

限制 500 kV 电网短路电流的网架调整优化算法

张永康, 蔡泽祥, 李爱民, 徐 敏

(华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640)

摘要: 通过开断部分线路调整 500 kV 网架结构以增加超标站点之间的电气距离, 是限制 500 kV 电网短路电流的有效措施。对于开断线路的选择既要考虑短路电流的限制效果, 又要尽量保持 500 kV 网架的完整性, 如何从上千种断线组合中, 选取一种开断最少线路以最大限度限制超标站点短路电流的断线组合极为困难。文中通过分析开断线路对阻抗矩阵各元素的影响, 推导开断线路与超标站点自阻抗变化的灵敏度关系, 并以该灵敏度为指标提出了一种限制 500 kV 短路电流的网架调整优化算法。该算法通过求取超标站点自阻抗灵敏度加权和的最大值, 可以快速寻找限制超标点短路电流的最优断线组合, 避免了对所有断线组合逐一进行校核的繁琐过程。基于该算法提出的广东电网 500 kV 调整方案证明了其有效性。

关键词: 短路电流限制; 自阻抗灵敏度; 优化算法

中图分类号: TM732

0 引言

随着电力系统规模的不断扩大及大电网之间互联的实施, 500 kV 电网短路电流水平不断攀升, 已严重影响到电网的安全运行, 国内许多大电网相继出现了 500 kV 电网短路电流超标问题^[1-3]。以广东电网为例, 2008 年夏大典型方式下已有 6 个 500 kV 站点的三相短路电流超过 50 kA, 而超标最严重的增城站和北郊站的短路电流均高达 56 kA。在 500 kV 短路电流大范围超标的形势下, 对每个超标站点进行开关设备更换不但投资巨大, 而且难以实施。因此, 目前优先考虑采取调整网架结构的措施以限制 500 kV 电网的短路电流水平^[4-5]。

通过调整 500 kV 网架结构以适当减少网络的电气联系, 是降低短路电流水平行之有效的方法之一^[6-7]。目前, 网架调整的主要手段包括开断部分 500 kV 线路、采用高阻抗变压器和串联电抗器等, 其中开断线路简单易行且限制短路电流效果显著而被普遍采用^[8-9]。关于开断线路的选取, 既要考虑其短路电流的限制效果, 又要尽量保持 500 kV 网架的完整性。目前一般的做法是直接开断 500 kV 超标站点的若干回出线, 通过减少其短路电流注入支路以降低其短路电流。显然, 这种做法存在以下问题: ①实际电网中往往存在多个超标站点, 限制短路电流应从系统全局考虑, 而直接减少超标最严重站点的出线往往只能做到局部最优而非整体最

优^[10]; ②若对所有超标站点均采取断线措施, 不但浪费线路资源, 而且大大削弱了 500 kV 主网的完整性和系统的安全性。因此, 研究如何寻找一种最优断线组合, 使得在开断最少线路的前提下最大限度地限制超标站点的短路电流, 具有重要意义。

本文通过推导开断若干回线路对关注站点的自阻抗灵敏度公式, 提出以该灵敏度的加权和作为衡量断线方案的评价指标, 并以该指标为判据提出了一种限制 500 kV 短路电流的电网结构调整优化算法。

1 网架调整的灵敏度分析

1.1 开断线路对单一站点的灵敏度分析

从阻抗矩阵层面分析, 电网中开断线路, 相当于在原网络阻抗矩阵基础上减少连支, 会增大所有站点的自阻抗, 从而使所有站点的短路电流有不同程度的下降^[11]。对于开断某一线路后, 最为关注的是各超标站点的短路电流下降程度, 而非超标站点的短路电流下降程度可不必考虑。本文提出用自阻抗灵敏度作为计算指标, 以衡量开断线路后超标站点的自阻抗变化程度。下面推导电网开断 n 回线路时自阻抗灵敏度公式。

设原网络 N 的阻抗矩阵为 Z_N , 当开断节点 i 与 j 间的线路时, 相当于在网络节点 i 与 j 之间追加一连支 $-z_{ij}$, 其后阻抗矩阵变为与 Z_N 阶数相同的 Z_N' ^[8]。计算模型如图 1 所示。

设向新网络注入电流的列向量为:

$$I = [\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dots, \dot{I}_i, \dots, \dot{I}_j, \dots, \dot{I}_m]^T \quad (1)$$

