑无功补偿装置,则给定线路参数下 500 kV 电压等级线路的极限充电距离约为 120 km,220 kV 电压等级线路的极限充电距离约为 600 km。考虑到电源电抗、合闸相位、线路实际参数等因素的影响,恢复过程中操作人员应留有一定的裕度以应对复杂的操作环境。为了抑制过电压,某些超高压、特高压输电线路需安装一定容量的并联电抗器。因此,尽管某些输电线路的长度可能超过无补偿装置时的极限充电距离,但其仍能安全恢复。并联电抗器的安装位置及容量均会影响极限充电距离的大小^[17],很难准确给出两者的解析表达式,但对于实际上配置了无功补偿装置的输电线路而言,一般其电压等级高且线路距离长,若选择恢复此类线路,本文只考虑其单独投运以保证恢复的安全性。

1.2 线路分组投运模型的建立

不同于逐条线路充电及全线充电,线路组合充电需要提前获知线路的具体分组情况,为此本节建立了线路的分组投运模型。送电路径示意图如图 2 所示,已恢复系统 S 到待恢复目标 G 的某送电路径由 5 条支路组成,若不考虑限制条件将有很多种分组方案,如将支路 l_1-l_5 分成 5 组,将支路 l_1-l_5 视为 1 组,将 5 条支路分成 l_1 和 l_2 以及 l_3-l_5 这 2 组等,但在实际恢复过程中应采取满足安全约束的最优方案。

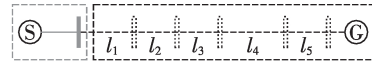


图2 送电路径示意图

Fig.2 Schematic diagram of restoration path

送电路径一般由线路以及变压器支路构成,不失一般性,本文采用以下标么值的形式表示每条支路的长度:

$$w_{l_i} = u_{l_i} L_{l_i} / (R L_{\max}) + (1 - u_{l_i}) \quad (2)$$

其中, L_{l_i} 为线路 l_i 的实际距离; $L_{\max}$ 为线路 l_i 所在电压等级下的极限充电距离; R 为可靠性系数,取小于 1 的正数; u_{l_i} 为表征连接支路是否为线路的二元参数,

当 $u_{l_i}=1$ 时表示连接支路为线路, 当 $u_{l_i}=0$ 时表示连接支路为变压器支路。当 $u_{l_i}=0$ 时, $w_{l_i}=1$, 即变压器支路的长度标幺值取为 1, 其涵义是变压器支路只能单独充电以保证恢复的可靠性。

定义二元变量 $x_{l_i, l_j} (j \geq i)$ 表征支路 l_i 与支路 l_j 是否在同一分组, 当 $x_{l_i, l_j}=1$ 时, 表示两支路在同一分组内, 当 $x_{l_i, l_j}=0$ 时表示两支路在不同的分组内。可见决策变量 x_{l_i, l_j} 构成对角线元素均为 1 的上三角 0-1 矩阵, 即:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{l_1, l_2} & x_{l_1, l_3} & \cdots & x_{l_1, l_n} \\ 0 & 1 & x_{l_2, l_3} & \cdots & x_{l_2, l_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ 0 & 0 & & 1 & x_{l_{n-1}, l_n} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

其中, n 为送电路径的支路数量。

(1) 目标函数。

为了实现送电路径安全、快速恢复, 应使送电路径的线路分组数量尽可能少且每一分组均满足安全约束。通过分析可知, 线路分组的数量可由相邻支路不在同一分组的数量加 1 表示, 则目标函数可表示为:

$$\min \sum_{i=2}^n (1 - x_{l_{i-1}, l_i}) + 1 \quad (3)$$

(2) 约束条件。

a. 每一分组的线路总长度应该在极限充电距离内, 如式(4)所示。若出现线路长度标幺值大于 1 的线路, 即线路的 $w_{l_i} > 1$, 则此类线路往往是配置无功补偿装置的长距离线路, 为了保证模型有解, 应强制将其线路长度标幺值转化为 1。

$$\sum_{j=i}^n w_{l_j} x_{l_i, l_j} \leq 1 \quad (4)$$

b. 分组信息传递关系约束。利用递推思想由线路 l_i, l_{j-1} 的分组信息以及相邻支路 l_{j-1}, l_j 的分组信息推导线路 l_i, l_j 的分组情况, 即:

$$x_{l_i, l_j} = x_{l_i, l_{j-1}} x_{l_{j-1}, l_j} \quad j \geq i + 2 \quad (5)$$

