

DOI: 10.7652/xjtuxb201909014

计及短路电流限额的网架优化模型及启发式算法

田士君¹, 王秀丽¹, 齐世雄¹, 黄启航¹, 朱承治²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 国网浙江省电力有限公司, 310007, 杭州)

摘要: 针对电网短路电流越限的问题,提出了计及短路电流限额约束的网架优化模型。采用0-1变量描述可变的网架拓扑,构建离散最优潮流模型。引入描述短路电流的非线性约束条件,将其考虑到离散最优潮流模型当中,使之计及短路电流限额约束。基于阻抗灵敏度和断线近似成本变化,提出求解所提模型的启发式算法,该算法以阻抗灵敏度最大的线路逐次替换断线近似成本增加最大的线路为思想,迭代求解所提模型。采用IEEE118系统作为算例对所提模型的实用性和有效性进行验证,结果表明:相比于商用优化求解器,所提算法在保证求解精度的同时具有较高的求解效率;网架优化能够在限制短路电流的同时降低电力系统运行成本。

关键词: 短路电流限额;网架优化;离散最优潮流模型;启发式算法

中图分类号: TM76 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)09-0102-08

Optimal Transmission Switching Model Considering Short-Circuit Current Limitation and a Heuristic Algorithm

TIAN Shijun¹, WANG Xiuli¹, QI Shixiong¹, HUANG Qihang¹, ZHU Chengzhi²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China)

Abstract: For the over-limit problem of short-circuit current in grid, an optimal transmission switching model considering short-circuit current limitation constraint is proposed. A discrete optimal power flow model is constructed by using binary variables to describe a variable grid topology, and a nonlinear constraint describing the short-circuit current is introduced and is taken into account in the discrete optimal power flow model to consider the short-circuit current limitation constraint. A heuristic algorithm based on impedance sensitivity and cost approximation of switching line is proposed to tackle the model. The algorithm uses the line with the highest impedance sensitivity to gradually replace the line with the biggest cost approximation of switching line, and solves the proposed model by iteration. IEEE118 system is taken as an example to verify the practicability and effectiveness of the proposed model. Compared with commercial solvers, the proposed method has higher efficiency while ensuring the accuracy of solution. The results show that this optimal transmission switching model restrains short-circuit current effectively, and reduces operating cost of power system.

Keywords: short-circuit current limitation; optimal transmission switching; discrete optimal power flow model; heuristic algorithm

收稿日期: 2019-02-22。 作者简介: 田士君(1987—),男,博士生;王秀丽(通信作者),女,教授。 基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目。

网络出版时间: 2019-06-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190611.0949.004.html>

“十三五”期间,我国电网建设的速度不断加快,500 kV、220 kV 电磁环网联系日益密切,短路电流不断攀升^[1-2],部分短路电流超过或接近断路器的开断容量,对电力系统的安全稳定运行造成了巨大威胁,例如:我国华北地区短路电流大面积超标,尤其是特高压变电站接入后,京津地区4个500 kV 变电站短路电流超过63 kA^[3]。若采取更换大容量断路器设备的方式解决短路电流越限的问题,不仅投资巨大,而且实施难度高。网架结构调整是一种灵活的优化和控制手段^[4],也是未来灵活高效的输电网所需要的能力^[5]。网架结构调整为许多问题提供了解决方案,如基于网架优化(OTS)的阻塞管理^[6]、经济运行^[7]和提升恢复力^[8]等。通过网架优化来限制短路电流可以充分利用既有的电网资源、减少设备投资和占地费用,规避了额外的设备安装和检修等问题^[9-10]。

通过网架调整限制短路电流的理论研究尚处于初步阶段。已有的研究往往侧重规划层面的网架优化,在运行层面目前一般只能依靠既有经验和校验等手段进行网架调整,缺乏有效的理论指导。文献[11]通过对阻抗灵敏度进行分析,快速得出了线路开断条数最少的线路集合,该方法虽然避免了对开断线路组合的校验过程,但忽略了开断线路对运行成本的影响。文献[12]提出了综合灵敏度指标,并以此为依据选取线路进行开断,从而达到限制短路电流的目的,但该方法忽略了电力系统潮流约束,调整后的网架存在不满足运行约束的可能。文献[13]提出了考虑限制短路电流的网架调整全局优化问题的数学模型,但该模型的求解只能采用智能优化算法,求解效率较低,求解时间过长,并且无法分析变量和目标函数的边际关系。文献[14]提出了限制短路电流的网架优化模型,该模型将短路电流约束线性化,但线性化过程引入的误差会导致得到非最优解,且求解方法不适用于交流潮流模型,更不适用于大规模电力系统。

