

# 基于 WARD 等值的电网限流运行方式优化方法

楼霞薇<sup>1</sup>, 王威<sup>2</sup>, 王波<sup>2</sup>, 贺旭<sup>2</sup>, 何宇<sup>2</sup>, 鲍威<sup>3</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网浙江宁波供电公司, 浙江 宁波 315016;  
3. 杭州沃瑞电力科技有限公司, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 控制短路电流水平, 保证断路器安全是电网运行方式安排的重要任务。线路开断及母线分裂以增大变电站母线与电源之间的电气距离是限制电网短路电流水平的有效措施, 但同时也可能引起电网运行可靠性水平的降低。首先根据对网络拓扑结构的分析及线路开断前后超标站点的短路电流变化确定可开断支路集; 然后添加功率平衡方程约束、支路潮流约束以及  $N-1$  安全约束; 以开断线路数最少为目标, 提出了控制短路电流水平的电网运行方式优化模型, 并借助 WARD 等值缩小模型规模, 提高了模型的求解效率。所提模型为混合整数线性规划模型, 可以采用线性规划单纯形法及分支定界法迅速求解。使用 C++ 编写了仿真程序, 通过对 IEEE39 节点系统和某实际电网的仿真分析验证了所提模型的正确性和算法的有效性。

**关键词:** WARD 等值; 短路电流; 遮断容量; 运行方式优化; MILP

## A grid operation mode optimization method for controlling short-circuit current level based on WARD equivalence

LOU Xiawei<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>, WANG Bo<sup>2</sup>, HE Xu<sup>2</sup>, HE Yu<sup>2</sup>, BAO Wei<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. State Grid Zhejiang Ningbo Power Supply Company, Ningbo 315016, China; 3. Hangzhou WR Power Science & Technology Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** An important target of operation mode planning for power grid is to control short-circuit current level so as to guarantee the security of the circuit breaker. Effective measures like circuit opening and bus splitting will enlarge the electrical distance between buses in substations and power plants, in spite of reducing operation reliability of power grid. This paper proposes an optimization model of operation mode planning for power grid. The objective is to minimize the numbers and breaking capacity of opened circuits. The constraints are short-circuit current limits calculated by node-voltage method, network connectivity limits formulated by DC power flow equations, branch power flow constraints and  $N-1$  security constraints. Taking the least number of breaking circuits as target, a power grid operation mode optimization model to control the short-circuit current level is proposed. WARD equivalence is used to narrow the size of the model and improve the calculation efficiency of the optimization model. The model describes a mixed integer linear programming problem, therefore can be solved by linear programming simplex method and branch and bound method. Simulation program written in C++ is applied to instances of IEEE 39-bus system and an actual power grid. The optimized results confirm the correctness of the proposed model and validity of the algorithm.

**Key words:** WARD equivalence; short-circuit current; breaking capacity; optimization of operation mode; MILP

## 0 引言

随着国民经济的持续快速发展, 电力系统的负荷不断增长, 为了保证供电的安全性和可靠性, 电网结构逐渐增强, 电源项目不断投入。逐渐增强的电网结构中环网增多, 缩短了变电所之间的电气距离, 从而使短路电流水平提升; 负荷的增长需要电源项目的不断投入, 而综合考虑电厂建设用地的紧张以及有效利用能源多方面, 就出现了发电机单机

容量增大, 单个发电厂机组数目增多, 或者几个发电厂集中一带建设形成发电厂群的现象, 都直接引起电网短路电流的增大。近年来, 短路电流增大的趋势越来越严重, 已成为电力系统规划和运行方式安排时需要考虑的主要问题<sup>[1-2]</sup>。

随着电源建设的加快和区域电网的互联, 电力系统规模迅速扩大, 短路容量随之增大, 部分变电站母线的短路电流水平已接近甚至超过了断路器的开断能力<sup>[3]</sup>。短路电流超标是电网安全运行的严重

隐患, 万一断路器不能灭弧, 将引起爆炸, 并可能引发系统性事故, 严重威胁电气设备及电网的安全运行。在目前断路器开断能力和短路限流技术仍难以取得突破性进展的情况下, 改变电网的运行结构是控制短路电流的重要手段。采取有效的措施限制电网短路电流水平迫在眉睫<sup>[4-5]</sup>。

目前常用的限流措施主要有线路开断、母线分裂运行、加装故障电流限制器、采用高阻抗变压器等<sup>[6-8]</sup>。但后两项受到技术上的限制, 且投资较高, 还会对继电保护带来较大影响; 且对于同一支路而言, 采用支路开断的限流效果最优, 并且操作方便、成本低, 应优先考虑<sup>[9-10]</sup>。但线路开断可能导致电网的可靠性水平降低, 不合理的线路开断方案甚至可能会破坏网架的连通性, 因此应尽量减少开断线路的数目, 保持网架的完整性。由于电网中往往存在多个短路电流超标站点, 要找到综合考虑各个站点限流效果的最优断线策略并非易事。文献[11]采用自阻抗灵敏度系数对限流效果进行评价, 可以找到开断较少线路且有效控制短路电流水平的断线组合, 但采用隐枚举法, 计算量大且解的最优性难以得到有效保证, 应用范围受到限制。文献[12]以快速电压稳定指标作为几种可行措施的选择依据, 采用的也是枚举算法, 断线策略的给出严重依赖运行人员的经验。

