

基于环网方向保护协调配合的最小断点集选取方法

杨文辉, 范生海, 周晓霞

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 为实现环网方向保护整定配合起始点的合理选择, 给出一种基于保护协调配合性能的最小断点集选取方法。该方法基于继电保护整定配合的阶梯原则, 定义了评价环网各级阶段式方向保护整体协调配合性能的测度指标, 通过测度指标定量评价最小断点集问题各组可行解的优劣性, 进而实现最小断点集问题多组可行解的合理选取; 同时给出了基于图论中最长基本路径概念的测度指标计算方法。算例仿真表明, 所提方法能够避免最小断点集选取不当引起的保护配合级数过多和动作时限过长问题。

关键词: 最小断点集; 方向保护; 协调配合; 测度指标; 环网

Selection of minimum break point set based on coordination of directional protections in loop grid

YANG Wenhui, FAN Shenghai, ZHOU Xiaoxia

(College of Electrical Engineering and New Energy, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: To obtain the reasonable starting points for setting directional protections in loop grid, the method for selecting minimum break point set is studied based on the coordination performance of protections. According to the step principle for setting protection relay, the measurement index is defined to evaluate the coordination performance of directional protections of transmission lines in loop grid, and the effectiveness of each feasible solution of minimum break point set problem can be described by its measurement index value, and the feasible solution with the best measurement index can be further selected as the minimum break point set. Based on the concept of the longest path in graph theory, the method for calculating measurement index is also given. Simulation results show that the proposed method can avoid the inappropriate coordination of protections caused by the unreasonable selection of minimum break point set.

Key words: minimum break point set; directional protection; coordination performance; measurement index; loop grid

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)14-0030-05

0 引言

220kV 及以上电网普遍存在环网^[1], 其三段式保护均具有方向性, 保护整定必须同时考虑多条相邻前向线路和背侧线路保护之间的主/后备配合约束, 当同一环路中方向保护配合关系为同段之间互相配合时, 整定将出现“死锁”现象^[2], 各级保护整定值间难以实现协调配合。

为解决环网方向保护整定配合的“死锁”问题, 要求选取一组整定起始点(称为断点), 将所有“死锁”解开。由于整定起始点处保护定值不按配合整定, 保护动作选择性难以得到保证^[3], 因此, 希望

整定起始点数目尽可能少, 并将数目最少的整定起始点集合称为最小断点集。传统最小断点集搜索方法主要有: 1) 基于图论的研究方法^[4-5], 在获取全部简单回路基础上, 通过布尔代数等方法获得可行的最小断点集; 2) 基于保护依赖函数的研究方法^[6-7], 根据主/后备配合依赖关系搜索可行的最小断点集; 3) 基于人工智能的研究方法^[8-9], 将最小断点集搜索描述为一个 0-1 整数规划问题进行求解。

最小断点集问题通常具有多组可行解, 如何从中筛选出一个最优或较优的可行解是一个有待深入研究的问题。从降低断点处保护无选择性动作对电网安全影响的角度出发, 文献^[10-12]提出将断点位置分布于重要保护^[13-14]或枢纽变电站^[15-16]的劣质可行解进行排除。实际上, 保护整定配合起始点位置分

布的不同还决定着其它位于非起始点处的各级保护间整定配合关系的优劣^[17]。因此, 本文在文献[10-12]工作的基础上, 进一步以 110kV 及以上电压等级环网中广泛使用的阶段式方向保护^[18-19](距离保护和零序电流保护)间协调配合性能最佳为目标, 给出一种最小断点集问题多组可行解的优选方法。

1 基本原理及实现方法

1.1 图的基本概念

(1) 有向图

有向图是抽象的有向边和顶点的集合, 可以用一个二元组 $G=(V, E)$ 来描述。其中, G 表示一个有向图, $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示有向图 G 中顶点的集合, $E=\{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 表示有向图 G 中有向边的集合。