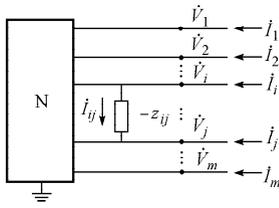


图 1 网络追加支路示意图

Fig. 1 Appending a branch in a network

新网络节点电压列向量为:

$$\mathbf{V} = [\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dots, \dot{V}_i, \dots, \dot{V}_j, \dots, \dot{V}_m]^T \quad (2)$$

则 \mathbf{Z}_N' 应满足以下关系:

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z}_N' \mathbf{I} \quad (3)$$

由图 1 不难看出,在这种情况下流入原网络 N 的节点电流应为:

$$\mathbf{I}' = [\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dots, \dot{I}_i - \dot{I}_{ij}, \dots, \dot{I}_j + \dot{I}_{ij}, \dots, \dot{I}_m]^T = \mathbf{I} - \mathbf{A}_M \dot{I}_{ij} \quad (4)$$

式中: \mathbf{A}_M 为一个与连支和原网络连接情况有关的列向量, $\mathbf{A}_M = [0, 0, \dots, 1, \dots, -1, \dots, 0]^T$ 。

由原网络节点方程可知:

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z}_N \mathbf{I}' = \mathbf{Z}_N \mathbf{I} - \mathbf{Z}_N \mathbf{A}_M \dot{I}_{ij} \quad (5)$$

令 $\mathbf{Z}_L = \mathbf{Z}_N \mathbf{A}_M$, 则知 \mathbf{Z}_L 为列矩阵:

$$\mathbf{Z}_L = [Z_{L1} - Z_{Lj}, Z_{L2} - Z_{Lj}, \dots, Z_{Li} - Z_{Lj}, \dots, Z_{Lj} - Z_{Lj}, \dots, Z_{Lm} - Z_{Lj}]^T$$

故式(5)可写为:

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z}_N \mathbf{I} - \mathbf{Z}_L \dot{I}_{ij} \quad (6)$$

节点 i 与 j 间的电压差可用下式表示:

$$\dot{V}_i - \dot{V}_j = -z_{ij} \dot{I}_{ij} = \mathbf{A}_M^T \mathbf{V} \quad (7)$$

式中: z_{ij} 为开断线路的线路阻抗。

将式(6)代入式(7)可得:

$$-z_{ij} \dot{I}_{ij} = \mathbf{A}_M^T \mathbf{Z}_N \mathbf{I} - \mathbf{A}_M^T \mathbf{Z}_L \dot{I}_{ij} \quad (8)$$

由式(8)即可解出 \dot{I}_{ij} :

$$\dot{I}_{ij} = \frac{\mathbf{Z}_L^T \mathbf{I}}{Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij} - z_{ij}} \quad (9)$$

式中: Z_{ii} 和 Z_{jj} 分别为开断节点 i 和 j 的自阻抗。

令 $Z_{LL} = Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij} - z_{ij}$ (Z_{ij} 为开断节点 i 与 j 的互阻抗), 并将式(9)代入式(7)得:

$$\mathbf{V} = \left(\mathbf{Z}_N - \frac{\mathbf{Z}_L \mathbf{Z}_L^T}{Z_{LL}} \right) \mathbf{I} \quad (10)$$

易得:

$$\mathbf{Z}_N' = \mathbf{Z}_N - \frac{\mathbf{Z}_L \mathbf{Z}_L^T}{Z_{LL}} \quad (11)$$

将式(11)展开, 即可得到新阻抗矩阵 \mathbf{Z}_N' 中各元素的计算公式:

$$Z_{kl}' = Z_{kl} - \frac{Z_{Lk} Z_{Ll}}{Z_{LL}} \quad k, l = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

因关注的是开断线路后阻抗矩阵对角线元素的灵敏度变化, 并以此衡量该断线措施的有效性, 于是可定义断开 1 回线路情况下的自阻抗灵敏系数为:

$$\eta = \frac{Z_{kk}' - Z_{kk}}{Z_{kk}} = -\frac{Z_{Lk} Z_{Lk}}{Z_{LL} Z_{kk}} \quad (13)$$