本文提出了一种控制短路电流水平的电网运行方式优化方法, 其核心是建立数学规划模型并寻求最优解, 但考虑到实际工程问题的复杂性与优化模型规模的庞大性, 本文方法在建模前、建模时采取了多种预处理及等值技术。本文方法首先通过预处理步骤确定优化目标及控制变量; 进而基于节点电压法建立混合整数线性规划模型(Mixed Integer Linear Programming, MILP)描述优化问题, 以支路开断数最少为优化目标, 考虑了正常电网运行约束、短路故障点电流限额约束及设备  $N-1$  下的电网安全运行约束; 借助电网结构 WARD 等值处理大幅缩减了数学规划模型规模, 可采用线性规划单纯形法结合分支定界法进行求解。图 1 展示了本文方法的流程示意图。

本文结构如下: 第一章分小节介绍了生成短路电流超标节点集、生成可开断支路集以及筛选有效预想故障集 3 方面预处理方法; 第二章介绍了优化问题建模及建模时使用的电网 WARD 等值处理方法, 由于 MILP 优化问题的求解方法已十分成熟, 本文不再赘述; 第三章算例分析中对 IEEE39 节点系统与某实际电网进行了电网限流运行方式优化, 对模型的有效性进行了仿真验证。

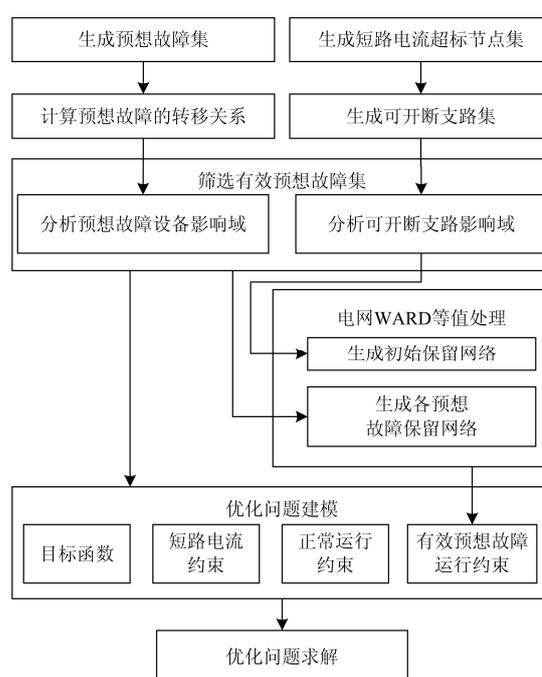


图 1 电网限流运行方式优化方法流程示意图

Fig. 1 Flow chart of grid operation mode optimization for reducing short-circuit current

## 1 电网限流优化预处理

### 1.1 确定短路故障电流超标节点集

线路电网限流运行方式优化的最终目的是降低部分节点的短路故障电流, 因此首先对电网方式进行节点短路故障扫描, 计算出所有节点故障的故障点短路电流。对于任意一个故障时短路电流超标的节点  $f$ , 将其归入短路故障电流超标节点集  $N_F$ 。本文方法的优化目标即以最少的支路开断操作降低  $N_F$  中节点的短路故障电流, 使之不再超标。

### 1.2 确定可开断支路集

线路开断的限流效果是明显的, 但同时也会给电网运行带来负面影响<sup>[13-14]</sup>, 主要有以下 3 个方面: 1) 线路开断会造成原有设备投资的浪费而增加间接成本, 降低电网运行的经济效益; 2) 原来流过该线路的功率将转移到邻近的线路中, 加重相关线路的功率传输负担, 使得一些线路的实际传输功率接近热稳定极限; 3) 线路开断将削弱电网结构, 甚至会破坏网架的完整性。因此必须先确定合理的可开断支路集, 一方面能够提高短路电流水平控制的针对性; 另一方面还能提高方案的可行性, 避免不合理的线路开断方案; 最后还大大减少了优化模型的控制变量数。

#### 1) 可开断支路的筛选

实际输电网中, 各厂站一般通过多条线路与多



$$z_p = -z_{L,k}^0 \quad (2)$$

利用支路追加法计算修正后的节点阻抗矩阵, 其对角元素  $Z_{ff}$  的表达式如式(3)所示。

$$Z_{ff} = -z_{ii}^0 \frac{(z_{if}^0 - z_{jf}^0)^2}{z_{ii}^0 + z_{jj}^0 - 2z_{ij}^0 + z_p} + z_{ff}^0 \quad (3)$$

式中:  $z_{ii}^0$ 、 $z_{jj}^0$ 、 $z_{if}^0$ 、 $z_{jf}^0$ 、 $z_{ij}^0$ 、 $z_{ff}^0$  分别为第  $k$  条支路开断前, 节点阻抗矩阵的对应元素,  $i$ 、 $j$ 、 $f$  分别表示被开断支路两端节点及短路节点;  $z_{L,k}^0$  为被开断支路的阻抗值。