(2) 邻接矩阵

用邻接矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 表示和存储有向图 G 。其中, 对于任意顶点 $v_i, v_j \in V$, 若存在一条由顶点 v_i 指向顶点 v_j 的有向边, 则 a_{ij} 取值为 1, 反之, a_{ij} 取值为 0。

(3) 最长基本路径

在有向图 $G=\{V, E\}$ 中, 由一组首尾相接的有向边组成的序列 $\{e_1, e_2, \dots, e_p\}$, 如果 $e_k (k=1, 2, \dots, p)$ 是由顶点 v_{k-1} 指向顶点 v_k 的有向边, 则称该序列为从起点 v_0 到终点 v_p 的一条路径。顶点不重复的路径称为基本路径。

一条基本路径所含有向边的数目, 称为这条基本路径的长度。在顶点 v_i 到顶点 v_j 的全部基本路径中, 长度最长的基本路径称为最长基本路径。

(4) 有向无环图

在有向图中, 一条起点和终点相同的路径称为回路, 若一个有向图中没有回路, 则该有向图称为有向无环图。对于一个有向无环图, 可通过仿强 *Dijkstra* 搜索方法^[20], 搜索任意两个顶点间的最长基本路径。

1.2 概测度指标

设最小断点集问题有 n 组可行解, 将其中的第 k 组可行解记为 $B_k=\{d_1, d_2, \dots, d_m\}, k=1, 2, \dots, n$, d_h 表示该 B_k 的 m 个断点中的第 h 个断点, $h=1, 2, \dots, m$ 。将最小断点集问题任一组可行解 B_k 选为最小断点集, 并将该 B_k 中断点添加为保护整定配合的起始点, 可解开环网方向保护整定配合的“死锁”, 实现环网方向保护的整定计算。为评价最小断点集 B_k 条件下电网各级线路方向保护整体协调配合性能, 如下定义测度指标 $T(B_k)$ 。

$$T(B_k) = \sum_{i=1}^{w-w_1} L(i) \quad (1)$$

其中,

$$L(i) = \max \{L(i, j) \mid j=1, 2, \dots, w_1\} \quad (2)$$

式中: w 表示电网中同段间相互配合的线路方向保护(距离 III 段或零序电流 III 段)的个数, 其中位于保护整定配合起始点(最小断点和终端线路系统侧)处保护为 w_1 个, 位于非保护整定配合起始点处保护为 $(w-w_1)$ 个; $L(i, j)$ 表示与第 j 个起始点处保护按阶梯原则沿全部可能路径均实现逐级配合时, 第 i 个非起点处同段方向保护动作时限包含的整定配合级差数, 若该两个保护在动作时限上不存在逐级整定配合关系, 则 $L(i, j)$ 取值为 0, $L(i)$ 表示与全部起始点处保护按阶梯原则沿全部可能路径均实现逐级配合时, 第 i 个非起点处同段方向保护动作时限包含的整定配合级差数, $i=1, 2, \dots, w-w_1, j=1, 2, \dots, w_1$ 。

测度指标 $T(B_k)$ 在通过阶梯原则保证电网各级方向保护选择性和灵敏性逐级配合的基础上, 通过考察环网各级方向保护动作时限包含的整定配合级差数的总和, 量化评价电网各级保护间的整体协调配合性能。即测度指标 $T(B_k)$ 值越小, 则该可行解 B_k 越有利于避免环网方向保护整定配合中可能出现的配合级数过多和动作时限过长问题, 使电网各级方向保护获得更佳的速动性, 因此, 将测度指标 $T(B_k)$ 最小的可行解 B_k 选为最小断点集。