上述等式(5)可进一步由下列不等式(6)等效替代以构造 ILP 问题。

$$\begin{cases} x_{l_i, l_j} \leq x_{l_i, l_{j-1}} \\ x_{l_i, l_j} \leq x_{l_{j-1}, l_j} \\ x_{l_i, l_j} \geq x_{l_i, l_{j-1}} + x_{l_{j-1}, l_j} - 1 \end{cases} \quad (6)$$

c. 对于同一送电路径而言, 其可能存在多组最优解, 即多种线路分组投运方案的分组总数均为最小值。为了获取多种分组方案, 需增加式(7)所示线性“割”约束。

$$\sum_{x_{l_i, l_j}=1} (1 - x_{l_i, l_j}) + \sum_{x_{l_i, l_j}=0} x_{l_i, l_j} \geq 1 \quad \gamma \in \Gamma; j = i + 1 \quad (7)$$

其中, Γ 为已确定的线路分组投运方案集合, 随着优化的进行该集合中的元素数量逐渐增加; γ 表示某一具体的线路分组投运方案; x_{l_i, l_j}^γ 为方案 γ 中变量 x_{l_i, l_j} 的具体取值情况。考虑到分组投运方案可以视为一组维度相同的 0-1 向量, 故添加式(7)所示的整数线性“割”约束以实现优化域的删减^[19]。

1.3 线路分组投运方案的优选

具有相同的最少分组数的多个方案需进一步评估, 从而确定最终的线路分组投运方案。考虑到不同的方案中各分组线路的长度不等且线路长度会影响恢复成功率, 故以送电路径相对恢复成功率作为评价方案的指标。由于变压器支路或者配置无功补偿装置的长距离线路的长度标幺值取为 1, 对于同一送电路径的不同线路分组投运方案而言, 这 2 类支路均只能单独投运, 那么评价方案时可以忽略恢复路径中的变压器支路或者配置无功补偿装置的线路。

本文以偏大型正态分布作为线路长度对相对恢复失败风险的隶属度函数。偏大型正态分布主要表征一个先缓慢增加, 中间快速增长, 随后平缓增大趋于最大值的过程。即当线路很短或很长时, 线路长度的变化对恢复失败风险的影响较小, 这是符合基本情况的。隶属度函数如式(8)所示。

$$A(l) = \begin{cases} 0 & l \leq 0 \\ e^{-[(l-1)/\sigma]^2} & 0 < l < 1 \\ 1 & l \geq 1 \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知, 隶属度函数曲线的形状仅与偏大型正态分布的标准差 σ 值相关, 调度操作人员可以视情况选择合适的 σ 值。附录中图 A1 给出了不同 σ 值下的隶属度函数曲线, 本文中取 $\sigma=0.3$ 。

在相对恢复失败风险概念的基础上定义恢复可靠性指标 Λ 表征送电路径相对恢复成功率, 如式(9)所示。

$$\Lambda = \alpha / \delta \quad (9)$$

$$\alpha = \prod_{i=1}^p (1 - A(l_{pi}))$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (1 - A(l_{pi}) - E_{avg})^2}$$

$$E_{avg} = \sum_{i=1}^p (1 - A(l_{pi})) / p$$

其中, p 为除去 2 类可忽略支路后的送电路径分组总数; l_{pi} 为分组 i 的标幺值长度; α 为所有分组相对恢复成功率的乘积; E_{avg} 为所有分组相对恢复成功率的算术平均值; δ 为 p 个分组相对恢复成功率的标准差。各分组的相对恢复成功率越大, 则 α 越大, 同时 δ 越小, 当前送电路径分组投运方案的恢复可靠性越高。

假设图 2 所示送电路径中支路 l_1-l_5 的标幺值长度分别为 0.3、0.3、0.5、0.6、0.3,求解上述模型得到 2 种具有相同最优目标值的分组方案,具体线路分组结果如下:

(1)方案 1 将支路分为 (l_1, l_2) 、 l_3 、 (l_4, l_5) 这 3 组, $A=0.2215$;

(2)方案 2 将支路分为 l_1 、 (l_2, l_3) 、 (l_4, l_5) 这 3 组, $A=0.1003$ 。

2 种分组方案的分组数均为最小值 3,对比 2 种线路分组投运方案的恢复可靠性指标可知,方案 1 相对可靠,即将送电路径划分为 (l_1, l_2) 、 l_3 、 (l_4, l_5) 这 3 组。

2 基于网络流理论的前 K 条送电路径优化模型

第 1 节介绍了给定送电路径的线路分组投运方案的确定方法,在实际恢复过程中同样需要对送电路径进行优化。考虑到存在多种不确定性因素,单一送电路径往往不能满足调度人员的实际需求。为此,本文建立了基于网络流理论^[20]的前 K 条送电路径优化模型。