根据式(1), 对超标站点  $f$ , 开断第  $k$  条线路的短路电流变化量为

$$\Delta I_{fk} = \frac{1}{z_{ff}} - \frac{1}{z_{ff}^0} = \frac{1}{\frac{D_2}{D_1 - z_{L,k}^0} + z_{ff}^0} - \frac{1}{z_{ff}^0} \quad (4)$$

$$D_1 = z_{ii}^0 + z_{jj}^0 - 2z_{ij}^0$$

$$D_2 = -(z_{if}^0 - z_{jf}^0)^2$$

则可计算开断电网中任意一条线路时超标站点  $f$  的短路电流变化量, 得到向量:  $\Delta I_f = [\Delta I_{f1}, \Delta I_{f2}, \dots, \Delta I_{fb}]^T$ 。其中,  $b$  为电网可开断支路数。从  $\Delta I_{fb}$  为负数且对应支路电压等级等于或低于超标站点  $f$  的值中选出绝对值最大的前  $N_s$  个值, 对应的线路就组成了  $f$  节点的候选断线支路集  $S_f$ 。若符合要求的线路数小于  $N_s$ , 则后面几条候选支路均采用最后一条符合条件的线路。针对所有短路电流超标节点进行上述分析, 合并重复的支路, 便得到最终的候选断线支路集  $S_C$ 。

### 3) 有效预想故障集的筛选

运方人员使用的典型方式通常都通过了  $N-1$  校核, 即对预想故障集中任何一个开断, 电网都能保持安全运行。但由于优化后的电网结构发生了变化 (对部分可开断支路进行了开断), 所以需要添加约束条件保证优化后的方式仍然能够通过  $N-1$  校核, 然而对每一个预想故障都添加一组关于全网安全运行的约束是不可接受的, 因此需要进行有效预想故障集的筛选。

当预想开断发生时, 电网中各设备的有功潮流将重新分布, 开断设备的有功潮流将通过其它支路进行传输, 一些线路中将出现相当大的有功潮流增量。线路开断的影响域即指对应线路开断后, 支路中有功潮流发生较大变化的那些线路或主变, 每一个预想开断故障都对应一个影响域。引入转移系数如式(5)所示。

$$W_{vt} = \left| \frac{P_t^{(v)} - P_t^{(0)}}{P_v^{(0)}} \right| \quad (5)$$

式中:  $W_{vt}$  表示设备  $v$  开断对设备  $t$  的转移系数;  $P_t^{(v)}$  表示设备  $v$  开断后, 设备  $t$  的有功潮流;  $P_t^{(0)}$ 、 $P_v^{(0)}$  分别表示设备  $t$ 、 $v$  的开断前有功潮流。对于开断设备  $v$  的情况, 当转移系数大于阈值  $\varepsilon$  时, 对应的设备  $t$  即属于设备  $v$  的影响域  $E_v$ 。实际电网运行的设备功率裕度一般大于 10%, 本文转移系数阈值  $\varepsilon$  取为 3%, 由此得到的设备  $v$  的影响域基本包含了所有设备  $v$  开断后可能出现功率越限的设备。

借鉴文献[17]的方法, 首先对可开断支路进行影响域分析; 再对预想故障集中所有开断进行影响域分析; 将影响域与可开断支路影响域有重叠的预想开断保留在预想故障集中, 将影响域与可开断支路影响域无任何重叠的预想开断剔除出预想故障集; 最终筛选得到有效预想故障集。在优化中, 有效预想故障集与使用完整预想故障集是等效的, 文献[17]对该方法的正确性与有效性进行了论述。

## 2 电网限流优化模型

### 2.1 目标函数

本文从减小线路开断对电网运行的负面影响出发, 确定模型的目标函数如式(6)所示, 为开断的线路数最少。

$$\min \sum_{ij \in S_C} O_{ij} \quad (6)$$

式中:  $ij$  表示首末端节点序号分别是  $i$ 、 $j$  的线路;  $O_{ij}$  表示线路  $ij$  的开闭状态, 其中  $O_{ij}=1$  表示线路开断,  $O_{ij}=0$  表示线路闭合;  $S_C$  为候选开断支路集。

### 2.2 约束条件

线路开断的数目能够大致体现间接成本的大小、剩余设备的功率传输负担以及对电网结构的削弱程度, 而限流效果及电网运行安全性及可靠性的保证则通过约束条件体现。

#### 1) 短路故障时的安全约束

##### (1) 短路节点的短路电流限值约束

对短路电流超标节点集  $N_F$  中的每一个超标节点添加短路电流约束。

$$\sum_{ij \in S_C} y_{ij} (V_j^{(f)} - V_f^{(f)}) + \sum_{ij \in S_C} I_{ij}^{(f)} + (E_g'' - V_f^{(f)}) y_g'' \leq I_{f\max}, f \in N_F \quad (7)$$

$$I_{ij}^{(f)} = (1 - O_{ij}) y_{ij} (V_j^{(f)} - V_i^{(f)}), ij \in S_C, f \in N_F \quad (8)$$

