

# 适用于拓扑调整的短路电流快速计算方法

冯树海, 於益军, 王礼文, 石飞, 汤必强

(中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 传统的适用于电网运行方式调整的短路电流计算方法耗时太长, 无法满足电网快速分析决策的需求。在此背景下, 提出了适用于电网拓扑调整的短路电流快速计算方法。该算法基于节点阻抗矩阵, 采用补偿法分析发电机停运、线路开断和线路出串运行导致的阻抗矩阵变化, 并在此基础上给出了适用于电网拓扑调整的短路电流快速计算流程。针对不同节点规模的实际系统的仿真算例表明, 所提出的方法计算速度快, 计算结果准确可靠, 能够满足大电网方式调整优化对短路电流计算的要求。该方法可以为电网短路电流限制策略分析提供技术支持。

**关键词:** 电力系统; 短路电流; 拓扑调整; 阻抗矩阵; 补偿法

## A method of fast short-circuit current calculation for topology adjustment

FENG Shu-hai, YU Yi-jun, WANG Li-wen, SHI Fei, TANG Bi-qiang

(China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** The traditional method of the short-circuit current calculation, which is used for the operation mode arrangement, costs too much time. It cannot meet the demand of fast analysis and decision-making. Therefore, a fast algorithm of short-circuit current calculation that is applicable to the grid topology adjustment is put forward. Based on the node impedance matrix and compensation method, it can analyze the changes of impedance matrix caused by the generator outage, line outage and line out series, and based on which the calculation procedure is given. The performance of the proposed method is demonstrated by tests on several real power systems. The simulation results show that the proposed method is fast and accurate, and it can meet the demand of the operation mode arrangement of large-scale power systems. Furthermore, this method is able to provide the technical support for the measure analysis of the short-circuit current limitation.

**Key words:** power system; short-circuit current; topology adjustment; impedance matrix; compensation method

中图分类号: TM713 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)08-0028-06

## 0 引言

随着电源的持续投产以及电网联系越来越紧密, 电网的短路电流水平不断升高, 国内大电网相继出现了短路电流超标问题, 给电网运行方式安排带来了巨大挑战。在短路电流逐步增大的形势下, 对每个短路电流超标的变电站进行断路器更换不但投资巨大, 而且难以实施, 500 kV电压等级甚至面临无断路器可用的窘境。因此, 在电网高速发展的同时, 有效地控制短路电流水平, 是当前电网运行控制值得重点关注的问题之一<sup>[1-5]</sup>。近年来, 在抑制短路电流的方法方面取得了一些成果<sup>[6-9]</sup>, 一些短路电流快速计算方法也被相继提出<sup>[10-17]</sup>。文献[10]提出了能够在短路发生后准确地计算出短路电流的基

波分量参数方法。文献[11]利用发电机组对短路电流的灵敏度和组合优化技术, 实现了限制短路电流停机方案的快速选择。文献[12]中通过分析线路开断对阻抗矩阵元素的影响, 并以灵敏度指标形式提出了一种限制短路电流的网架调整优化算法。文献[13]提出一种利用短路点自阻抗分析500 kV电网短路电流超标机理的方法, 并应用于短路电流限制措施的适应性研究。文献[14]提出一种基于戴维南定理和补偿法的快速短路电流计算方法, 采用补偿法在故障端口引入补偿电流模拟节点短路故障对原网络的影响。文献[15-17]在分析电网分区原则和分区要求的基础上, 提出电网分区限流运行方式的综合决策方法, 确定最佳限流运行方式。总体而言, 以上文献尚未涉及对多种限制措施的快速在线分析的研究, 这是本文的研究重点。

发电机停运、线路开断以及线路出串运行都可

以增加短路点与电源之间的等值电气距离, 降低短路电流水平。本文详细分析了这三种运行方式调整对节点阻抗矩阵的影响, 并在此基础上给出了对应的短路电流快速计算方法, 为电网运行方式调整提供参考。