在系统的恢复前期,负荷水平较低,影响系统安全的一个重要因素是输电线路充电带来的过电压问题。线路的充电无功功率越大,则系统越容易出现过电压。因此,为了进一步保证恢复时系统的安全性,厂站之间送电路径的充电无功功率应尽可能地小。故本文以进行无功补偿后的线路充电无功功率 Q_{ij}^c 为线路权重,变压器支路的权重取很小的值,构造无向有权图 $G=(V, E, W)$,其中 V 、 E 分别为电网中厂站节点与相应的连接支路集合, W 为线路充电无功功率形成的权重矩阵。为了方便分析,假设每条线路由 2 条权重相同的有向弧表示,构建有向有权图 $D=(V, E', W')$ 。则以送电路径无功功率最小为目标的送电路径优化模型可表示为:

$$\begin{cases} \min \sum_{(i,j) \in E'_{un}} z_{ij} Q_{ij}^c \\ \text{s.t.} \quad \sum_{j \in V_i^+} f_{ji} - \sum_{j \in V_i^-} f_{ij} = \begin{cases} 1 & i=t \\ -1 & i=s \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \\ f_{ij} \leq M z_{ij} \\ z_{ij} \in \{0, 1\}, f_{ij} \geq 0 \quad (i,j) \in E'_{un} \\ z_{ij} = 1 \quad (i,j) \in E' - E'_{un} \end{cases} \quad (10)$$

其中, E'_{un} 为未恢复区域线路对应所有向弧的集合; z_{ij} 为二元决策变量,表示弧 (i,j) 的恢复状态,当 $z_{ij}=1$ 时表示弧 (i,j) 已恢复以构建送电路径,当 $z_{ij}=0$ 时表示弧 (i,j) 未恢复,此处假设已恢复区域的弧的恢复状态 z_{ij} 均为 1,仅对未恢复线路进行决策; f_{ij} 为非负整数变

量,表示弧 (i,j) 上的流量大小,且满足只有恢复的弧上的流量才可能不为 0,即当 $z_{ij}=1$ 时, $f_{ij} \leq M$ (M 为一足够大的正数),当 $z_{ij}=0$ 时, $f_{ij}=0$; 定义已恢复区域内任一点为网络流的源点 s ,待恢复节点为网络流的汇点 t ,其余节点均为中间节点, V_i^+ 、 V_i^- 分别为起点是 i 的弧集、终点是 i 的弧集。假设源点 s 提供单位流量,其余节点中仅汇点 t 消耗单位流量,故在节点流量平衡约束下能够保证送电路径拓扑上是连通的。求解此模型就可获得线路充电无功功率之和最小且拓扑上连通的最优送电路径。

为了获取前 K 条最短路径,可添加式 (11) 所示整数线性“割”约束^[21]。

$$\sum_{(i,j) \in E'_{un}} (1 - z_{ij}) \geq 1 \quad E'_{un} \in S^m \quad (11)$$

其中, S^m 为前 $m-1$ ($1 \leq m \leq K$) 次模型求解确定的送电路径方案集合,且 S^1 为空集,随着计算的进行该集合中的元素逐渐增加; E'_{un} 为 S^m 中的元素,即某些线路组合而成的具体送电路径。式 (11) 的含义是为了求解次优方案,应将最优方案从优化域中删除。

送电路径需要满足无功功率约束、机组自励磁约束以及潮流约束^[8,13],上述约束均可通过后检验的方式进行验证,而且本文的研究重点在于线路分组投运方式的探讨,故送电路径的约束校验不做重点介绍。

3 前 K 条最优送电路径及分组投运方案的联合求解

前 K 条送电路径优化模型与给定送电路径下的线路分组投运模型均为标准的 ILP 模型,目前已有成熟的商业求解器(如 CPLEX)可快速求解此类问题。图 3 给出了具体的计算流程,通过联合求解前 K 条最优送电路径及分组投运方案,可为操作人员提供丰富的备选送电路径方案以及对应的线路分组投运方案,有助于应对复杂的恢复环境,促使系统安全快速地恢复。

4 算例分析

4.1 新英格兰 10 机 39 节点系统

为了验证本文所提模型和方法的有效性,本节首先采用新英格兰 10 机 39 节点系统进行算例验证,具体的网架结构如图 4 所示。送电路径优化模型与给定送电路径下的线路分组投运模型均调用 CPLEX 求解器进行求解。计算采用普通 PC 机,配置为 Intel(R) Core(TM) i5 CPU,安装内存为 8.00 GB。新英格兰 10 机 39 节点系统共包含 39 个节点、46 条支路,其中支路 2-30、6-31、10-32、11-12、12-13、19-20、19-33、20-34、22-35、23-36、25-37 及 29-38 为变压器支路,其余均为线路。各支路的充电电容