$$V_i^{(i)} = 0, i \in N_F \quad (9)$$

式中:  $V_j^{(f)}$  为节点  $f$  短路时节点  $j$  的电压;  $y_{ij}$  为支路  $i, j$  的等值导纳; 节点  $f$  短路时,  $I_{ij}^{(f)}$  为可开断线支路  $i, j$  上流向节点  $f$  的电流;  $I_{f \max}$  为节点  $f$  的短路故障电流限值;  $(E_g'' - V_f^{(f)})y_g''$  表示当节点  $f$  上连接有发电机时, 发电机的注入电流。  $E_g'', y_g''$  表示与节点  $f$  相连的第  $g$  台发电机的次暂态电势和次暂态导纳。为了防止某些超标节点的短路电流无法达标造成的优化失败, 对式(7)引入松弛变量  $I_{sf}$ , 表示节点  $f$  短路电流与限值之间的裕度量,  $I_{sf}$  越大表示限流效果越好,  $I_{sf}$  为负说明短路电流仍然超标, 则有:

$$\sum_{fj \in S_C} y_{ij} (V_j^{(f)} - V_f^{(f)}) + \sum_{fj \in S_C} I_{ij}^{(f)} + (E_g'' - V_f^{(f)})y_g'' + I_{sf} = I_{f \max}, f \in N_F \quad (10)$$

(2) 非短路节点的节点电流平衡方程约束

$$\sum_{ij \in S_C} y_{ij} (V_j^{(f)} - V_i^{(f)}) + \sum_{ij \in S_C} I_{ij}^{(f)} + (E_g'' - V_i^{(f)})y_g'' = 0, f \in N_F \quad (11)$$

$$I_{ij}^{(f)} = (1 - O_{ij})y_{ij} (V_j^{(f)} - V_i^{(f)}), ij \in S_C, f \in N_F \quad (12)$$

式中变量意义与短路节点约束式中变量意义相同。

(3) 目标函数修正

在目标函数中考虑断线措施的限流效果, 将式(6)修正为如式(13)表达式。

$$\min \sum_{ij \in S_C} O_{ij} - \alpha_s \sum_{i \in N_F} I_{sf} \quad (13)$$

式中,  $\alpha_s$  是一个常数, 一般取某一较小值, 保证目标函数中第二项的值小于 1, 以保证第一项开断线路数最少这个优先优化目标, 文献[18]对该方法的正确性给出了严格的证明。以式(13)作为目标函数可以在减少线路开断措施成本的同时, 提高节点短路电流与限值之间的裕度量, 从而在开断线路数相同的断线组合中找出限流效果最好的方案。

(4) 线性化处理

式(8)、式(12)是非线性的, 需要利用  $O_{ij}$  的 0-1 变量特性, 引入以下一组等价的不等式约束进行线性化处理。

$$\begin{cases} (O_{ij} - 1)M_{ij} \leq I_{ij}^{(f)} \leq (1 - O_{ij})M_{ij} \\ -O_{ij}M_{ij} \leq I_{ij}^{(f)} - y_{ij}V_j^{(f)} \leq O_{ij}M_{ij} \\ ij \in S_C, f \in N_F \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $M_{ij}$  为足够大的正数, 保证仅在不等式中上下限为 0 时产生约束; 用于式(8)时, 节点即为短路

节点  $f$ 。

2) 电网正常运行时的安全约束

(1) 支路潮流约束

线路开断会引起电网有功潮流的重新分布, 剩余线路中流经的有功功率将发生较大的变化, 因此需要重新考察线路有功功率是否越限, 根据直流潮流模型<sup>[18]</sup>有

$$-P_{ij \max} \leq p_{ij} = \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}} \leq P_{ij \max}, \forall ij \notin S_C \quad (15)$$

式中:  $p_{ij}$  表示支路  $i, j$  上流经的有功功率;  $\theta_i, \theta_j$  表示节点  $i, j$  的电压相角;  $x_{ij}$  为线路的等效电抗;

$P_{ij \max}$  为线路  $i, j$  的长期允许载流量。

(2) 电网结构连通性约束

$$P_{Gi} - \sum_{ij \in T_{ij}} p_{ij} - P_{Li} = 0, \forall i \in N \quad (16)$$

$$p_{ij} = \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}}, \forall ij \notin S_C \quad (17)$$

$$P_{ij \max} (O_{ij} - 1) \leq p_{ij} \leq P_{ij \max} (1 - O_{ij}), \forall ij \in S_C \quad (18)$$

$$-MO_{ij} \leq p_{ij} - \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}} \leq MO_{ij}, \forall ij \in S_C \quad (19)$$

式中:  $T_{ij}$  表示与节点  $i$  相连的支路集;  $P_{Gi}$  表示节点  $i$  上机组发出的有功功率;  $P_{Li}$  表示节点  $i$  上负荷消耗的有功功率;  $M$  为足够大的正数, 其他变量的意义参照上文。

3) N-1 安全约束

(1) WARD 等值处理

1.3 节有效缩减了需要考虑的预想故障集, 但仍然需要对大量无故障方式微调后的电网方式进行建模, 因此本文使用 WARD 等值方法, 对有效预想故障集中每一个预想开断下的电网结构在数学建模前进行等值, 缩减模型规模。

对于实际电网, 短路电流水平过高的站点往往集中在少数的几个区域, 而节点电压方程、功率平衡方程等均涉及全网的变量和约束。通过 WARD 等值可以减少模型的变量数和约束数。

图 5 描述了一个 2 区域互联系统 WARD 等值前后的网络变化情况。其中内网为电网分析所关注的区域, 外网为待等值的区域, 两个区域通过内网边界节点  $B_i \cdots B_j$  以及外网边界节点  $B_m \cdots B_n$  相连。