总体来看,已有的网架调整限制短路电流的研究主要存在两方面不足:一是优化模型考虑不全面^[11-12];二是求解方法存在一定的缺陷^[13-14]。

有鉴于此,本文针对短路电流超标问题提出了OTS模型,引入0-1变量描述可变网络拓扑,并对短路电流的计算过程进行了简化,本质上是计及短路电流限额约束的离散最优潮流模型。由于该模型是一个非凸的混合整数非线性规划问题,所以本文提出了一种基于线路阻抗灵敏度和断线近似成本的

启发式算法来对该模型进行求解。采用IEEE118系统作为算例来验证本文提出模型的实用性和有效性,并将本文提出的启发式算法与商用优化求解器通用代数建模系统(GAMS)进行了对比,验证了本文算法的求解效率和精度。

1 网架优化模型

1.1 模型建立

在网架优化模型中,电网结构不再是固定不变的,而是由负荷水平和机组出力等因素决定的可变网络拓扑。线路和变压器的状态采用0-1变量 π_k 描述,0表示元件(线路或变压器) k 断开,1表示元件 k 运行。

网架优化模型以传统最优潮流的系统运行成本最小为目标函数,即

$$\min \left[\sum_{g \in G} (a_g + b_g P_g + c_g P_g^2) \right] \quad (1)$$

式中: G 为发电机的集合; P_g 为第 g 台发电机的有功出力; a_g 、 b_g 和 c_g 为第 g 台发电机的费用系数。

模型的约束条件包括

$$\sum_{k|j=n} P_{ijk} - \sum_{k|i=n} P_{ijk} + \sum_g P_g - P_n = 0, \forall n \quad (2)$$

$$\theta_n^{\min} \leq \theta_n \leq \theta_n^{\max}, \quad \forall n \quad (3)$$

$$P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max}, \quad \forall g \quad (4)$$

$$B_k(\theta_i - \theta_j) - P_{ijk} + (1 - \pi_k)M_k \geq 0, \quad \forall k \quad (5)$$

$$B_k(\theta_i - \theta_j) - P_{ijk} - (1 - \pi_k)M_k \leq 0, \quad \forall k \quad (6)$$

$$P_{ijk}^{\min} \pi_k \leq P_{ijk} \leq P_{ijk}^{\max} \pi_k, \quad \forall k \quad (7)$$

$$\sum_k (1 - \pi_k) \leq J_k \quad (8)$$

式(2)为功率平衡约束,式中: P_{ijk} 为以 i 、 j 为首末节点的线路 k 传输的有功功率; P_n 为母线 n 的有功负荷。式(3)为母线相角约束,式中: θ_n 为母线 n 的相角; $\theta_n^{\min}$ 和 $\theta_n^{\max}$ 分别为相角的下限和上限。式(4)为机组出力约束,式中 $P_g^{\min}$ 和 $P_g^{\max}$ 分别为发电机 g 的最小技术出力和出力上限。式(5)和(6)为线路潮流约束,式中: B_k 为线路 k 的导纳; θ_i 和 θ_j 分别为母线 i 和母线 j 的相角; π_k 为线路 k 的运行状态。为了解决0-1变量和连续变量乘积问题,采用大 M 法将等式 $P_{ijk}\pi_k = B_k(\theta_i - \theta_j)$ 转换为式(5)和(6), M_k 为一个数量级很大的数。式(7)为线路功率限额约束,式中 $P_{ijk}^{\min}$ 和 $P_{ijk}^{\max}$ 分别为线路 k 传输有功功率的下限和上限。式(8)为允许断开的最大线路条数约束,式中 J_k 为最大断线条数。

1.2 模型说明

本文采用0-1变量描述线路和变压器状态,由

于双回线路或并联运行的变压器可独立地投切,因此用单独的变量描述其状态。对于可以分裂运行的母线,在建模时视其为2个母线,母联断路器视为等效线路。

此外,电力系统运行的安全性需要说明。若某节点只有1条出线,该线路断开后会形成孤立节点,这种运行情况是不允许的。若某节点有2条出线,其中一条线路断开,另一条线路发生故障也会形成孤岛,不满足N-1安全性的要求。因此,考虑电网运行的安全性,只有当某线路的首末节点都至少有3条出线时,该线路才是可以断开的线路^[15],模型中用变量 π_k 表示。不满足断线条件的线路不能断开,在模型中用常量1表示。经过以上处理,不仅在一定程度上保证了电网运行的安全性,而且大大减少了离散变量的个数,降低了模型的求解难度。需要指出的是,本模型只排除了可能引起N-1安全性的线路并限制了断开线路的条数,并没有严格考虑网架的N-1安全性。因此,上述模型求解结束后需要进行N-1校验,排除不满足N-1的断线组合,传统的N-1校验本文不再赘述。