### 1 短路电流计算基本原理

图1是一个有  $n$  个节点的电力系统接地短路示意图。假定在节点  $k$  处通过阻抗  $Z_f$  发生短路, 每个节点和零电位点构成一个端口。根据叠加原理通过阻抗矩阵表示节点电压和注入电流的关系为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \dot{U}_k \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1k} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2k} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{k1} & Z_{k2} & \cdots & Z_{kk} & \cdots & Z_{kn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nk} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_k \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(0)} \\ \dot{U}_{2(0)} \\ \vdots \\ \dot{U}_{k(0)} \\ \vdots \\ \dot{U}_{n(0)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中,  $\dot{U}_{1(0)}, \dot{U}_{2(0)}, \dots, \dot{U}_{n(0)}$  为没有发生短路时各节点的开路电压, 即注入电流  $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dots = \dot{I}_n = 0$  时的各节点电压。开路电压可以由正常运行的潮流计算求得, 近似计算中可以设各节点开路电压标么值为 1.0。阻抗矩阵的各元素分别为各节点的自阻抗和节点之间的互阻抗。

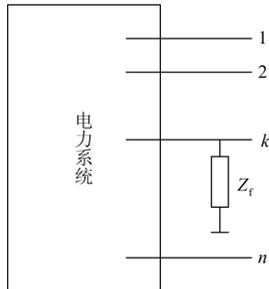


图1 短路示意图

Fig. 1 Sketch of short circuit

节点阻抗矩阵是节点导纳矩阵的逆阵, 因此可先形成节点导纳阵, 然后运用矩阵求逆的方法求取阻抗矩阵。除此之外, 还可以采用支路追加法形成阻抗矩阵, 该方法实质上是基于自阻抗和互阻抗的物理意义直接求取节点阻抗矩阵。下面简述支路追加法的原理。

设原网络有  $n$  个节点, 阻抗矩阵为  $Z$ , 支路追加过程中分树枝和链支两种形式。在节点  $i, j$  之间增加阻抗为  $Z_{ij}$  链支  $ij$  后, 网络中节点数不变, 但阻抗矩阵中各个元素的值都将改变, 新阻抗矩阵  $Z'$  中

各元素的计算公式为

$$Z'_{pq} = Z_{pq} - \frac{(Z_{pi} - Z_{pj})(Z_{iq} - Z_{jq})}{Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij} + z_{ij}} \quad (2)$$

若所增加的是接地链支, 即在节点  $i$  和地之间新增阻抗为  $Z_{i0}$  的支路, 式(2)简化为

$$Z'_{pq} = Z_{pq} - \frac{Z_{pi} Z_{iq}}{Z_{ii} + z_{i0}} \quad (3)$$

当节点  $k$  处发生三相短路时, 其边界条件为

$$\begin{cases} \dot{U}_k = \dot{I}_f Z_f \\ \dot{I}_k = -\dot{I}_f \\ \dot{I}_j = 0, j = 1, 2, \dots, n \quad j \neq k \end{cases} \quad (4)$$

联立求解式(1)、式(4), 可得短路电流计算公式为

$$\dot{I}_f = \frac{\dot{U}_{k(0)}}{Z_{kk} + z_f} \quad (5)$$

由式(5)可知, 当短路阻抗  $Z_f$  给定后, 只需知道节点的开路电压  $\dot{U}_{k(0)}$  和自阻抗  $Z_{kk}$ , 就可以求出节点三相短路电流。

本文以三相短路为例分析三相短路电流限制措施的计算方法, 其方法同样适用于不对称短路。

### 2 电网运行方式调整后短路电流快速分析

#### 2.1 发电机停运

如图2所示, 在  $n$  节点的电力系统中, 假定节点  $g$  为发电机节点。假定该发电机正常运行时的次暂态电抗为  $x''_{dg}$ 。那么, 当该发电机停运时, 需要在原网络中去掉次暂态电抗  $x''_{dg}$  对应支路, 基于阻抗为  $jx''_{dg}$  的支路和支路阻抗为  $-jx''_{dg}$  的支路并联后其等值阻抗为无穷大的电路原理, 发电机停运可以用在节点  $g$  处并联一个阻抗为  $-jx''_{dg}$  的接地支路来等效, 相当于在原网络的节点  $g$  处追加一接地链支  $-jx''_{dg}$ 。