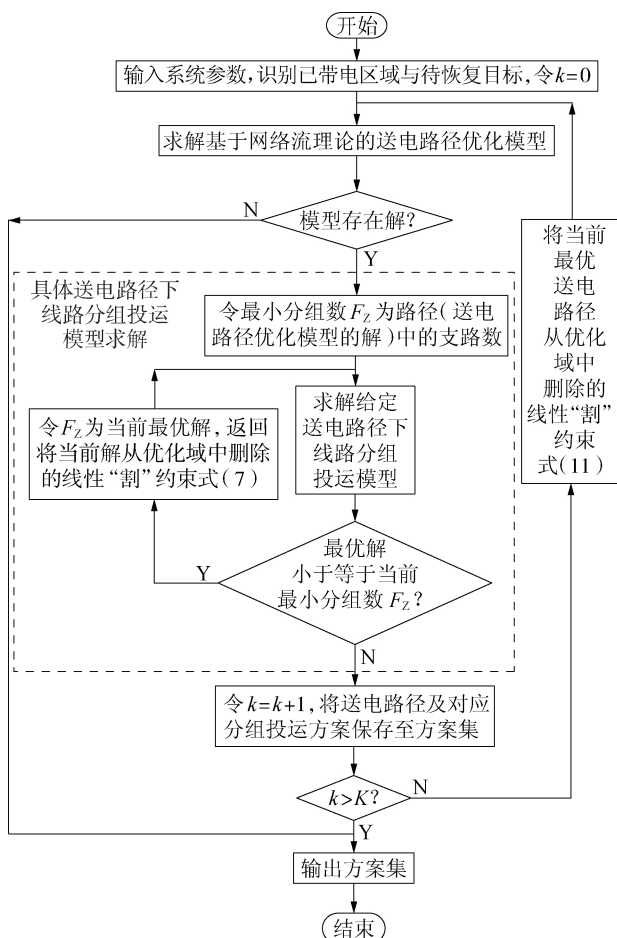


图3 送电路径及分组充电方案联合优化流程图

Fig.3 Flowchart of joint optimization between restoration path and grouping charging scheme

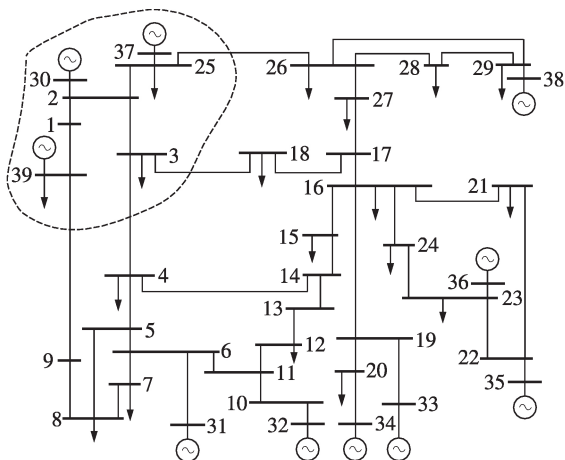


图4 新英格兰10机39节点系统的网架结构

Fig.4 Grid structure of New England 10-generator 39-bus system

以及支路长度标幺值见附录中表A3。假设图4中虚线所圈区域均已带电,下一步的恢复目标为节点38处的机组,此时需要为操作人员选择合理的送电路径及相应的线路投运方式。

本文中 K 取为5,即求解充电无功功率排在前5

条的送电路径,具体路径以及相应的最优分组方案如表1所示(表中()中的支路为一分组,无功功率为标幺值)。表中方案5的最优分组方案有3个,通过比较可知,3个分组方案中仅前2组线路的长度有所差异,长度标幺值如下:分组方案①的为0.6047、0.7220,分组方案②的为0.7472、0.5795,分组方案③的为0.8590、0.4677。计算式(9)所定义的恢复可靠性指标($\Lambda_1=0.3751$, $\Lambda_2=0.3285$, $\Lambda_3=0.1074$)后进行二次优选,确定当前送电路径下分组方案①相对可靠。明显可见,相比于其他方案,该分组方案下线路长度的分布相对均匀。

表1 前 K 条最优送电路径及分组投运方案Table 1 First K optimal restoration paths and grouping charging schemes