2 短路电流限额约束

在实际工程计算中,短路电流并不需要十分精确的结果,由于快速继电保护装置的应用,最重要的是计算短路电流基频交流分量的初始值,即次暂态电流 I'' ^[16]。本文对短路电流的计算采用了工程上常用的近似方法,不考虑短路过渡阻抗时,节点 f 的次暂态短路电流 I_f 的计算公式为

$$I_f^* \approx \frac{1}{Z_{ff}} \quad (9)$$

式中: I_f^* 为短路电流的标幺值; Z_{ff} 为节点 f 的自阻抗。从阻抗角度分析,断开线路相当于在原网络阻抗矩阵基础上减少链支,这会增大所有节点的自阻抗,从而使所有母线的短路电流有不同程度的下降^[14],因此断开线路不会引发新的母线短路电流超标。

若忽略线路电阻,导纳矩阵的元素与线路状态的关系为

$$B'_{mm} = - \left(\sum_{\forall k|i=m \& j=n} \frac{\pi_k}{x_{ijk}} + \sum_{\forall k|j=m \& i=n} \frac{\pi_k}{x_{ijk}} \right), \forall m \neq n \quad (10)$$

$$B'_{nn} = \sum_{\forall k|i=n \& j=n} \frac{\pi_k}{x_{ijk}} + \sum_g \frac{1}{x_{dg}} - b_{cn}, \quad \forall n \quad (11)$$

式(10)为互导纳计算式,由于开断线路可能为多回线路中的某一条,所以式(10)计算的是节点 m 和 n

之间可能存在多回线路时,2节点之间的互导纳,式中 x_{ijk} 为以 i, j 为首末节点的线路 k 的电抗。式(11)为节点自导纳计算式,式中: x''_{dg} 为发电机(或调相机) g 的次暂态电抗; b_{cn} 为节点 n 上的补偿电容器的电纳。

与计算直流潮流的导纳矩阵 $\mathbf{B}$ 不同,计算短路电流的导纳矩阵 $\mathbf{B}'$ 包含了发电机的次暂态电抗和接地补偿电容器、电抗器。由于包含了接地支路, $\mathbf{B}'$ 是可逆的。对 $\mathbf{B}'$ 求逆可得电抗矩阵 $\mathbf{X}'$,由式(9)即可得出节点的短路电流。

若直接将 $\mathbf{B}'$ 的求逆运算加入到1.1节建立的模型中,会使其规模变得过大,导致求解复杂甚至无法求解。然而,实际系统中往往只需要关注少数几条短路电流可能超标的母线,因此不必计算电抗矩阵的所有元素,只需计算关注点的自电抗即可。

忽略电阻的情况下,某一节点 i 的自电抗在数值上等于在该节点注入单位电流且其他节点都在开路状态时节点 i 的电压值^[17]。短路电流超标节点 f 的自电抗的计算式为

$$\begin{bmatrix} B'_{11} & \cdots & B'_{1f} & \cdots & B'_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ B'_{f1} & \cdots & B'_{ff} & \cdots & B'_{fn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ B'_{n1} & \cdots & B'_{nf} & \cdots & B'_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X'_{1f} \\ \vdots \\ X'_{ff} \\ \vdots \\ X'_{nf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \leftarrow f \quad (12)$$

式中: $X'_{1f} \sim X'_{nf}$ 是与节点 f 关联的电抗; $\leftarrow$ 表示节点 f 注入单位电流1指向的列向量1的位置。求解式(12)的 n 个方程,可计算节点 f 的自电抗。但是,由于 $\mathbf{B}'$ 和 $\mathbf{X}'$ 中的元素都是与网架结构相关的变量,因此式(12)是非线性方程组。

此外,由式(10)可知,线路断开只能将互导纳由非零变为零,不会产生新的非零互导纳。因此,变量导纳矩阵 $\mathbf{B}'$ 和初始系统(全部线路投运)对应的常量导纳矩阵 $\mathbf{B}'_0$ 相比没有产生新的非零元素,即 $\mathbf{B}'$ 是一个稀疏的变量矩阵。利用这一特点,可优先形成初始系统的导纳矩阵 $\mathbf{B}'_0$,针对其中的非零元素 $B'_{0,ij}$,按照位置对应到变量导纳矩阵的元素 B'_{ij} ,由 B'_{ij} 参与运算。由此将式(12)化简为

$$\sum_{j=1, B'_{0,ij} \neq 0}^{j=n} B'_{ij} X'_{jf} = 0, \quad \forall i \in N \& i \neq f, \quad \forall f \in F \quad (13)$$

$$\sum_{j=1, B'_{0,fj} \neq 0}^{j=n} B'_{fj} X'_{jf} = 1, \quad \forall f \in F \quad (14)$$

式中: N 为所有节点的集合; F 为短路电流超标母

线的集合。

求出节点的自电抗后,得到母线短路电流限额约束为

$$I_f = \frac{I_{B,f}}{X_{ff}} \leq I_f^{\lim}, \quad \forall f \in F \quad (15)$$