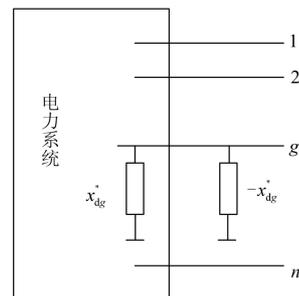


图2 发电机停运等值图

Fig. 2 Equivalent model of unit outage

根据式(3), 发电机 $g$ 停运后节点 $k$ 自阻抗为

$$Z'_{kk} = Z_{kk} - \frac{Z_{kg}Z_{gk}}{Z_{gg} - jx''_{dg}} = Z_{kk} - \Delta Z_{kk} \quad (6)$$

$$\Delta Z_{kk} = \frac{Z_{kg}^2}{Z_{gg} - jx''_{dg}} \quad (7)$$

式(6)和式(7)中,  $Z_{gg}$ 是发电机开断前的节点自阻抗, 也是网络等值到节点 $g$ 后和地组成的端口等值阻抗。节点 $g$ 和地之间除了 $-jx''_{dg}$ 支路外还通过网络其余部分构成电气联系(否则发电机为停运状态), 忽略 $Z_{gg}$ 电阻部分, 有 $Z_{gg} < jx''_{dg}$ 。由式(7)可知 $\Delta Z_{kk} < 0$ , 根据式(6)得 $Z'_{kk} > Z_{kk}$ , 即发电机 $g$ 停运后节点 $k$ 的短路电流减小。

对照公式(3)发现, 由于发电机停运, 所有节点的自阻抗不同程度地增大, 导致短路电流减小, 减小程度与式(7)中 $\Delta Z_{kk}$ 的大小密切相关,  $\Delta Z_{kk}$ 的绝对值越大, 限流效果越明显。在已知网络阻抗矩阵后, 式(7)的计算量很小(只包括一次减法、乘法和除法计算), 可以快速计算每台发电机 $g$ 停运后节点 $k$ 的自阻抗变化量 $\Delta Z_{kk}$ , 进而计算停运该发电机后新的短路电流数值。

## 2.2 线路开断

如图3所示, 在 $n$ 节点的电力系统中, 假定节点 $i, j$ 之间相连线路的阻抗为 $Z_{ij}$ , 该线路开断可以用在原运行网络的节点 $i, j$ 之间并联一条阻抗为 $-Z_{ij}$ 的线路来表示, 相当于在原网络的节点 $i, j$ 之间追加一条链支 $-Z_{ij}$ 。

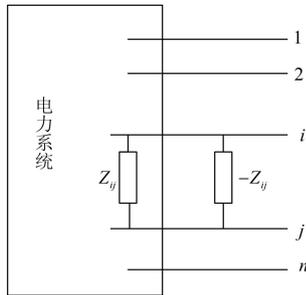


图3 线路开断等值图

Fig. 3 Equivalent model of line outage

根据式(2)可知, 此时节点 $k$ 的自阻抗为

$$Z'_{kk} = Z_{kk} - \frac{(Z_{ki} - Z_{kj})(Z_{ik} - Z_{jk})}{Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij} - z_{ij}} = Z_{kk} - \Delta Z_{kk} \quad (8)$$

$$\text{其中, } \Delta Z_{kk} = \frac{(Z_{ki} - Z_{kj})^2}{Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij} - z_{ij}} \quad (9)$$