方案	送电路径及最优分组方案	分组数	无功功率
1	(25-26), (26-29), (29-38)	3	1.5603
2	(25-26), (26-28, 28-29), (29-38)	3	1.5606
3	(3-18, 18-17, 17-27, 27-26), (26-29), (29-38)	3	1.9365
4	(3-18, 18-17, 17-27, 27-26), (26-28, 28-29), (29-38)	3	1.9368
5	(3-4, 4-14, 14-15), (15-16, 16-17, 17-27, 27-26), (26-29), (29-38);	4	2.6219
	(3-4, 4-14, 14-15, 15-16), (16-17, 17-27, 27-26), (26-29), (29-38);		
	(3-4, 4-14, 14-15, 15-16, 16-17), (17-27, 27-26), (26-29), (29-38)		

若将线路分组投运方案迭代优化模型的终止条件改为模型无解,则可得到给定送电路径所有满足约束的分组方案。以表1中的方案3为例,表2给出了所有可行的线路分组方案,为了体现分组投运方案对加快系统恢复进程的作用,假设线路合闸充电

表2 给定送电路径下不同分组方案与恢复时间

Table 2 Different grouping charging schemes and restoration time for given restoration path

分组数	分组方案	恢复时间 / min
3	(3-18, 18-17, 17-27, 27-26), (26-29), (29-38)	18
4	(3-18), (18-17, 17-27, 27-26), (26-29), (29-38)	22
4	(3-18, 18-17), (17-27, 27-26), (26-29), (29-38)	22
4	(3-18, 18-17, 17-27), (27-26), (26-29), (29-38)	22
5	(3-18, 18-17), (17-27), (27-26), (26-29), (29-38)	26
5	(3-18), (18-17, 17-27), (27-26), (26-29), (29-38)	26
5	(3-18), (18-17), (17-27, 27-26), (26-29), (29-38)	26
6	(3-18), (18-17), (17-27), (27-26), (26-29), (29-38)	30

每次需 4 min,变压器的充电时间为 10 min,其余操作时间如负荷投入可忽略不计,表 2 同时给出了各种分组方案的总恢复时间。由表可以看出,线路的合理分组投运能有效地缩短系统的恢复时间。

4.2 中国西南某区域系统

为了进一步说明本文所提线路分组投运思路在实际系统中的适用性,以图 5 所示的中国西南某区域系统为例进行送电路径恢复方案制定,其中以 DCS 电厂中的水电机组作为黑启动电源,待恢复火电机位于 YZH 电厂;除线路 DCS-BF、BF-QD 以及 CK-QD 为 500 kV 电压等级的线路外,其余线路的电压等级为 220 kV,其中 500 kV 线路 DCS-BF 的长度为 247.4 km,在线路的首、末两端各装设容量为 109 Mvar 的并联高抗以补偿线路的充电无功。表 3 给出了前 5 条最优送电路径及在本文确定的极限充电距离下的分组数量,可见为尽可能避免线路充电功率过大出现过电压,应当优先选择低电压等级线路。

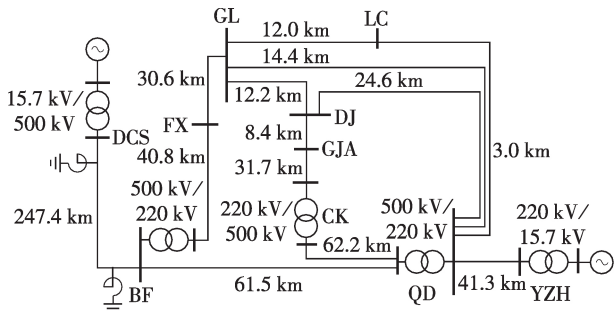


图 5 中国西南某区域系统的结构

Fig.5 Structure of a regional system in southwest China

表 3 前 K 条最优送电路径及最小分组数

Table 3 First K optimal restoration paths and minimum number of groups

方案	送电路径	支路总数	最小分组数
1	DCS-BF-FX-GL-QD-YZH	8	5
2	DCS-BF-FX-GL-LC-QD-YZH	9	5
3	DCS-BF-FX-GL-DJ-QD-YZH	9	5
4	DCS-BF-QD-YZH	6	6
5	DCS-BF-FX-GL-DJ-GJA-CK-QD-YZH	13	9

由表 3 可知,假设线路和变压器的充电时间与 4.1 节中所述相同,与逐条支路充电方式相比,方案 1 的恢复时间可缩短 12 min,方案 2、3、5 可以节省 16 min,加快了恢复进程。