式中: $I_{B,f}$ 为节点 f 短路电流基准值; $I_f^{\lim}$ 为节点 f 的短路电流限额。

综上所述,式(10)~(11)(13)~(15)共同构成了母线短路电流限额的约束条件,加入到 1.1 节所提的网架优化模型中,便构成了便于求解的考虑短路电流约束的网架优化模型。

3 启发式求解算法

本文建立的模型是混合整数非线性模型(MINLP)。由于等式约束(13)(14)为非线性等式约束,模型非凸,对于非凸的 MINLP,传统算法耗时长且无法保证得到全局最优解。智能算法如遗传算法、粒子群算法等对非凸非线性模型有较好的求解效果,但计算量大、求解时间长,且不能分析变量和目标函数的边际关系。但是,实际工程应用中,如何在合理时间内求出满足条件的较优解尤为重要。

本文结合线路的阻抗灵敏度断线近似成本估计,提出了一种启发式求解算法,将复杂的非凸的 MINLP 分解为 1 个常规 OTS 模型和若干直流最优潮流模型(DCOPF),OTS 模型为凸的 MINLP,DCOPF 为线性模型(LP),均可用商业优化软件 Gurobi 求解,避免了直接求解包含母线短路电流限额约束的复杂模型,可较好地求解本文所提的模型。

3.1 阻抗灵敏度

当断开线路 k 时,线路 k 对节点 f 的自阻抗灵敏度 S_{kf} 的定义^[11]为

$$S_{kf} = \frac{Z_{ff}^k - Z_{ff}}{Z_{ff}} = - \frac{(Z_{fi} - Z_{fj})^2}{(Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij} - z_{ij})Z_{ff}} \quad (16)$$

式中: Z_{ff}^k 是线路 k 断开后节点 f 的自阻抗; Z_{ii} 和 Z_{jj} 分别为线路断开前原网络节点 i 和节点 j 的自阻抗; Z_{ij} 为节点 i, j 的互阻抗; z_{ij} 为断开线路的阻抗值。 S_{kf} 的大小衡量了当线路 k 断开时节点 f 自阻抗的变化程度。线路的阻抗灵敏度越大,该线路限制短路电流的效果越好。为了衡量线路 k 对所有短路电流超标母线的限流效果,可以定义线路 k 的阻抗灵敏度 S_k 和阻抗灵敏度的权重系数 η_f ^[12] 为

$$S_k = \sum_{\forall f | f \in F} \eta_f S_{kf} \quad (17)$$

$$\eta_f = \frac{I_f - I_f^{\text{break}}}{I_f^{\text{break}}} \quad (18)$$

式中 I_f^{break} 为超标节点 f 处断路器的遮断电流。 S_k 衡量了线路 k 对所有超标母线的限流效果, η_f 表征了短路电流超标的程度。

3.2 近似运行成本变化

计算线路开断对系统运行成本的影响时,可以通过线路首末端母线的注入功率来模拟线路的开断。图 1 是母线注入功率模拟线路开断的示意图,断开母线上节点 i 和 j 之间的线路 k 等价于在母线上注入由于断线造成的功率变化 ΔP_i 和 ΔP_j ,表达式^[15]为

$$\Delta P_i = -\Delta P_j = \frac{P_{ijk}}{1 - (\beta_{k,i} - \beta_{k,j})} \quad (19)$$

式中 $\beta_{k,i}$ 、 $\beta_{k,j}$ 分别为线路 k 的首末节点 i, j 对 k 的潮流分布因子。

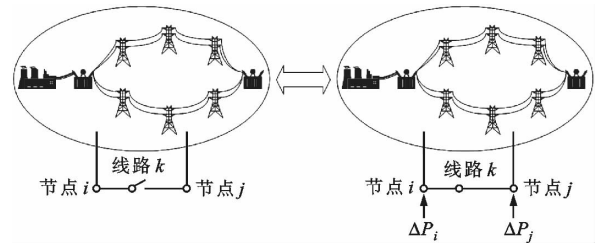


图 1 母线注入功率模拟线路开断的示意图

由此,对线路开断造成的运行成本变化进行估计。假设线路 k 断开前节点 i 和 j 的边际电价分别为 λ_i 和 λ_j ,线路 k 断开引起的运行成本近似变化量 α_k 为

$$\alpha_k \approx -\lambda_i \Delta P_i - \lambda_j \Delta P_j = \frac{(\lambda_j - \lambda_i) P_{ijk}}{1 - (\beta_{k,i} - \beta_{k,j})} \quad (20)$$

α_k 为正,表示断开线路 k 会使运行成本增加;反之,表示运行成本减小。 α_k 是成本变化量的近似值,因为线路 k 的断开会使节点 i 和 j 的边际电价发生变化,再使用线路 k 断开前的边际电价估计成本变化则会引入误差。由于本文重点在于用成本近似值给出不同线路断开对运行成本影响大小的顺序,而不是用这种方法精确计算成本变化情况,因此该近似造成的误差不影响本文的研究,是可行的。