1.3 算法步骤

本文基于环网方向保护协调配合的最小断点集选取方法实现步骤如下。

步骤一: 电网各级保护间整定配合关系可用有向图进行描述^[6]。以电网中同段间相互配合的线路方向保护(距离 III 段或零序电流 III 段)为顶点, 以相邻保护间的整定配合关系为有向边, 将上述方向保护间整定配合关系抽象为一个有向图 $G=(V, E)$, 并用邻接矩阵 $A=(a_{ij})_{w \times w}$ 进行描述, w 为方向保护的个数。当保护 i 是相邻线路保护 j 的远后备保护时, G 中存在一条由顶点 i 指向顶点 j 的有向边, 则 A 中元素 a_{ij} 取值为 1, 否则 a_{ij} 取值为 0。

步骤二: 设最小断点集问题有 n 组可行解, 将其中第 k 组可行解 B_k 选为最小断点集时, 评价电网各级线路方向保护整体协调配合性能的测度指标 $T(B_k)$ 如下计算。

(1) 将有向图 G 中的顶点分为起始点和非起始点两类。可行解 B_k 内断点以及终端线路系统侧方向保护对应的顶点均称为起始点, 第 j 个起始点记为 $u_j, j=1, 2, \dots, w_1$, 电网其余方向保护对应的顶点称为非起始点, 第 i 个非起点记为 $v_i, i=1, 2, \dots, w-w_1$ 。

(2) 取消 B_k 内断点处保护作为下一级线路保护

远后备的整定配合关系。在邻接矩阵为 $A=(a_{ij})_{w \times w}$ 中, 将起始点 v_1, v_2, \dots, v_m 对应行的非 0 元素全部置 0, 即得到以最小断点集 B_k 为电网保护整定配合起点, 解开环网方向保护整定配合的“死锁”时, 描述电网各级方向保护间整定配合关系的有向图 G' 的邻接矩阵 A' 。

解开“死锁”后, 有向图 G' 成为一个有向无环图。

(3) 计算式(2)中的整定配合级差数 $L(i, j)$ 和 $L(i)$, $i=1, 2, \dots, w-w_1, j=1, 2, \dots, w_1$ 。

当第 i 个非起点处保护与第 j 个起始点处的同段方向保护在动作时限上存在逐级整定配合关系时, 这两个保护在动作时限上的整定配合级差数即为有向无环图 G' 中由非起始点 v_i 到起始点 u_j 的最长基本路径长度。因此, 针对邻接矩阵 A' 对应的有向无环图 G' , 采用仿强 *Dijkstra* 搜索方法, 获取由非起始点 v_i 到起始点 u_j 的最长基本路径, 将该最长基本路径的长度赋值给 $L(i, j)$ 。当由非起始点 v_i 到起始点 u_j 的最长基本路径长度为 ∞ 时, 表明该两个保护在动作时限上不存在逐级整定配合关系, 则将 $L(i, j)$ 取值为 0。

获得某个非起始点 v_i 到全部起始点 u_j ($j=1, 2, \dots, w_1$) 的整定配合级差数 $L(i, j)$ 后, 按式(2)计算得到整定配合级差数 $L(i)$ 。

(4) 按式(1)计算测度指标 $T(B_k)$ 。

步骤三: 针对最小断点集问题的 n 组可行解, 分别如上计算其测度指标 $T(B_k)$, $k=1, 2, \dots, n$ 。若可行解 B_k 的测度指标 $T(B_k)$, $k \in \{1, 2, \dots, n\}$ 满足下列条件, 将其选择为最小断点集。

$$\{T(B_k) = \min\{T(B_i) \mid i=1, 2, \dots, n\}\} \quad (3)$$

2 算例分析

系统接线及保护分布如图 1 所示。该环网共有 14 个同段间相互配合的保护(距离 III 段或零序电流 III 段), 保护序号分别用阿拉伯数字 1, 2, ..., 14 表示。以文献[8]给出最小断点集问题的 6 组可行解为例, 验