WARD 等值后, 外网对内网的作用通过边界节点等值注入电流(或者等值注入有功功率)以及边界节点等值对地支路、边界节点间等值支路体现。消去外网节点, 等值前后网络的变化体现在边界节点上的支路参数及注入电流(或者等值注入有功功率)的变化。

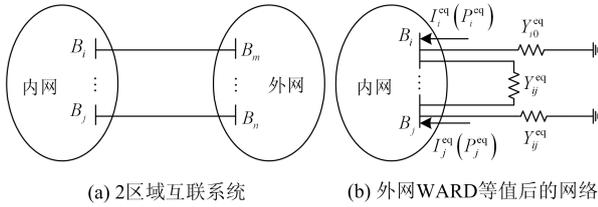


图 5 区域互联系统 WARD 等值原理示意图

Fig. 5 WARD equivalence diagram of area interconnected system

记保留节点(即针对其进行计算分析的内部节点)对应的分块初始导纳矩阵为  $\mathbf{Y}_{\text{II}}^{(0)}$ ; 记待消去节点(即外部节点)对应的初始分块导纳矩阵为  $\mathbf{Y}_{\text{EE}}^{(0)}$ ; 内部节点与外部节点之间的初始导纳矩阵为  $\mathbf{Y}_{\text{IE}}^{(0)}$ 。节点编号采用先外部节点, 后内部节点的顺序, 则 Ward 等值前待分析的电力系统可以用如下方程组表示。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{\text{EE}}^{(0)} & \mathbf{Y}_{\text{EI}}^{(0)} \\ \mathbf{Y}_{\text{IE}}^{(0)} & \mathbf{Y}_{\text{II}}^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{\text{E}} \\ \mathbf{V}_{\text{I}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\text{E}}^{(0)} \\ \mathbf{I}_{\text{I}}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (20)$$

消去外部节点, 用内部节点参数和变量表示外部节点电压变量  $\mathbf{V}_{\text{E}} = \mathbf{Y}_{\text{EE}}^{(0)-1}(\mathbf{I}_{\text{E}}^{(0)} - \mathbf{Y}_{\text{EI}}^{(0)})\mathbf{V}_{\text{I}}$ , 得到 WARD 等值后的线性方程组。

$$\mathbf{Y}_{\text{II}}\mathbf{V}_{\text{I}} = \mathbf{I}_{\text{I}} \quad (21)$$

式中:  $\mathbf{Y}_{\text{II}} = \mathbf{Y}_{\text{II}}^{(0)} - \mathbf{Y}_{\text{IE}}^{(0)}\mathbf{Y}_{\text{EE}}^{(0)-1}\mathbf{Y}_{\text{EI}}^{(0)}$ ;  $\mathbf{I}_{\text{I}} = \mathbf{I}_{\text{I}}^{(0)} - \mathbf{Y}_{\text{IE}}^{(0)}\mathbf{Y}_{\text{EE}}^{(0)-1}\mathbf{I}_{\text{E}}^{(0)} = \mathbf{I}_{\text{I}}^{(0)} + \mathbf{I}_{\text{I}}^{\text{eq}}$ , 表示等值后的节点导纳矩阵和注入电流向量。

对于功率约束采用同样的处理方式, 根据直流潮流模型, WARD 等值前待分析的电力系统可以用如下方程组表示。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}_{\text{EE}}^{(0)} & \mathbf{B}_{\text{EI}}^{(0)} \\ \mathbf{B}_{\text{IE}}^{(0)} & \mathbf{B}_{\text{II}}^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}_{\text{E}} \\ \boldsymbol{\theta}_{\text{I}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{E}}^{(0)} \\ \mathbf{P}_{\text{I}}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中:  $\mathbf{B}$  表示对应的电纳矩阵;  $\boldsymbol{\theta}$  表示节点相角向量;  $\mathbf{P}$  表示节点注入功率向量。WARD 等值后得到新方程组如下:

$$\mathbf{B}_{\text{II}}\boldsymbol{\theta}_{\text{I}} = \mathbf{P}_{\text{I}} \quad (23)$$

式中:  $\mathbf{B}_{\text{II}} = \mathbf{B}_{\text{II}}^{(0)} - \mathbf{B}_{\text{IE}}^{(0)}\mathbf{B}_{\text{EE}}^{(0)-1}\mathbf{B}_{\text{EI}}^{(0)}$ ;  $\mathbf{P}_{\text{I}} = \mathbf{P}_{\text{I}}^{(0)} - \mathbf{B}_{\text{IE}}^{(0)}\mathbf{B}_{\text{EE}}^{(0)-1}\mathbf{P}_{\text{E}}^{(0)} = \mathbf{P}_{\text{I}}^{(0)} + \mathbf{P}_{\text{I}}^{\text{eq}}$ , 分别表示等值后的节点电纳矩阵和注入有功功率向量。 $\mathbf{B}_{\text{II}}^{(0)}$ 、 $\mathbf{B}_{\text{IE}}^{(0)}$ 、 $\mathbf{B}_{\text{EE}}^{(0)}$  分别表示等值前对应的分块导纳矩阵,  $\mathbf{P}_{\text{I}}^{(0)}$  表示等值前内部节点的注入有功功率。上述式(21)、式(23)即为图 3 中 WARD 等值原理的数学表述。