展开可得:

$$\eta = \frac{-(Z_{ki} - Z_{kj})^2}{(Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij} - z_{ij}) Z_{kk}} \quad (14)$$

式中: Z_{ki}, Z_{kj} 分别为开断节点 i, j 与关注节点 k 的互阻抗。

式(14)只能计算每次开断 1 回线路的自阻抗灵敏系数。在同时开断 n 回线路的情况下, 可将同时断开 n 回线路等效为开断 n 次、每次开断 1 回线路的物理过程。设原网络 N 的阻抗矩阵为 \mathbf{Z}_N , 开断第 1 回线路后的阻抗矩阵为 $\mathbf{Z}_N^{(1)}$, 在此基础上开断第 2 回线路后的阻抗矩阵为 $\mathbf{Z}_N^{(2)}, \dots$, 开断第 n 回线路后阻抗矩阵为 $\mathbf{Z}_N^{(n)}$, 由式(13)的定义可得:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta^{(1)} = \frac{Z_{kk}^{(1)} - Z_{kk}}{Z_{kk}} \\ \eta^{(2)} = \frac{Z_{kk}^{(2)} - Z_{kk}^{(1)}}{Z_{kk}^{(1)}} \\ \vdots \\ \eta^{(n)} = \frac{Z_{kk}^{(n)} - Z_{kk}^{(n-1)}}{Z_{kk}^{(n-1)}} \end{array} \right. \quad (15)$$

从而推得:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{kk}^{(1)} = (1 + \eta^{(1)}) Z_{kk} \\ Z_{kk}^{(2)} = (1 + \eta^{(2)}) Z_{kk}^{(1)} \\ \vdots \\ Z_{kk}^{(n)} = (1 + \eta^{(n)}) Z_{kk}^{(n-1)} \end{array} \right. \quad (16)$$

则开断第 n 回线路后 $\mathbf{Z}_N^{(n)}$ 的对角线元素为:

$$Z_{kk}^{(n)} = \prod_{j=1}^n (1 + \eta^{(j)}) Z_{kk} \quad (17)$$

由式(13)的定义可得, 同时开断 n 回线路的自阻抗灵敏系数为:

$$\eta = \frac{Z_{kk}^{(n)} - Z_{kk}}{Z_{kk}} = \frac{\prod_{j=1}^n (1 + \eta^{(j)}) Z_{kk} - Z_{kk}}{Z_{kk}} = \prod_{j=1}^n (1 + \eta^{(j)}) - 1 \quad (18)$$

这样, 通过式(14)求得每次开断 1 回线路的自阻抗灵敏系数, 代入式(18)即可求得同时开断 n 回线路的自阻抗灵敏系数。

1.2 开断线路对若干个站点的灵敏度分析

由式(13)的定义可知, 采取断线措施后, 对于某一超标站点而言, 自阻抗灵敏系数 η 越大, 表明该网架调整措施限制该站点的短路电流效果越好。但实

际电网通常关注的不仅是某一个超标点,而是考虑若干个超标站点的综合限制效果,即网架调整措施的采取要追求整体最优而非局部最优。故考虑某一网架调整措施对所有超标站点短路电流的限制效果时,可定义:

$$\eta = \sum_{k=1}^n \eta_k \quad (19)$$

式中: $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ 为 n 个超标站点的自阻抗灵敏系数。

式(19)表示 η 为各超标站点的自阻抗灵敏系数之和,该值越大,表明在该种网架调整方案下所有超标站点短路电流下降越多。

实际电网中,往往存在短路电流超标程度相差甚远的情况,若某一网架调整措施使得超标严重站点短路电流下降较少,而超标程度轻微的站点下降较多,这显然不是理想的短路电流限制方式。所以衡量某一网架调整措施的效果时,不但要考虑其短路电流下降总量的大小,还必须考虑不同超标程度站点的短路电流下降份额。在短路电流下降总量一定的情况下,最好的短路电流限制方式是超标严重的站点短路电流下降量较大,超标程度轻微的短路电流下降量较小。