考虑到合闸角、线路参数等因素对极限充电距离的影响,在实际应用中需留一定的安全裕度,即选择不同的可靠性系数 R 。以仅包含 220 kV 电压等级线路的方案 1 为例,表 4 给出了 R 取不同值时的线路分组投运方案,进一步说明 R 对分组方案的影响。由表可见,随着允许的极限充电距离增加,送电路径

分组数量相应减少,即为了加快系统的恢复进程可能会牺牲一定的恢复安全性。

表 4 R 取不同值时的最优线路分组投运方案

Table 4 Optimal grouping charging schemes of paths under different values of R

R	极限充电距离 / km	220 kV 线路分组投运方案	分组数
≥ 0.3	≥ 180	(BF-FX-GL-QD-YZH)	5
0.2	120	(BF-FX), (FX-GL-LC-QD-YZH)	6
		(BF-FX-GL-LC-QD), (QD-YZH)	6
0.1	60	(BF-FX), (FX-GL), (GL-QD-YZH)	7
		(BF-FX), (FX-GL-QD), (QD-YZH)	7

5 结论

本文提出了线路组合充电的新方式以加快送电路径的恢复。首先借助理论分析与仿真工具确定了线路充电的极限距离,在此基础上构建了给定送电路径的线路分组投运的 ILP 模型,同时定义了恢复可靠性指标对可能存在的多种分组数量最少的方案进行二次优选。为了提供丰富的送电路径及相应的线路分组投运方案,本文实现了前 K 条送电路径优化模型及给定路径下的线路分组投运模型的联合求解。算例结果表明,合理的送电路径及对应的线路组合充电方案有助于系统安全、快速恢复。本文旨在构造通用的恢复路径搜索模块,并将其有效应用在网架重构优化决策中。

当前工作是在假定系统为均一网络的基础上完成的,下一步的研究可将 EMTP 等暂态仿真软件整合在方案制定中,进一步保证线路分组投运方案的可行性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 傅子昊,孙磊,林振智,等. 基于节点重要度评价矩阵的网络重构双层优化策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):37-42.
FU Zihao, SUN Lei, LIN Zhenzhi, et al. Bi-level network re-configuration optimization based on node importance evaluation matrix[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5):37-42.

[2] 陈亮,贾萌萌,汪成根,等. 利用直流输电的电力系统恢复多目标优化方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(5):191-197.
CHEN Liang, JIA Mengmeng, WANG Chenggen, et al. Multi-objective optimization of power system restoration using DC power transmission[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5):191-197.

[3] ADIBI M M, FINK L H. Power system restoration planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1):22-28.

[4] 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, 188.
ZHOU Yunhai, MIN Yong. Optimal algorithm for system re-construction[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 67-

- 70,188.
- [5] 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):11-15,103.
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):11-15,103.
- [6] 孙磊,刘伟佳,林振智,等. 计及线路投运风险的电力系统恢复路径优化[J]. 电力系统自动化,2015,39(23):75-82,95.
SUN Lei, LIU Weijia, LIN Zhenzhi, et al. Determination of optimal restoration paths for power systems considering failure risk of restoring transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23):75-82,95.
- [7] 周云,严正,李乃湖,等. 系统恢复路径搜索新算法及其适用性研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(15):4152-4161.
ZHOU Yun, YAN Zheng, LI Naihu, et al. A new system restoration path search algorithm and its applicability research[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15):4152-4161.
- [8] 宋坤隆,谢云云,殷明慧,等. 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[J]. 电力系统自动化,2017,41(3):25-32.
SONG Kunlong, XIE Yunyun, YIN Minghui, et al. Mixed integer linear optimization model for path restoration of blackout system based on network flow theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3):25-32.
- [9] 张旭,程雪婷,赵冬梅,等. 一种基于顶点分裂的电网在线故障恢复路径搜索方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(10):71-77.
ZHANG Xu, CHENG Xueting, ZHAO Dongmei, et al. A path searching method based on vertex splitting for online power grid fault restoration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(10):71-77.
- [10] 冯丽,金黎明,张同尊,等. 考虑恢复路径充电时间的机组启动次序决策方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(18):4904-4910,5114.
FENG Li, JIN Liming, ZHANG Tongzun, et al. A new method to determine non-blackstart units restoration sequence with consideration of charging time of restoration paths[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18):4904-4910,5114.
- [11] 秦福欣,王建国,王秀丽. 考虑输电元件损坏概率的电网恢复时序恢复策略优化[J]. 电网技术,2017,41(1):137-145.
QIN Fuxin, WANG Jianguo, WANG Xiuli. Time sequence restoration optimization strategy of network considering power components' damage probability[J]. Power System Technology, 2017, 41(1):137-145.
- [12] 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 black start stage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22):28-34.
- [13] 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.
- [14] ADIBI M M, ALEXANDER R W, MILANICZ D P. Energizing high and extra-high voltage lines during restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3):1121-1126.
- [15] 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.
- [16] 孙璞玉,张焰,罗雯清. 考虑网架覆盖率与分散度的网架重构优化[J]. 电网技术,2015,39(1):271-278.
SUN Puyu, ZHANG Yan, LUO Wenqing. Optimization of backbone network reconfiguration considering network coverage rate and dispersion degree[J]. Power System Technology, 2015, 39(1):271-278.
- [17] 张玉琼,顾雪平. 基于随机统计分析的黑启动操作过电压的计算校验[J]. 电工技术学报,2005,20(5):92-97.
ZHANG Yuqiong, GU Xueping. Computation and statistical evaluation of operating over-voltages in black-start process of power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(5):92-97.
- [18] 于靖微. 黑启动路径空载合闸过电压问题的研究[D]. 保定:华北电力大学,2014.
YU Jingwei. Research of switching over-voltages of transmission-line energization for power system black-start[D]. Baoding:North China Electric Power University, 2014.
- [19] DING T, SUN K, HUANG C, et al. Mixed-integer linear programming-based splitting strategies for power system islanding operation considering network connectivity[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(1):350-359.
- [20] 林治勋. 线性规划与网络流[M]. 开封:河南大学出版社,1996:256-281.
- [21] 顾雪平,李少岩,梁海平,等. 网架重构过程中消除线路过载的环网恢复决策优化[J]. 中国电机工程学报,2017,37(5):1379-1389.
GU Xueping, LI Shaoyan, LIANG Haiping, et al. Optimization decision-making method for looped network restoration to eliminate transmission line overload in network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5):1379-1389.