观察式(9)的分母部分, 根据阻抗矩阵元素的物理意义, 节点 $i$ 注入单位电流时, 节点 $i$ 的电压为 $Z_{ii}$ , 节点 $j$ 的电压为 $Z_{ij}$ , 节点 $i, j$ 之间的电压差为 $Z_{ii} - Z_{ij}$ ; 节点 $j$ 注入单位电流时, 节点 $j$ 的电压为 $Z_{jj}$ , 节点 $i$ 的电压为 $Z_{ji}$ (也即 $Z_{ij}$ ), 节点 $i, j$ 之间的电压差为 $-(Z_{jj} - Z_{ij})$ 。定义节点对 $i, j$ 的自阻抗为

$$Z_{ij,ij} = Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij} = (Z_{ii} - Z_{ij}) + (Z_{jj} - Z_{ij}) \quad (10)$$

这里, 如图4(a)所示,  $Z_{ij,ij}$ 即为从 $i, j$ 节点组成的端口注入单位电流时的端口电压差。

从节点 $i, j$ 看整个电力系统, 节点 $i, j$ 之间除了直接相连的支路 $Z_{ij}$ 以外, 还通过系统中其余设备相连(如果没有则表示 $Z_{ij}$ 开断后网络解列)。图4(b)表示只在支路 $Z_{ij}$ 两端注入单位电流, 此时节点 $i, j$ 两端电压差即为 $Z_{ij}$ 。比较图4(a)和图4(b), 在端口之间注入相同电流时, 图4(a)两端电压差小于图4(b)两端电压差, 即 $Z_{ij,ij} < Z_{ij}$ 。这样, 式(9)中分母为负, 分子为正,  $\Delta Z_{kk}$ 为负, 式(8)中的节点 $k$ 的自阻抗 $Z'_{kk}$ 增大, 即线路开断后节点 $k$ 的短路电流减小。

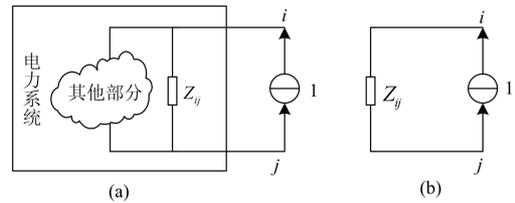


图4 节点对注入单位电流

Fig. 4 Unit current between two nodes

在已知网络阻抗矩阵后, 式(9)的计算量很小(包括5次加减法、1次乘法和1次除法计算), 可以快速计算每条线路开断后节点 $k$ 的自阻抗变化量 $\Delta Z_{kk}$ , 进而计算该线路开断后节点 $k$ 的短路电流。

## 2.3 线路出串运行

利用变电站内3/2接线方式实现线路出串运行, 是降低电网短路电流的方法之一。图5中正常运行时断路器A、B和C都闭合, 当断路器A、C开断而B闭合时, AB线和BC线通过断路器B直接相连实现出串运行, 和站内的母线以及其他设备断开。此出串运行方式在减小短路电流的同时, 兼顾了潮流运行的可靠性, 在500 kV电网中得到了广泛应用。

图5中AB线和BC线正常运行时, 可以理解成AB线和BC线通过零阻抗线路(断路器A、C)和其

他设备相连, 出串运行时断路器A、C的打开即表示开断对应的零阻抗线路, 将零阻抗线路用阻抗很小的线路替代, 分析可知, 开断零阻抗线路同样能减小节点短路电流。

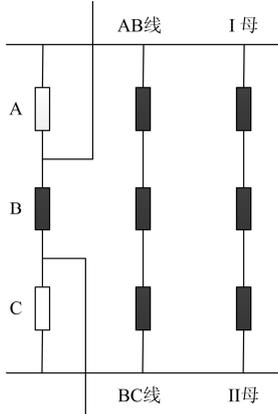


图5 变电站内的线路出串运行

Fig. 5 Line out series in substation

通过在具备出串运行条件的线路处接入零阻抗支路, 可以利用式(9)计算任意节点自阻抗的变化量。但是这种方式增加了阻抗矩阵的维数, 增大了计算量, 并且这一增维矩阵和潮流计算等软件中广泛采用的导纳矩阵、阻抗矩阵的差别很大, 不利于各分析软件之间共享计算结果。