为了考虑各超标站点超标程度不同的影响,在式(19)中引入权重系数 ϵ ,可得:

$$\eta_\epsilon = \sum_{k=1}^n \epsilon_k \eta_k \quad (20)$$

式中: ϵ 反映各站点短路电流的超标程度,

$$\epsilon = \frac{I}{I_b} - 1 \quad (21)$$

I 为超标站点的实际短路电流; I_b 为该站点开关的遮断电流。

这样重新定义的加权自阻抗灵敏系数 η_ϵ 具有双重意义,它不但能反映某一断线措施对所有超标站点的短路电流限制效果的灵敏度,而且计及了超标程度差异的影响。 η_ϵ 值越大,表明各超标站点的短路电流下降量越大,而且其超标严重的站点短路电流下降所占的比例也越多。

2 基于灵敏度分析的网架优化算法

2.1 优化思路

由 1.2 节的讨论可知,加权自阻抗灵敏系数 η_ϵ 能够反映某一网架调整措施对系统整体的短路电流限制效果, η_ϵ 可通过迭代求得,而且便于编程实现,故可考虑用遍历的方法求取所有断线组合下的 η_ϵ 值,通过寻找 η_ϵ 的最大值以寻求最优的网架调整方案,其一般步骤如下:

步骤 1:选取需进行线路开断的 k 个节点形成 k 阶阻抗矩阵 Z_N ,存储各开断节点的自阻抗及互阻抗。

步骤 2:形成线路关联矩阵 M ,该矩阵存储相关节点的网络拓扑信息及线路阻抗值 z_{ij} 。

步骤 3:设定断线回数 m ,根据网络阻抗矩阵 M 的信息形成开断 m 回线路时所有断线组合的集合 N 。

步骤 4:设定 n 个超标站点为关注站点,计算每个关注站点的权重系数 ϵ ;针对集合 N 中的每一种断线组合,利用式(11)迭代 m 次求得实施断线措施后的网络阻抗矩阵 Z_N' ,利用式(20)求得每一种断线组合下超标站点的加权自阻抗灵敏系数 η_ϵ 。选取 η_ϵ 最大的前几种断线组合并计算校核该组合下各超标站点的短路电流,若其中存在 1 种或多种断线组合使得各超标站点的短路电流下降到安全水平,将其列为可行断线方案;否则,增大断线回数 m ,并返回步骤 3。

步骤 5:对步骤 4 所得的可行断线方案进行 $n-1$ 热稳校核和暂稳安全性校核,若断线措施对系统安全性的影响在可以接受的范围内,则可认为该断线方案下的网架即为限制短路电流的最优网架;否则,增大断线回数 m ,并返回步骤 3。

通过以上方法,不必对庞大集合 N 中所有断线组合进行短路电流校核计算,只需通过简单的计算机编程,即可快速寻找到在开断最少线路的前提下最大限度地限制超标站点短路电流的网架调整方案。

2.2 优化过程

下面以 IEEE 3 机 9 节点为例,详述本文提出的网架调整优化算法的实施过程。为了更好地反映问题,特将原模型的单回联络线改为双回,增加的线路与原线路阻抗取相同值,其系统结果如图 2 所示。

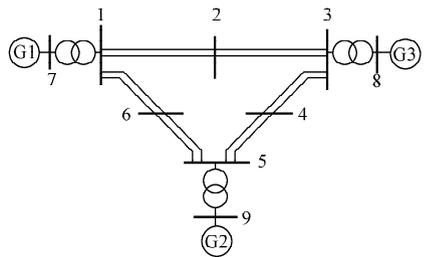


图 2 3 机 9 节点系统

Fig. 2 Three machines nine nodes system

由于节点 7,8,9 为机端母线,若在该节点采取断线措施则引起系统解列,这是一般电网运行中所不允许的,故本文只对节点 1~6 进行研究。设各节点的遮断电流均为 3.9 kA,其初始短路电流如表 1

所示。为了更能反映网架变化对短路电流的影响,下文所有短路电流结果不计及潮流和负荷的影响。

表 1 3 机 9 节点系统初始短路电流值
Table 1 Initial short-circuit current of three machines nine nodes system

节点	三相短路电流/kA	电流超标量/kA
1	4.517	0.617
2	3.358	
3	4.142	0.242
4	3.515	
5	3.989	0.089
6	3.400	