3.3 启发式求解算法思路

母线短路电流限额约束的引入使本文所提模型非凸非线性,求解难度大大增加。为了便于求解,可以将潮流约束和短路电流限额约束分开考虑。先求解式(1)~(8)表示的常规包含 OTS 的最优潮流模型,假设此时断线集合为 U 。

阻抗灵敏度和近似成本运行变化是启发式算法

选择和更新断线组合的重要依据。计算集合 U 中线路的断线近似成本变化,并按成本增加量从大到小排序,该顺序表征线路断开对运行成本降低的贡献程度。显然,集合 U 没有考虑限制短路电流的效果,很可能限流效果好的线路没有包含在集合 U 中。为了找出满足短路电流限额约束的线路,筛选出所有允许开断线路构成集合 K ,将集合 K 中的线路按照阻抗灵敏度从大到小的顺序排列。通过循环依次比较,用集合 K 内阻抗灵敏度最大的线路替换集合 U 内断线成本增加量最大的线路,直到满足约束条件(式(15))为止。启发式算法主流程图和集合 U 的更新流程图分别如图 2 和图 3 所示。

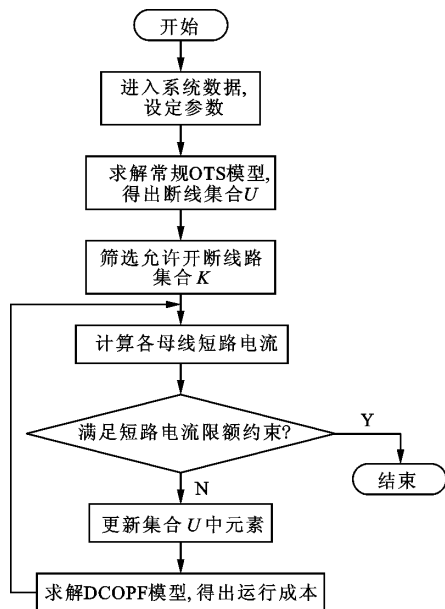
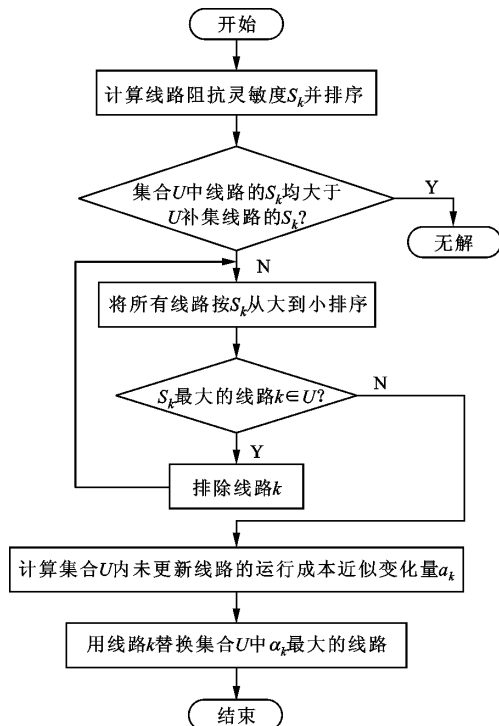


图 2 启发式算法流程图

本算法的循环过程实际上是逐步平衡运行成本和限制短路电流的过程,用断开后限流效果最好的线路来替换断开后运行成本增加最大的线路,即通过牺牲最少的经济性来满足母线短路电流约束,近似完成对非凸的混合整数非线性规划问题的求解,得到 1 组较优解。

4 算例分析

本文采用 IEEE118 系统作为算例,IEEE118 系统包含 54 台机组、186 条支路,总装机容量为 7 220 MW,峰值负荷为 5 972.8 MW。计算中假定系统负荷水平为峰值负荷,并将线路 36、38、51、96、97 的功率限额由 500 MW 降低为 200 MW。算例中油、气、煤的燃料价格分别为 4.034/1 055.06、5.781/1 055.06、1.231/1 055.06 美元/MJ (1 Btu = 1 055.06 J)。发电机次暂态电抗标幺值采用汽轮

图 3 集合 U 的更新流程图

机次暂态电抗典型值 0.15^[18]。系统正常运行的最大最小相角取 ± 0.6 rad。假设所有母线的短路电流限额为 24 kA。考虑 $N-1$ 安全准则,186 条支路中有 85 条是允许断开的,在模型中用 0-1 变量描述。

本文模型和算法用 GAMS 软件编写,并在 1 台处理器为 Core i5、内存为 4 GB 的电脑上运行。

4.1 近似成本估计合理性验证

图 4 是断线成本变化量的真实值与估计值的关系,横坐标是用 DCOPF 计算的实际断线后运行成本变化量的真实值,纵坐标是用等效注入功率模拟断线计算的运行成本变化量的近似值,可以看出,大部分的点都在 $y=x$ 的直线上,即用等效注入功率来模拟计算断线运行成本的方法是可行的。