这里, 在不增加阻抗矩阵维数的前提下, 仍采用追加支路法来处理线路出串运行。如图6所示, 初始运行方式下阻抗为 $Z_{im}$ 的线路 $im$ 和阻抗为 $Z_{jm}$ 的线路 $jm$ 在节点 $m$ 处连接, 当线路 $im$ 和 $jm$ 出串运行时, 相当于先分别开断线路 $im$ 和 $jm$ , 然后再在节点 $i$ 和 $j$ 之间接入一条阻抗为 $Z_{im} + Z_{jm}$ 的线路。

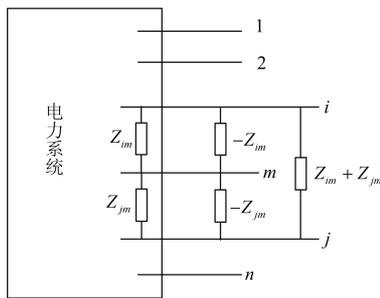


图6 线路出串运行等值图

Fig. 6 Equivalent model of line out series

线路出串运行后的阻抗矩阵计算过程如下:

(a) 在原网络节点 $i$ 和 $m$ 之间接入阻抗为 $-Z_{im}$ 的链支, 按式(2)修正阻抗矩阵中节点 $k$ 、 $i$ 、 $j$ 、 $m$ 相关元素 $Z_{kk}^{(1)}, Z_{ki}^{(1)}, Z_{kj}^{(1)}, Z_{km}^{(1)}, Z_{ii}^{(1)}, Z_{ij}^{(1)}, Z_{im}^{(1)}, Z_{ij}^{(1)}, Z_{jm}^{(1)}$ ,

$Z_{mm}^{(1)}$ 。

(b) 在步骤(a)的基础上节点 $j$ 和 $m$ 之间接入阻抗为 $-Z_{jm}$ 的链支, 按式(2)修正阻抗矩阵中节点 $k$ 、 $i$ 、 $j$ 相关元素 $Z_{kk}^{(2)}, Z_{ki}^{(2)}, Z_{kj}^{(2)}, Z_{ii}^{(2)}, Z_{ij}^{(2)}, Z_{ij}^{(2)}$ 。

(c) 在步骤(b)的基础上节点 $i$ 和 $j$ 之间接入阻抗为 $Z_{im} + Z_{jm}$ 的链支, 按式(2)修正阻抗矩阵中节点 $k$ 的自阻抗 $Z_{kk}^{(3)}$ , 最终节点 $k$ 的自阻抗变化量为

$$\Delta Z_{kk} = Z_{kk}^{(3)} - Z_{kk} \quad (11)$$

在已知网络阻抗矩阵后, 可以按上述步骤快速计算线路出串运行后节点 $k$ 的自阻抗变化量 $\Delta Z_{kk}$ , 进而计算线路出串运行情况下节点 $k$ 的短路电流。

### 3 算例分析

目前, 短路电流计算功能已扩展包括遮断容量实时扫描、限流决策分析等。遮断容量扫描需要求取阻抗矩阵的所有对角元素, 限流决策分析需要求取阻抗矩阵大部分元素。传统方法需要对所有电网运行方式调整逐次进行计算, 而电网运行方式的频繁调整需要反复修正导纳矩阵并进行三角分解、前代回代, 效率比较低, 无法满足在线分析需求。

这里, 对传统逐次计算方法和本文所提出的方法进行比对测试。测试采用联想万全服务器, 操作系统为Linux, 软件平台为智能电网调度技术支持系统。测试算例采用多个不同规模的省级实际电网模型, 具体信息如表1所示。其中发电机、线路信息是指实际运行的设备数量, 出串信息是指可以实现线路出串运行的数量。