作者简介:



周光奇

周光奇(1993—),男,山东济宁人,博士研究生,主要研究方向为电力系统安全防护和系统恢复;

李少岩(1989—),男,河北保定人,讲师,博士,主要研究方向为电力系统安全防护和系统恢复(E-mail: shaoyan.li@ncepu.edu.cn);

顾雪平(1964—),男,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统安全防护和系统恢复、电力系统安全稳定评估与控制、智能技术在电力系统中的应用等(E-mail: xpgu@ncepu.edu.cn)。

(下转第200页 continued on page 200)

Test and analysis system for action characteristics of arc fault detection device

SU Jingjing, XU Zhihong

(Fujian Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion,
School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: To solve problems of a large variety of test items, complicated operation and low efficiency of test, a test and analysis system for action characteristics of AFDD (Arc Fault Detection Device) is researched. A comprehensive test circuit is designed by using electromagnetic switches, and its automation control and monitoring are realized with the switch states taken as controlling and observed quantities. The electromechanical coupling feedback control strategy based on voltage and mechanical displacement is used to improve the operation performance of arc fault simulator, and the success rate of arc fault simulation is improved. Simultaneously, the running state of the hardware equipment of the lower computer is controlled and monitored by the upper platform, and the arc voltage and current are collected in real time. The system can not only complete the automation test for action characteristics of AFDD, but also have functions of waveform acquisition and storage, test report automatic generation and so on, which greatly improves the test automation level and efficiency, reduces the interference of human factors and lays a foundation for further research on the formation mechanism of arc fault and arc fault detection technology.

Key words: property test; arc fault detection device; arc fault; function configuration; feedback control

(上接第180页 continued from page 180)

Formation of restoration path scheme considering line restoration in groups

ZHOU Guangqi, LI Shaoyan, GU Xueping, LIANG Haiping

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The restoration path of transmission line after a major blackout is an important task in the restoration process of power system, and reasonable restoration path and charging mode will help the system to recover quickly and safely. Combined with the theoretical analysis and simulation, the limit charging distance of the transmission line under typical parameters is given. Aiming at the given restoration path, the method of line restoration in groups is proposed to shorten the system's recovery time, and the integer linear programming model is established with the least number of groups as its objective. At the same time, the recovery reliability index is defined to optimize the grouping scheme when a certain restoration path has multiple line restoration schemes. In order to provide multiple alternative path schemes for operators, an integer linear programming model of the first K optimal restoration paths based on the network flow theory is established. Efficient commercial optimization software is used to jointly solve the optimization model of first K paths and the model of line restoration in groups to obtain the first K optimal path schemes and their grouping operation schemes. The results of an example show that a reasonable line charging scheme can speed up the system recovery process on the premise of ensuring the recovery safety.