## (2) WARD 等值的应用

使用 WARD 等值处理缩小优化模型的规模, 其关键在于电网等值范围的确定以及电网等值参数的

推导, 流程如下:

① 根据 1.1 与 1.2 节中确定的  $N_{\text{F}}$  与  $S_{\text{C}}$ , 借鉴文献[17]的方法分析获得其对应的影响域, 将短路电流超标节点、可开断支路相连节点与节点间的支路作为初始保留网络。

② 遍历 1.3 节中确定的有效预想故障集, 分析当前预想开断的影响域, 将预想开断设备及其影响域作为预想开断保留网络。

③ 合并初始保留网络与预想开断保留网络, 作为优化建模时的等值电网, 认为电网其余部分不会在当前预想开断下发生任何越限。

④ 对电网其余部分进行 WARD 等值: 根据式(19)一式(22)求得等值电网的参数

⑤ 根据下一小节方法, 添加安全约束。

⑥ 回到步骤二继续遍历有效预想故障集; 若已遍历结束, 则优化建模完成。

## (3) 安全约束建模

假设有效预想故障集为  $\mathcal{V}$ , 对  $\mathcal{V}$  中的任意开断分别添加以下约束方程。

① 全网节点功率平衡方程

$$\sum_{ij \in \mathcal{T}_{ij}} p_{ij}^{(v)} + P_{\text{Gi}} - P_{\text{Li}} = 0, \quad \forall i \quad (24)$$

② 可开断支路潮流方程及支路限额约束方程

$$(O_{ij} - 1)\bar{P}_{ij\text{max}} \leq p_{ij}^{(v)} \leq (1 - O_{ij})\bar{P}_{ij\text{max}}, \quad \forall ij \in S_{\text{C}} \quad (25)$$

$$-O_{ij}M \leq p_{ij}^{(v)} - \frac{\theta_i^{(v)} - \theta_j^{(v)}}{x_{ij}} \leq O_{ij}M, \quad \forall ij \in S_{\text{C}} \quad (26)$$

③ 非影响域支路潮流方程

$$p_{ij}^{(v)} = \frac{\theta_i^{(v)} - \theta_j^{(v)}}{x_{ij}}, \quad \forall ij \notin S_{\text{C}} \cap ij \neq v \cap ij \notin E_{\text{v}} \quad (27)$$

④ 影响域支路潮流方程及支路限额约束方程

$$\begin{cases} -\bar{P}_{ij\text{max}} \leq p_{ij}^{(v)} = \frac{\theta_i^{(v)} - \theta_j^{(v)}}{x_{ij}} \leq \bar{P}_{ij\text{max}} \\ \forall ij \notin S_{\text{C}} \cap ij \neq v \cap ij \in E_{\text{v}} \end{cases} \quad (28)$$

式中:  $v$  表示预想故障编号;  $p_{ij}^{(v)}$ 、 $\theta_i^{(v)}$ 、 $\theta_j^{(v)}$  分别表示预想故障  $v$  开断情况下的支路功率与节点相角;  $\bar{P}_{ij\text{max}}$  表示线路  $i, j$  的短时允许载流量, 其数值通常比长期允许载流量大  $P_{ij\text{max}}$ ;  $M$  表示一个足够大的正数; 其他变量的意义参照上文。

## 3 算例分析

本文的算例仿真分析平台为一台主频为 2.6 GHz 的双核 DELL 一体机, 内存为 8 GB。首先对 IEEE39 节点系统进行电网限流运行方式优化,

验证本文算法的有效性与正确性；进而对实际电网进行了优化，体现了本文算法的实用性与鲁棒性。由于发电厂广泛采用发变组接线，发电机节点短路的概率较小，所以在本文算例中不考虑发电机节点的短路电流超标情况。 $N_s$  值取电网节点最大的度，这样既能包含所有限流效果显著的支路，又不至于使模型求解规模过大而影响优化效率。使用线性规划单纯形法及分支定界法在较短时间内即可求得最优解。

### 3.1 IEEE39 节点系统算例分析

IEEE39 节点系统包含 10 台发电机，12 台变压器，34 条普通支路。取短路电流限值为 70(标么值)，则节点 2 和节点 16 为短路电流超标节点。经求解只需开断线路 2-3，即可有效限制短路电流。限流效果如表 1 所示。

表 1 支路开断前后超标节点的短路电流(1)

Table 1 Short-circuit currents comparison before and after branch removal of the limitation-surpassing buses (1)

$f$	$S_f$	$\bar{I}_f$ /p.u.	$I_f^0$ /p.u.	$I_f$ /p.u.
2	3,4,1,2,21	70	74.967	57.06
16	21,19,20,25,6	70	73.979	67.69

算例求解共耗时 0.56 s。由此证明了本文所建模型在控制短路电流水平上的有效性及在求解速度上的优势。

将支路 26-27 的容量由 600 MW 调整至 500 MW，重新进行线路开断优化计算，算例求解耗时 0.59 s，优化结果为开断线路 4-5，优化效果如表 2 所示。

表 2 支路开断前后超标节点的短路电流(2)