表1 电网模型信息

Table 1 Model information of networks

| 计算节点  | 调整量   | 发电机 | 线路   | 出串  |
|-------|-------|-----|------|-----|
| 648   | 917   | 115 | 755  | 47  |
| 1 062 | 631   | 129 | 478  | 24  |
| 1 768 | 1 542 | 155 | 1312 | 75  |
| 2 724 | 4 322 | 603 | 3547 | 172 |

针对不同计算节点规模, 采用两种方法对所有调整策略进行一次分析计算, 其计算耗时分别如图7、图8所示。

对以上的不同电网模型, 分别求取了两种方法中母线遮断容量的计算结果、调整措施对某一越限的短路电流减小量的均方根误差(RMSE), 具体结果如表2所示。

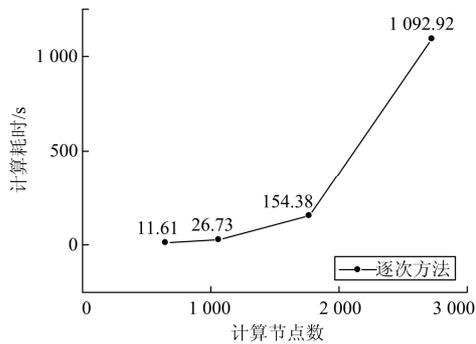


图 7 逐次计算方法的计算耗时

Fig. 7 Computation time of sequential calculation method

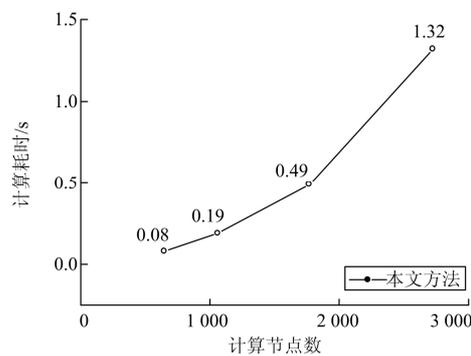


图 8 本文提出方法的计算耗时

Fig. 8 Computation time of the proposed method

表 2 两种方法的均方根误差

Table 2 RMSE for two methods

| 计算节点  | 遮断容量 RMSE/kA | 电流减小量 RMSE/kA |
|-------|--------------|---------------|
| 648   | 0.019 3      | 0.001 4       |
| 1 062 | 0.021 1      | 0.001 5       |
| 1 768 | 0.017 6      | 0.001 2       |
| 2 724 | 0.015 3      | 0.000 9       |

从以上结果可以看出，随着电网规模的增大，逐次计算方法的计算耗时呈现快速增长趋势，计算速度无法满足在线分析的需求；本文提出的方法的计算耗时与节点规模呈近似线性关系，但计算速度很快。并且，两种方法计算结果非常接近，偏差很小，说明了文中提出的方法具有与传统逐次计算方法相一致的精度。

### 4 结语

本文提出了一种适用于电网拓扑调整的短路电流快速计算方法，该方法利用节点阻抗矩阵，可以快速分析计算电网发电机停运、线路开断和线路出串运行这三种运行方式调整对限制短路电流的效

果，为安排电网的运行方式提供帮助。针对不同节点规模的实际系统的算例分析验证了该方法的正确性和可行性。

### 参考文献

[1] 阮前途. 上海电网短路电流控制的现状与对策[J]. 电网技术, 1996, 20(9): 29-31.  
 RUAN Qian-tu. Present situation of short circuit current control in shanghai power grid and counter measures[J]. Power System Technology, 1996, 20(9): 29-31.

[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[J]. 华东电力, 2006, 34(7): 55-59.  
 ZHOU Jian, HU Hong, ZHUANG Kan-qin, et al. Short circuit current of 500 kV East China power grid and its limitation[J]. East China Electric Power, 2006, 34(7): 55-59.