Key words: system restoration; transmission line restoration operation; limit charging distance; line charging in groups; integer linear programming

附录

表 A1 不同电压等级输电线路的典型参数
Table A1 Typical parameters of transmission lines at different voltage levels

电压等级/kV	序参数	电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	电抗/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	电容/($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)
500	正序	0.023	0.277	0.012
	零序	0.261	1.085	0.009
220	正序	0.0399	0.3031	0.0118
	零序	0.1197	0.9093	0.0079

表 A2 不同长度输电线路空载合闸时的工频过电压与操作过电压
Table A2 Power frequency overvoltage and switching overvoltage of no-load closing of transmission lines with different lengths

输电线路 电压等级/kV	线路长度/km	工频过电压	操作过电压	输电线路 电压等级/kV	线路长度/km	工频过电压	操作过电压
220	100	1.0056	1.9784	500	20	1.0002	1.3052
	150	1.0128	1.9774		30	1.0005	1.9696
	200	1.0230	1.9703		40	1.0008	1.9656
	250	1.0364	1.9641		50	1.0013	1.9832
	300	1.0532	1.9566		60	1.0019	1.9804
	350	1.0738	1.9489		70	1.0026	1.9772
	400	1.0985	1.9488		80	1.0034	1.9885
	450	1.1279	1.9348		90	1.0042	1.9866
	500	1.1626	1.9259		100	1.0052	1.9843
	550	1.2034	2.0456		110	1.0064	1.9891
	600	1.2514	2.2085		120	1.0076	1.9965

注：表中的工频过电压和操作过电压均为标么值。

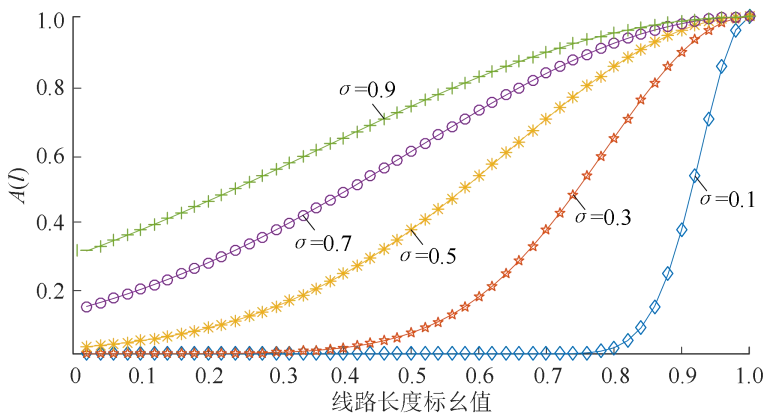


图 A1 不同 σ 值下的隶属度函数曲线
Fig.A1 Membership function curves under different values of σ

表 A3 线路与变压器支路的基本参数
Table A3 Basic parameters of transmission lines and transformer branches

支路	支路充 电电容	支路长度	支路	支路充 电电容	支路长度	支路	支路充 电电容	支路长度
1-2	0.6987	0.5823	19-33	0	1.0000	11-12	0	1.0000
2-3	0.2572	0.2143	21-22	0.2565	0.2138	13-14	0.1723	0.1436
2-30	0	1.0000	22-35	0	1.0000	15-16	0.1711	0.1425
3-18	0.2138	0.1782	23-36	0	1.0000	16-19	0.3040	0.2533
4-14	0.1382	0.1152	25-37	0	1.0000	16-24	0.0680	0.0567
5-8	0.1476	0.1230	26-28	0.7802	0.6502	10-32	0	1.0000
6-11	0.1389	0.1158	28-29	0.2490	0.2075	19-20	0	1.0000
7-8	0.0780	0.0650	1-39	0.7500	0.6250	20-34	0	1.0000
9-39	1.2000	0.9050	2-25	0.1460	0.1217	22-23	0.1846	0.1538
10-13	0.0729	0.0608	3-4	0.2214	0.1845	23-24	0.3610	0.3008
12-13	0	1.0000	4-5	0.1342	0.1118	25-26	0.5310	0.4425
14-15	0.3660	0.3050	5-6	0.0434	0.0362	26-27	0.2396	0.1997
16-17	0.1342	0.1118	6-7	0.1130	0.0942	26-29	1.0290	0.8575
16-21	0.2548	0.2123	6-31	0	1.0000	29-38	0	1.0000
17-18	0.1319	0.1099	8-9	0.3804	0.3170			
17-27	0.3216	0.2680	10-11	0.0729	0.0608			

注：表中的支路充电电容和支路长度均为标么值。