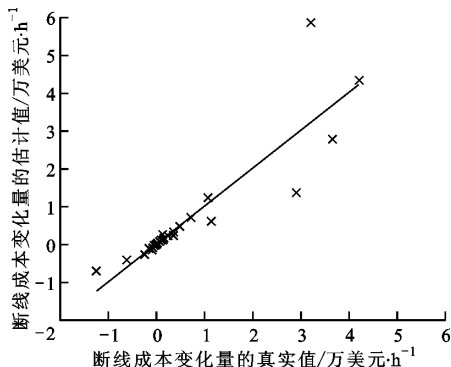


图 4 断线成本变化量的真实值与估计值的关系

图 5 是断线成本变化量,横坐标是所有可开断

的线路编号,按照 α_k 由小到大排序,纵坐标是用 DCOPF 计算的断线引起的运行成本变化量,可以看出,基于 α_k 的线路排序和实际断线成本变化顺序基本一致,尤其是在断线使成本降低的部分。

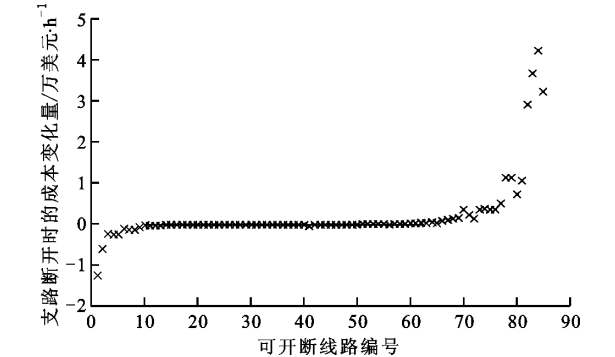


图 5 按 α_k 递增排序的断线成本变化量

综上所述,本文采用近似成本估计排序方法的合理性得到了验证。

4.2 结果分析

计算所有节点的短路电流,不满足短路电流限额约束的有母线 49、66、69、80、100,其中母线 66 的短路电流最大,为 30.42 kA。假设式(8)中 $J_k=5$,用 GAMS 生成的算例预处理模型的规模参数如表 1 所示,可以看出,OTS-SCC 模型的规模远大于 OPF 模型和 OTS 模型。表 1 中“非线性元素数”指模型中 2 个变量乘积项的个数,衡量了模型的非线性程度。

表 1 GAMS 中不同模型的规模参数

参数	数值		
	OPF	OTS	OTS-SCC
变量数	359	444	14 958
约束数	305	864	15 383
非零元素数	1 039	2 394	21 423
离散变量数	0	85	85
非线性元素数	54	54	4 814

注:OPF 为最优潮流模型;OTS-SCC 为考虑网架优化和短路电流限额约束的最优潮流模型。

网架固定时的最优潮流模型计算结果为最小运行成本为 151 580 美元/h,考虑网架可变时的最优潮流模型计算结果为 136 717 美元/h,比固定网架情况下的运行成本减小了约 9.8%,相应的断线组合为 11、30、36、54、104。加入母线短路电流约束后,采用本文提出的启发式算法求解,迭代 4 次后短路电流满足要求,相应系统运行成本为 142 411 美元/h。迭代过程中集合 U 的变化如表 2 所示。迭

代过程中的母线短路电流和系统运行成本如图 6 所示,分析得出,为了满足母线短路电流限额约束,网架结构做出了相应的调整,系统牺牲了约 3.8%的运行成本,但相比固定网架情况运行成本仍减小了约 6%,可见新调整的网架结构在满足母线短路电流限额约束的同时,仍然有较大的经济效益。

表 2 迭代过程中集合 U 的变化

迭代次数	U
0	{30,11,36,54,104}
1	{102,11,36,54,104}
2	{102,107,36,54,104}
3	{102,107,155,54,104}
4	{102,107,155,98,104}

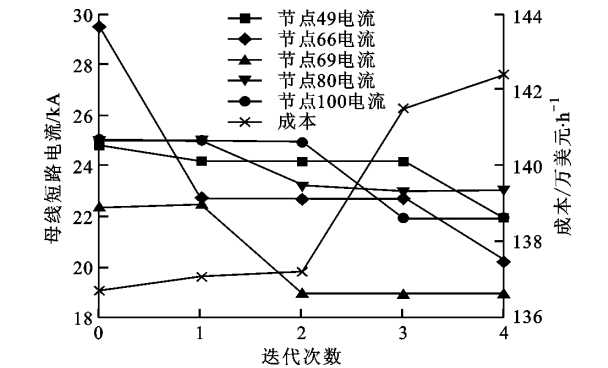


图 6 迭代过程中的母线短路电流和系统运行成本

4.3 求解效率对比

为了说明本文提出的启发式算法的求解效率和精度,将本文算法与计算出的运行成本和 GAMS 进行对比,其中 GAMS 采用 SBB 求解器,其他参数采用默认值。表 3 列出了 J_k 取不同值时,启发式算法和 GAMS 计算时的 CPU 运行时间。