Table 2 Short-circuit currents comparison before and after branch removal of the limitation-surpassing buses (2)

$f$	$\bar{I}_f$ /p.u.	$I_f^0$ /p.u.	$I_f$ /p.u.
2	72.5	72.85	70.9688
16	72.5	73.74	72.0651

该算例体现了电网结构及  $N-1$  安全约束。对于 IEEE39 节点系统，只允许开断 1 条线路，否则电网可靠性无法达到要求；另一方面，由于支路 26-27 的容量较小，在开断支路 2-3 的情况下，再开断其他支路，支路 26-27 的功率将越限，如表 3 所示。

### 3.2 实际算例分析

为进一步检验建立的线路开断优化模型及其求解方法在实际大规模电网中的应用的有效性，本文分析某实际电网运行方式下的短路电流超标状况及对应的线路开断方案。算例数据包括四省一市的电网数据，共包含 5527 个拓扑节点，8363 条支路，1085

个电源。根据开关的实际开断能力，220 kV 电压等级的开关短路电流限值取为 50 kA，500 kV 的短路电流限值取为 63 kA，对每一个短路电流超标站点选出 5 条候选断线支路，该电网短路电流超标站点及对应的候选开断线路如表 4 所示。

表 3 开断支路 2-3 部分预想开断下支路 26-27 有功功率

Table 3 Active power flow of branch 26-27 under expected faults when branch 2-3 is opened

预想开断	支路 26-27 有功功率/MW	支路 26-27 的短时载流能力/MW
11-12	775	
8-9	670	
16-17	548	
3-4	526	650
39-9	526	
21-25	522	
14-15	514	

表 4 实际电网短路电流超标站点及候选开断线路

Table 4 Short-circuit current oversizing buses of practical power grid and their candidate branches

$f$	$I_f$ /kA	$S_f$	$I_{ij}^{(f)}$ /kA
30087	54.8516	30087-30089	24.1689
		30087-30261	21.7931
		30259-30261	8.0063
		30089-30259	5.6305
		30087-30088	3.2765
30089	54.8676	30089-30259	19.3384
		30087-30089	16.8999
		30087-30261	8.0868
		30259-30261	5.6483
		30089-30090	3.2746
30259	54.8623	30089-30259	21.778
		30259-30261	19.3319
		30087-30261	5.6395
		30089-30090	3.2683
		30088-30727	3.2673
30261	54.8570	30259-30261	21.6878
		30087-30261	19.3196
		30087-30089	10.4613
		30089-30259	8.0931
		30087-30088	3.2703

表 4 中， $f$ 、 $I_f$ 、 $S_f$ 、 $I_{ij}^{(f)}$  分别表示短路电流超标节点、节点  $f$  的初始短路电流、节点  $f$  对应的可开断支路、节点  $f$  故障时对应可开断线路上流过的故障电流。总共存在 4 个短路电流超标节点，7 条可开断

线路, 可开断支路集为: {30087-30089, 30087-30261, 30259-30261, 30087-30088, 30089-30090, 30088-30727, 30089-30259}。因此模型的初始保留电网的保留节点数为 7。考虑  $N-1$  安全性约束, 根据支路故障(影响域)关联关系, 从该电网的 1923 个预想故障中筛选出与初始保留电网具有较大关联的 45 个预想故障作为  $N-1$  安全校核的故障集, 检查各个预想故障发生时, 对应影响域支路的越限情况, 模型总共包含 4936 个变量, 3610 个约束。

算例求解花费 13.202 s 得到优化方案, 目标函数中  $\alpha_s$  取为 0.01, 优化方案为开断首末端节点编号分别为 30087-30261, 30089-30259 的两条支路, 对应的实际含义是开断短路电流超标站点分段母线之间的联络线, 优化结果如表 5 所示。

表 5 短路电流优化效果

Table 5 Optimized short-circuit current

$f$	$I_{f,max}/kA$	$I_f^0/kA$	$I_f/kA$
30087	50	54.8516	31.3282
30089	50	54.8676	31.3437
30259	50	54.8623	31.3453
30261	50	54.8570	31.3455

在求解时间上, 模型的性能仍然是比较好的。浙江电网算例说明所建的线路开断优化模型能够适应实际大规模电网的应用需求。

## 4 结论

电网中短路电流超标问题日益严重, 通过开断线路调整电网运行方式是限制短路电流的有效手段。对此, 本文基于节点电压法建立了断线组合优化模型, 准确表达了控制短路电流水平的实际需求; 使用预处理及 WARD 等值手段大幅缩减了数学模型规模; 通过对相应表达式的合理转化, 构建的模型为一个 MILP 模型, 可以采用线性规划单纯形法及分支定界法快速求解。对 IEEE 39 节点系统及实际电网的仿真分析体现了本文方法的有效性、正确性与实用性。本文方法的主要特点如下:

1) 可开断线支路集的选取方法简单有效, 既能提高求解效率, 优先开断限流效果显著的线路, 又避免了复杂的迭代计算。

2) 有效预想故障集的筛选在保证等效的前提下, 大幅缩减了故障集大小, 缩小了模型规模。

3) 使用 WARD 等值方法对每一个预想开断的约束方程进行处理, 进一步显著地缩小了模型规模。

4) 优化模型非常好地描述了限流优化问题, 且兼顾了  $N-1$  安全运行要求, 在以往文献中未见述及。

5) 使用 MILP 模型描述优化问题, 求解算法成

熟且可保证求得全局最优解。

断线作为最有效而又经济的限流措施应该得到优先考虑。但是从算例分析中发现, 有时需要开断较多的线路才能达到限流目的, 此时需要将多种限流方式进行结合。如何将本文所建模型拓展成为多种限流措施的综合模型并能将安全性及可靠性约束整合在模型中是作者下一步的研究方向。

## 参考文献

- [1] 武守远, 荆平, 戴朝波, 等. 故障电流限制技术及其新进展[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 23-32.  
WU Shouyuan, JING Peng, DAI Chaobo, et al. Fault current limiting measures and their recent progress[J]. Power System Technology, 2008, 32(24): 23-32.
- [2] 陈妍君. 电阻型超导限流器和 10 kV 配电网继电保护相配合的仿真分析[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 53-59.  
CHEN Yanjun. Simulation of co-ordination of resistive-type superconducting fault current limiter and relay protection in 10 kV distribution network[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2016, 44(5): 53-59.
- [3] 徐贤, 丁涛, 万秋兰. 限制短路电流的 220 kV 电网分区优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 98-101.  
XU Xian, DING Tao, WAN Qiulan. 220 kV Power grid district-dividing optimization for limiting fault current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 98-101.
- [4] 宋柄兵, 顾洁. 计及短路电流限制的输电网双层扩展规划模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 92-101.  
SONG Bingbing, GU Jie. A bi-level expansion planning model of transmission systems considering short-circuit current constraints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(7): 92-101.
- [5] 朱峥. 一种受端电网限制短路电流的多目标决策方法[J]. 电气技术, 2015(12): 87-90.  
ZHU Zheng. The multi objective decision making method for limiting short circuit in the power grid[J]. Power System Technology, 2015(12): 87-90.
- [6] 杨雄平, 李力, 李扬絮, 等. 限制广东 500 kV 电网短路电流运行方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 104-107.  
YANG Xiongping, LI Li, LI Yangxu, et al. Grid operation programs for limiting short-circuit current in Guangdong 500 kV Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 104-107.
- [7] 朱俊杰, 聂子玲, 张银峰, 等. 一种软硬件协同控制的短路限流保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015,

43(19): 49-53.  
 ZHU Junjie, NIE Ziling, ZHANG Yinfeng, et al. A method of short-circuit current-limiting with software-hardware coordination control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 49-53.

[8] 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.

[9] SARMIENTO H G, CASTELLANOS R, PAMPIN G, et al. An example in controlling short circuit levels in a large metropolitan area[C] // Power Engineering Society General Meeting, July 13-17, 2003: 589-594.

[10] 陈丽莉, 黄民翔, 许诺, 等. 考虑潮流约束的限流措施优化配置[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1572-1576.  
 CHEN Lili, HUANG Minxiang, XU Nuo, et al. Optimal strategy for short-circuit current limiters deployment considering power flow[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1572-1576.

[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] BOONSUWAN K, HOONCHAREON N. Transmission network reconfiguration algorithm considering short-circuit curtailment and voltage stability index[C] // The 8th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTIT) Association of Thailand – Conference, 2011: 877-880.

[13] 刘硕, 张方华, 任仁. 全桥 LLC 变换器短路电流控制方法 (I)—理论分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 226-233.  
 LIU Shuo, ZHANG Fanghua, REN Ren. Short-circuit current control strategy for full-bridge LLC converter (I)—theoretical analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 226-233.

[14] 繆希仁, 吴晓梅. 低压系统多层级短路电流早期检测与预测[J]. 电工技术学报, 2014, 29(11): 177-183.  
 MIAO Xiaren, WU Xiaomei. Early detection and prediction for short-circuit current in a multi-level low voltage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(11): 177-183.

[15] 杜公言, 曹炜. 含逆变器电源的电力系统短路电流计算[J]. 电气技术, 2015(9): 38-42.  
 DU Gongyan, CAO Wei. Short-circuit current calculation of power system with inverter-interfaced energy considered[J]. Power System Technology, 2015(9): 38-42.

[16] TENG J H, LU C N. Optimum fault current limiter placement with search space reduction technique[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2009, 4(4): 485-494.

[17] 李传栋, 张逸, 杨桂钟, 等. 基于故障影响域的多重预想故障集筛选方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 92-99.  
 LI Chuandong, ZHANG Yi, YANG Guizhong, et al. An anticipated multi-contingencies selection method based on fault influence domain[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 92-99.

[18] 鲍威, 蒋雪冬, 陈利跃, 等. 考虑观测冗余度最大 0-1 线性规划电力系统 PMU 最优配置[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2051-2056.  
 BAO Wei, JIANG Xuedong, CHEN Liyue, et al. A 0-1 linear programming approach to optimal phasor measurement units placement considering maximized system observability redundancy[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2051-2056.

收稿日期: 2016-09-13; 修回日期: 2016-11-11

作者简介:

楼霞薇(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统最优化技术; E-mail: wbao@mrpower.cn

王威(1979—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统调度运行管理。E-mail: nbdyjww@163.com

(编辑 张爱琴)