以下用本文提出的网架优化算法对上述系统进行网架调整,以限制其短路电流。

1)形成包含各开断节点自阻抗和互阻抗的阻抗矩阵 Z_N , Z_N 对角线元素依次为节点 1~6 的自阻抗,其结果如下:

$$Z_N = \begin{bmatrix} 28.15 & 23.25 & 14.19 & 14.58 & 14.90 & 23.46 \\ & 37.74 & 20.07 & 17.65 & 15.97 & 20.64 \\ & & 31.08 & 23.31 & 17.96 & 15.43 \\ & & & 35.91 & 26.39 & 18.57 \\ & & & & 32.48 & 20.88 \\ & & & & & 36.70 \end{bmatrix}$$

2)形成 M 。若节点 i 与 j 之间无相连线路,则 M_{ij} 为 0;否则 M_{ij} 的值为节点 i 与 j 相连线路的阻抗值。以上系统包含 6 个节点的 M 如下:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 24.33 & 0 & 0 & 0 & 22.48 \\ & 0 & 44.97 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0 & 26.67 & 0 & 0 \\ & & & 0 & 19.04 & 0 \\ & & & & 0 & 42.58 \\ & & & & & 0 \end{bmatrix}$$

3)为了尽可能保持网架的完整性,先设定断线回数 $m=1$,由于节点 1~6 的线路均为参数相同的双回线路,故断线组合有 6 种。

4)确定节点 1,3,5 为关注站点,求得 6 种断线组合下超标站点的 η_e ,并计算 η_e 值最大的前 3 种断线组合下各超标节点的短路电流,如表 2 所示。

表 2 $m=1$ 时,短路电流计算结果
Table 2 Result of short-circuit current when $m=1$

断线组合	短路电流/kA			下降总量/kA	η_e
	节点 1	节点 3	节点 5		
3-2 单回	4.327	3.940	3.815	0.566	0.011
5-6 单回	4.333	4.101	3.681	0.533	0.009
5-4 单回	4.422	3.983	3.740	0.503	0.007

从表 2 可知:

1)当采取 η_e 值最大的断线组合时,各关注节点的短路电流下降总量最大,同时,严重超标站点短路电流下降较多。可见,通过 η_e 值的大小来评判断线措施的效果具有合理性。

2)由于 η_e 值最大的前 3 种断线组合均不能将超标站点短路电流限制至安全水平,即可认为断线回数 $m=1$ 的所有断线组合均不符合要求,不必再对其进行计算校核。

增加断线回数,令 $m=2$,此时断线组合有 21 种,计算各种断线组合下的 η_e 值,并计算 η_e 值最大的前 5 种断线组合下各超标节点的短路电流,其结果如表 3 所示。

表 3 $m=2$ 时,短路电流计算结果
Table 3 Result of short-circuit current when $m=2$

断线组合	短路电流/kA			下降总量/kA	η_e
	节点 1	节点 3	节点 5		
1-2 双回	3.887	3.884	3.339	1.538	0.041
3-2 双回	3.853	3.909	3.427	1.459	0.041
1-6 双回	3.886	3.033	4.088	1.641	0.034
5-6 双回	3.847	3.109	4.113	1.579	0.034
5-4 双回	4.510	2.909	3.197	2.032	0.027

由表 3 可知,开断节点 1 与 2 间的双回线路,可将各超标节点的短路电流降至 3.9 kA 以下水平,而且其 η_e 最大。而其他 4 种 η_e 较大的断线组合也未能达到要求,可推知其他所有 η_e 较小的断线组合就更不可能达到要求,所以当断线回数 $m=2$ 时,只有开断节点 1 与 2 间的双回线路才能满足系统对限制短路电流的要求。至此,已经找到一种断线组合,通过开断最少线路以最大限度地限制超标站点短路电流,即可认为该方案下的网架为限制短路电流的最优网架。

3 广东电网 500 kV 网架调整方案

下面以广东电网 2008 年夏大方式全接线网架为算例,用本文提出的优化算法对广东电网 500 kV 主网进行网架调整以限制其短路电流。

广东电网 500 kV 已形成内外双环网结构,其负荷密集的内环站点短路电流严重超标,超标站点短路电流如表 4 所示。

文献[12]指出,在广东电网外环网已建成的条件下,可考虑在内环采取措施以限制短路电流。上述 6 个超标站点均分布于内环,只针对内环采取断线措施即可。根据上文的算法分别计算开断 1 回、2 回和 3 回线路所有断线组合下的 η_e ,并选取 η_e 最大的前 3 种断线组合,如表 5 所示。