当 $J_k=4$ 时,模型无解,这说明要想将系统的短路电流限制在 24 kA 以内至少需要断开 5 条线路。当 $J_k=5$ 时,GAMS 有较高的计算效率,这是因为短路电流限额约束排除了绝大多数断线组合,使得 GAMS 在分支定界过程中只需计算少量节点即可得到最优解。随着 J_k 的增大,GAMS 的求解时间急剧增加。这是因为 J_k 增大时,GAMS 会遇到“维数灾难”,即可能的断线组合急剧增多,需要大量分支去处理不同线路开断对短路电流约束和成本的影响。另一方面,由于模型具有高度非凸非线性特点,GAMS 无法得到全局最优解,如当 $J_k=10$ 时,GAMS 陷入局部最优。

相比而言,本文提出的启发式算法通过求解常规 OTS 模型找出对降低运行成本最有利的 J_k 条线

路。由于常规 OTS 模型是二阶锥规划,可用 Gurobi 优化器求解,求解效率高且可以保证全局最优。此外,启发式算法的耗时主要集中在求解常规 OTS 模型上。由表 3 可知,相比于 GAMS,启发式算法的求解耗时对 J_k 的增大不敏感,所以随着 J_k 的增大,启发式算法求解效率的优势就愈发明显。在求解质量上,虽然 J_k 较小时会有一些误差,但 J_k 增大后不会陷入局部最优,求得的解更接近全局最优解。

表 3 启发式算法和 GAMS 的运行成本和 CPU 运行时间

J_k	启发式算法		GAMS		相对误差 /%
	运行成本/ 美元·h ⁻¹	CPU 运行 时间/s	运行成本/ 美元·h ⁻¹	CPU 运行 时间/s	
4	无解	无解	无解	无解	无解
5	142 411	13.2	140 734	6.1	1.19
7	137 428	20.8	137 201	106.5	0.17
10	136 699	70.3	139 602	1 178.0	2.08
12	136 602	131.1	无解	>7 200	0

4.4 不同负荷水平的断线策略

为充分说明线路开断对断线策略和运行成本的影响,对比了低(2 986.4 MW)、中(4 480 MW)、高(5 972.8 MW)3 种负荷水平对应的断线编号,结果如表 4 所示,可以看出,网架调整策略随着负荷水平的变化而变化。负荷变动后固定的网架结构会限制机组的经济出力。这也验证了文献[5]提出的网架结构应动态响应负荷变动的观点。

表 4 不同负荷水平对应的断线编号

负荷水平	断线编号	最大短路电流/kA
低	30, 36, 54, 100, 102, 107,	23.922
	116, 119, 123, 155	
中	30, 36, 54, 71, 100, 102,	22.921
	104, 107, 119, 155	
高	11, 30, 36, 54, 71, 102, 104,	23.062
	107, 119, 155	

在低、中、高三种负荷水平下,OPF 以及 OTS-SCC 模型的运行成本如表 5 所示,分析得出:不同负荷水平下,通过网架优化既可以实现限制短路电流,又能够减小运行成本;当负荷水平较低时,网架优化对机组的经济出力影响很小;随着负荷水平的增加,网架优化对机组经济出力影响逐渐增大。这是因为电网资源充裕时,机组最优经济出力几乎不受网架的限制,如在最小负荷水平时,断开 10 条线

路后,只有 6 台机组出力发生了变化,即机组 11 和 39 出力分别增加了 46、26.8 MW,机组 20、21、27、28 出力分别减小了 30.3、29.4、6.5、6.6 MW,相应的发电成本仅降低了 0.06%;随着负荷水平的增加,部分输电线路发生阻塞,这时网络拓扑的改变会对机组出力产生很大的影响,通过网络拓扑的调整可以消除部分线路的阻塞,得到成本更低的机组出力组合,如最大负荷水平时,有 31 台机组出力发生了变化,其中成本较低的 11、27、39 号机组出力分别增加了 151、183.9、97.4 MW,相应的有 28 台机组出力不同程度的减小,发电成本下降了近 10%。

表 5 不同负荷水平下 OTS-SCC 模型的运行成本

负荷水平	成本/美元·h ⁻¹		成本减小量/%
	OPF	OTS-SCC	
低	75 578	755 33	0.06
中	103 454	103 031	0.41
高	151 580	136 699	9.82

5 结 论

本文针对电力系统中短路电流超标的问题,提出了通过网架调整来限制短路电流的网架优化模型,即计及短路电流限额约束的离散最优潮流模型。由于短路电流约束具有非凸非线性特征,本文进一步提出了一种基于阻抗灵敏度和断线近似成本估计的启发式算法来求解该模型。本文主要结论如下:

(1)断线近似成本估计方法可以有效地计算出断开线路造成成本变化的相对大小,可以应用于筛选断开线路;

(2)本文提出的模型可以充分考虑短路电流约束对系统最优潮流的影响,所提模型的求解结果表明合理断开线路可以有效地降低短路电流,保证电力系统的安全运行;

(3)本文采用 IEEE118 系统作为算例验证了算法的实用性和有效性,与商用求解器 GAMS 对比的结果表明,本文提出的启发式算法具有较高的求解效率,同时能有效避免陷入局部最优;

(4)算例结果表明,网架优化可将母线短路电流限制在允许的范围内,同时降低系统的运行成本,带来一定的经济效益。

参考文献:

[1] 孙奇珍,蔡泽祥,李爱民,等. 500 kV 电网短路电流超标机理及限制措施适应性 [J]. 电力系统自动化,

- 2009, 33(21): 92-96.
- SUN Qizhen, CAI Zexiang, LI Aimin, et al. A short-circuit current over-limited mechanism of 500 kV power system and the adaptability of limiting measures [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 92-96.
- [2] 郝文斌, 夏春, 王彪, 等. 一种基于图论搜索的限制短路电流分区方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 38-44.
- HAO Wenbin, XIA Chun, WANG Biao, et al. A short-circuit current limiting partitioning method based on graph theory search [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 38-44.
- [3] 艾琳, 冯艳虹, 陈为化, 等. 特高压接入京津冀北 500 kV 电网短路电流问题及限流措施研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 133-137.
- AI Lin, FENG Yanhong, CHEN Weihua, et al. Research on short-circuit current problem and limiting measures caused by UHV substation connecting to 500 kV network in Beijing-Tianjin Area and Northern Hebei [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 133-137.
- [4] HEDMAN K W, PANCIATICI P. Editorial: special section on harnessing flexible transmission assets for power system optimization [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1595-1596.
- [5] 杨知方, 钟海旺, 夏清, 等. 输电网结构优化问题研究综述和展望 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 426-434.
- YANG Zhifang, ZHONG Haiwang, XIA Qing, et al. Review and prospect of transmission topology optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 426-434.
- [6] NASROLAHPOUR E, GHASEMI H. Congestion management through rotor stress controlled optimal transmission switching [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(12): 1369-1376.
- [7] HAN J, PAPAVALIIOU A. The impacts of transmission topology control on the European electricity network [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 496-507.
- [8] HUANG G, WANG J H, CHEN C, et al. Integration of preventive and emergency responses for power grid resilience enhancement [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4451-4463.
- [9] 杨冬, 刘玉田, 牛新生. 电网结构对短路电流水平及受电能力的影响分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 62-67.
- YANG Dong, LIU Yutian, NIU Xinsheng. Analysis on influence of power grid structure upon short circuit level and power receiving capability [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 62-67.
- [10] 袁娟, 刘文颖, 董明齐, 等. 西北电网短路电流的限制措施 [J]. 电网技术, 2007, 31(10): 42-45.
- YUAN Juan, LIU Wenying, DONG Mingqi, et al. Application of measures limiting short circuit currents in northwest China power grid [J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 42-45.
- [11] 张永康, 蔡泽祥, 李爱民, 等. 限制 500 kV 电网短路电流的网架调整优化算法 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 34-39.
- ZHANG Yongkang, CAI Zexiang, LI Aimin, et al. An optimization algorithm for short-circuit current limitation of 500 kV power grid by adjusting power grid configuration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 34-39.
- [12] 黄根, 罗滇生, 李帅虎, 等. 基于综合灵敏度分析限流的最优断线措施 [J]. 电网技术, 2016, 40(1): 309-315.
- HUANG Gen, LUO Diansheng, LI Shuaihu, et al. Optimal line-outage measure based on comprehensive sensitivity analysis to limit short-circuit current [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 309-315.
- [13] 应林志, 刘天琪, 王建全, 等. 基于改进蚁群优化限制短路电流的网架调整措施 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 144-150.
- YING Linzhi, LIU Tianqi, WANG Jianquan, et al. Adjustment for power grid configuration to limit short-circuit current based on improved ant colony optimization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 144-150.
- [14] YANG Z F, ZHONG H W, XIA Q, et al. Optimal transmission switching with short-circuit current limitation constraints [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1278-1288.
- [15] LIU C, WANG J H, OSTROWSKI J. Heuristic pre-screening switchable branches in optimal transmission switching [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2289-2290.
- [16] 张思. 考虑短路电流的输电网优化规划 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 7-8.
- [17] 王锡凡. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 36-54.
- [18] 李光琦. 电力系统暂态分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 91-93.

(编辑 陶晴)