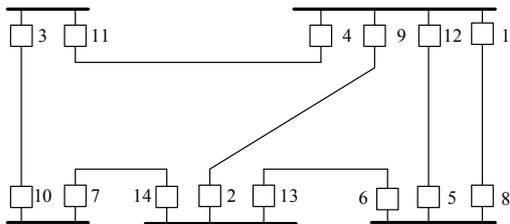


图 1 系统接线及保护分布
Fig. 1 Schematic diagram of test system

证本文方法的有效性。该 6 组可行解分别为: $B_1=\{1, 4, 9, 12\}$, $B_2=\{2, 5, 8, 11\}$, $B_3=\{1, 3, 9, 12\}$, $B_4=\{1, 7, 9, 12\}$, $B_5=\{2, 5, 8, 10\}$, $B_6=\{2, 5, 8, 14\}$ 。

根据电网各级方向保护间整定配合关系, 如下形成有向图 G 的邻接矩阵 $A=(a_{ij})_{w \times w}$, $w=14$ 。在图 1 中, 保护 1 是下级线路保护 5 和 6 的远后备, a_{15} 和 a_{16} 均取值为 1, 其余类同。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

以第 5 组可行解 $B_5=\{2, 5, 8, 10\}$ 为例, 计算其相应测度指标 $T(B_5)$ 。图 1 中没有终端线路, 保护整定配合的起始点对应着该 B_5 内断点处保护 $\{2, 5, 8, 10\}$, 非起始点对应着电网其余方向保护 $\{1, 3, 4, 6, 7, 9, 11, 12, 13, 14\}$ 。

在邻接矩阵为 A 中, 将上述起始点对应行的非 0 元素全部置为 0, 即得到当 B_5 为最小断点集时, 描述电网保护整定配合关系的有向图 G' 的邻接矩阵 A' 。

根据邻接矩阵 A' , 计算式(2)中的整定配合级差数 $L(i, j)$ 和 $L(i)$, $i=1, 3, 4, 6, 7, 9, 11, 12, 13, 14, j=2, 5, 8, 10$, 进而按式(1)得到测度指标 $T(B_5)$, 结果如表 1 所示。

表 1 $L(i, j)$ 和 $L(i)$ 的计算结果
Table 1 Calculating results of $L(i, j)$ and $L(i)$

$L(1, 2)$	$L(1, 5)$	$L(1, 8)$	$L(1, 10)$	$L(1)$
2	1	0	3	3
$L(3, 2)$	$L(3, 5)$	$L(3, 8)$	$L(3, 10)$	$L(3)$
2	3	3	0	3
$L(4, 2)$	$L(4, 5)$	$L(4, 8)$	$L(4, 10)$	$L(4)$
3	4	4	0	4
$L(6, 2)$	$L(6, 5)$	$L(6, 8)$	$L(6, 10)$	$L(6)$
1	0	0	2	2
$L(7, 2)$	$L(7, 5)$	$L(7, 8)$	$L(7, 10)$	$L(7)$
1	2	2	0	2

续表

$L(9,2)$	$L(9,5)$	$L(9,8)$	$L(9,10)$	$L(9)$
0	2	2	2	2
$L(11,2)$	$L(11,5)$	$L(11,8)$	$L(11,10)$	$L(11)$
3	3	3	4	4
$L(12,2)$	$L(12,5)$	$L(12,8)$	$L(12,10)$	$L(12)$
2	0	1	3	3
$L(13,2)$	$L(13,5)$	$L(13,8)$	$L(13,10)$	$L(13)$
0	1	1	0	1
$L(14,2)$	$L(14,5)$	$L(14,8)$	$L(14,10)$	$L(14)$
0	0	0	1	1
$T(\mathbf{B}_5)=25$				