表4 广东 500 kV 电网短路电流超标情况

Table 4 Superscalar of short circuit current of 500 kV substations in Guangdong power grid

超标站点	三相短路电流值/kA	电流超标量/kA
北郊	56.7	6.7
增城	56.7	6.7
鹏城	54.3	4.3
东莞	51.7	1.7
罗洞	51.4	1.4
深圳	51.4	1.4

表5 不同断线回数下 η_e 的最大值Table 5 Maximum of η_e in different numbers of transmission line disconnection

断线回数	断线组合数量	η_e 最大的前 3 种断线组合	η_e
1	16	增北 1 回	0.018
		罗北 1 回	0.012
		增横 1 回	0.011
2	135	增北 2 回	0.068
		罗北 2 回	0.053
		沙鹏 2 回	0.051
3	784	北增 2 回, 东莞线	0.096
		北增 2 回, 深鹏 1 回	0.079
		北增 1 回, 东莞线, 深鹏 1 回	0.070

利用 BPA 校核表 5 中的 9 种断线组合下 6 个超标站点的短路电流, 结果如表 6 所示。

表6 BPA 计算的短路电流结果

Table 6 Result of short-circuit current by BPA

开断线路	超标站点短路电流值/kA					
	北郊	增城	鹏城	东莞	罗洞	深圳
增北 1 回	53.41	53.40	53.95	51.26	50.06	51.13
罗北 1 回	54.09	55.65	54.19	51.38	47.07	51.29
增横 1 回	56.03	53.80	54.30	48.90	51.14	51.30
增北 2 回	46.10	46.10	53.01	50.07	46.69	50.39
罗北 2 回	46.66	52.25	53.79	50.28	36.75	50.90
沙鹏 2 回	56.26	54.92	40.11	49.43	51.37	42.64
北增 2 回, 东莞线	46.62	42.59	45.90	48.98	47.01	46.89
北增 2 回, 深鹏 1 回	47.03	45.40	49.06	49.54	45.34	47.07
北增 1 回, 深鹏 1 回, 东莞线	50.09	46.02	46.00	50.86	47.29	45.84

由表 6 可知, 开断北增 2 回、深鹏 1 回和开断北增 1 回、深鹏 1 回、东莞线这 2 种断线组合, 即可将各超标站点的短路电流限制至安全水平, 对于非超标站点, 采取断线措施后由于电气距离的增加使其短路电流也将有所下降。最后, 经过热稳和暂稳安全性校核, 后一种断线方案更有利于系统的安全和稳定, 即可认为其为限制短路电流的最优调整方案。

运用本文的方法可快速找到满足短路电流限制要求的断线组合, 避免了对所有断线组合进行逐一尝试和校核的繁琐过程。以广东电网为例, 在满足

负荷平衡约束条件下有 935 种断线组合, 利用本文算法只需计算校核其中 η_e 较大的 9 种断线组合下的短路电流, 就能从上述庞大的集合中快速找到合适的断线方案。可见, 利用 η_e 快速寻求最优断线组合以进行网架调整的优势非常明显。

4 结语

1) 本文所提出的网架调整优化算法, 只需一次性形成关注节点的阻抗矩阵, 即可通过编程快速求取最有可能限制超标点短路电流的网架调整措施, 避免了对所有断线组合逐一进行校核的繁琐过程。实际大电网的计算结果也验证了其有效性和优越性。

2) 通过该算法求得的最优网架调整方案, 既能将超标站点短路电流降至安全水平, 又保证了对网架进行调整的幅度最小, 即在限制短路电流的同时也保持了 500 kV 主网的完整性和可靠性。