[3] 袁娟, 刘文颖, 董明齐. 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 Wen-ying, DONG Ming-qi. Application of measures limiting short circuit currents in Northwest China power grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 42-45.

[4] 李力, 李爱民, 吴科成, 等. 广东电网短路电流超标问题分析和限流措施研究[J]. 南方电网技术, 2009, 3(增刊): 20-24.  
 LI Li, LI Ai-min, WU Ke-cheng, et al. Analysis of short-circuit current exceeding standard of Guangdong power grid and research on limitation measures[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(S): 20-24.

[5] 陈丽莉, 黄民翔, 张弘, 等. 电网限流措施的优化配置[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 38-42.  
 CHEN Li-li, HUANG Min-xiang, ZHANG Hong, et al. An optimization strategy for limiting short circuit current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 38-42.

[6] 韩戈, 韩柳, 吴琳. 各种限制电网短路电流措施的应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 141-144, 151.  
 HAN Ge, HAN Liu, WU Lin. Application and development of methods on limiting power grid's short-circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 141-144, 151.

[7] 刘树勇, 孔昭兴, 张来. 天津电网 220 kV 短路电流限

- 制措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(1): 103-107, 118.
- LIU Shu-yong, KONG Zhao-xing, ZHANG Lai. Application of measures of limiting 220 kV short circuit currents in Tianjin power grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(1): 103-107, 118.
- [8] 张晚英, 周有庆, 赵伟明, 等. 改进桥路型高温超导故障限流器的实验研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 70-76.
- ZHANG Wan-ying, ZHOU You-qing, ZHAO Wei-ming, et al. Experimental research on an improved rectifier type high temperature superconductin fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 70-76.
- [9] 董力, 李庆民, 刘卫东, 等. 两次电流转移型短路电流限制器的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(3): 21-24.
- DONG Li, LI Qing-min, LIU Wei-dong, et al. Investigation of a double current-transferring type short circuit current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(3): 21-24.
- [10] 刘俊, 马志瀛, 闫静, 等. 基于改进梯度校正法的短路电流在线实时计算[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 65-70.
- LIU Jun, MA Zhi-ying, YAN Jing, et al. Online real-time calculation of short circuit current based on improved gradient estimation algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 65-70.
- [11] 付红军, 赵娟, 张鹏飞, 等. 基于灵敏度和组合优化的限流停机方案快速算法[C] // 2006 中国电机工程学会年会论文集, 107-110.
- FU Hong-jun, ZHAO Juan, ZHANG Peng-fei, et al. A novel method of unit commitment for reducing fault current based on sensitive and combination optimization[C] // Proceedings of Annual Meeting of CSEE (2006), 2006: 107-110.
- [12] 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 Yong-kang, CAI Ze-xiang, LI Ai-min, 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.
- [13] 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 Qi-zhen, CAI Ze-xiang, LI Ai-min, 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.
- [14] 但扬清, 刘文颖, 朱艳伟, 等. 基于补偿法的快速短路电流算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 103-106.
- DAN Yang-qing, LIU Wen-ying, ZHU Yan-wei, et al. A fast algorithm of short-circuit current based on compensation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 103-106.
- [15] 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 Qiu-lan. 220 kV power grid district-dividing optimization for limiting fault current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 98-101.
- [16] 杨冬, 刘玉田, 牛新生. 分区电网限流运行方式的综合决策方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 34-38.
- YANG Dong, LIU Yu-tian, NIU Xin-sheng. Integrated decision method of operation schemes for limiting short-circuit currents in district grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 34-38.
- [17] 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 Yu-tian, NIU Xin-sheng. 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.

收稿日期: 2013-07-09; 修回日期: 2013-09-04

作者简介:

冯树海(1973-), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统应用软件、智能调度方面的研发工作; E-mail: fengshuhai@hotmail.com

於益军(1967-), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 从事电力系统应用软件、智能调度方面的研究工作;

王礼文(1981-), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统应用软件开发工作。