参考文献

- [1] 袁娟, 刘文颖, 董明齐, 等. 西北电网短路电流的限制措施. 电网技术, 2007, 31(10): 42-45.
YUAN Juan, LIU Wenyong, DONG Mingqi, et al. Application of measures limiting short circuit currents in northwest china power grid. Power System Technology, 2007, 31(10): 42-45.
- [2] 周坚, 胡宏, 庄侃沁, 等. 华东 500 kV 电网短路电流分析及其限制措施探讨. 华东电力, 2006, 34(7): 55-59.
ZHOU Jian, HU Hong, ZHUANG Kanqin, et al. Short-circuit current of 500 kV East China power grid and its limitation. East China Electric Power, 2006, 34(7): 55-59.
- [3] 祝达康. 对调整上海 500 kV 规划网架及控制短路电流的思考. 华东电力, 2007, 35(1): 41-44.
ZHU Dakang. Considerations on Shanghai 500 kV grid plan modification and short-circuit current controlling. East China Electric Power, 2007, 35(1): 41-44.
- [4] ERKHAN F M. Factors affecting values of short-circuit current levels in electrical power engineering systems. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 8(6): 15-21.
- [5] 石晶, 邹积岩, 何俊佳, 等. 故障电流限制技术及研究进展. 电网技术, 1999, 23(12): 63-66.
SHI Jing, ZOU Jiyan, HE Junjia, et al. Development of fault current limiting technique and its progress. Power System Technology, 1999, 23(12): 63-66.
- [6] QUAlA S, TOSATO F. Power supply quality improvement by short circuit current limitation on distribution nets// Proceedings of the 12th IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control, February 15-17, 1993, Innsbruck, Austria.
- [7] 祁万春, 奚巍民, 张谦, 等. 应用 500 kV 高阻抗主变压器提高 220 kV 片区供电能力. 电力系统自动化, 2007, 32(14): 96-98.
QI Wanchun, XI Weimin, ZHANG Qian, et al. Improving power supply capability of 220 kV district grid using 500 kV main transformer with high short circuit impedance. Automation

- of Electric Power Systems, 2007, 32(14): 96-98.
- [8] 陆建忠,张啸虎. 加强电网规划,优化电网结构,限制短路电流. 华东电力,2005,33(5):7-10.
LU Jianzhong, ZHANG Xiaohu. Idea on grid planning for short-circuit current limitation. East China Electric Power, 2005, 33(5): 7-10.
- [9] 何肇. 关于改善华东电网结构、降低短路容量方案的探讨. 电网技术,2004,28(2):28-31.
HE Zhao. A discussion on scheme of improving structure of East China power grid to reduce short circuit capability. Power System Technology, 2004, 28(2): 28-31.
- [10] 叶幼君,鲍爱霞,程云志. 浙江 500 kV 电网短路电流的控制. 华东电力,2006,34(3):11-15.
YE Youjun, BAO Aixia, CHENG Yunzhi. Control of short-circuit current for Zhejiang 500 kV power grids. East China Electric Power, 2006, 34(3): 11-15.
- [11] 何仰赞,温增银. 电力系统分析. 武汉:华中科技大学出版社, 2001.
- [12] 陈旭. 关于建设坚强广东电网的若干建议. 电网技术,2004, 28(24):61-64.
CHEN Xu. Some suggestions on constructing strong Guangdong power network. Power System Technology, 2004, 28(24): 61-64.

张永康(1983—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统稳定与控制。E-mail: kpsheep12 @163.com

蔡泽祥(1960—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统继电保护、电力系统稳定分析与控制。

李爱民(1981—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统继电保护、电力系统稳定与控制。

An Optimization Algorithm for Short-circuit Current Limitation of 500 kV Power Grid by Adjusting Power Grid Configuration

ZHANG Yongkang, CAI Zexiang, LI Aimin, XU Min

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Breaking parts of transmission lines can increase the electric distance among over standard substations and it is an effective measure of limiting short-circuit current of 500 kV power grid. As regards the choices of breaking transmission lines, the restrictive effect of short-circuit current should be considered as well as the integrality of 500 kV power grid. Moreover, it is extremely difficult to seek a combination of breaking transmission lines from thousands of combinations, which can limit short-circuit current to the maximum by breaking the least transmission lines. By analyzing the influences of breaking transmission lines on elements of the impedance matrix, the relationship between breaking several transmission lines and the sensitivity of self-impedance of over standard substation is derived. Based on the sensitivity, an optimization algorithm for short-circuit current limitation of 500 kV power grid by adjusting power grid configuration is proposed. Through calculating the maximum value of weighted sum of the sensitivity, the optimal combination of breaking transmission lines can be rapidly sought by the optimization algorithm. Accordingly, it will avoid the tedious process of checking all the combinations of breaking transmission lines one by one. The effectiveness of the proposed algorithm is verified by the adjustment scheme of 500 kV power grid in Guangdong Province.

Key words: short-circuit current limitation; sensitivity of self-impedance; optimization algorithm