分别针对最小断点集问题的 6 组可行解, 计算其测度指标 $T(\mathbf{B}_k)$, $k=1,2,\dots,n$, 结果如表 2 所示。

表 2 $T(\mathbf{B}_k)$ 的计算结果

Table 2 Calculating results of $T(\mathbf{B}_k)$

可行解 \mathbf{B}_k	测度指标 $T(\mathbf{B}_k)$	$(T(\mathbf{B}_k)-T(\mathbf{B}_1))/T(\mathbf{B}_1)$ (%)
$\mathbf{B}_1=\{1,4,9,12\}$	$T(\mathbf{B}_1)=22$	0
$\mathbf{B}_2=\{2,5,8,11\}$	$T(\mathbf{B}_2)=27$	22.7
$\mathbf{B}_3=\{1,3,9,12\}$	$T(\mathbf{B}_3)=24$	9.1
$\mathbf{B}_4=\{1,7,9,12\}$	$T(\mathbf{B}_4)=26$	18.2
$\mathbf{B}_5=\{2,5,8,10\}$	$T(\mathbf{B}_5)=25$	13.6
$\mathbf{B}_6=\{2,5,8,14\}$	$T(\mathbf{B}_6)=24$	9.1
$T(\mathbf{B}_1)=\min\{T(\mathbf{B}_1), T(\mathbf{B}_2), T(\mathbf{B}_3), T(\mathbf{B}_4), T(\mathbf{B}_5), T(\mathbf{B}_6)\}$		

表 2 中, 将测度指标最小的可行解 \mathbf{B}_1 选为最小断点集。与评价指标最高的可行解 \mathbf{B}_2 相比, 可行解 \mathbf{B}_1 的评价指标降低 22.7%, 表明在最小断点集问题的多组可行解中, 将测度指标最小的可行解 \mathbf{B}_1 选为保护整定配合的起始点, 能有效避免环网方向保护整定计算中可能出现的保护配合级数过多和动作时限过长问题。

3 结论

针对最小断点集问题多组可行解的合理选取问题, 提出一种基于保护协调配合性能的最小断点集选取方法, 并给出了方法的基本原理和算法步骤。算例仿真表明, 所提方法能够避免最小断点集选取不当引起的保护配合级数过多和动作时限过长问题, 对快速切除电网短路故障和提高并列运行系统稳定性具有实际意义。

参考文献

[1] 刘楠, 唐晓骏, 张文朝, 等. 特高压接入河南电网后电磁环网解环方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011,

39(2): 131-136, 141.
 LIU Nan, TANG Xiaojun, ZHANG Wenchao, et al. Study on electromagnetic ring opening in Henan province under ultra-high voltage power grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(2): 131-136, 141.
 [2] 冯艳, 徐玉琴, 沈志强. 一种新的基于图论确定所有最小断点集方法[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(3): 87-90.
 FENG Yan, XU Yuqin, SHEN Zhijiang. Determination of minimum break point set based on graph theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(3): 87-90.
 [3] 吕飞鹏, 米麟书, 姜可薰. 基于 ANN 的环网方向保护配合最小断点集的计算——第 2 部分 算法及仿真研究[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(8): 19-22.
 LÜ Feipeng, MI Linshu, JIANG Kexun. ANN based on the determination of minimum break point set for optimal coordination of directional protective relay in a multiloop network part II algorithm and simulation research[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(8): 19-22.
 [4] PRASAD V C, PRAKASO RAO K S, SUBBA RAO A. Coordination of directional relays without generating all circuits[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(2): 584-590.
 [5] 李银红, 段献忠. 继电保护整定计算中形成简单回路的方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 21-25.
 LI Yinhong, DUAN Xianzhong. Study on the simple loop formation method in relay coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 21-25.
 [6] 刘丹, 吕飞鹏. 基于网络化简和配合关系的最小断点集计算方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(16): 24-27.
 LIU Dan, LÜ Feipeng. A novel method for determining minimum break point set based on network graph simplification and coordination relationships of relays[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(16): 24-27.
 [7] YUE Quanming, LÜ Feipeng, YU Weiyong, et al. A novel algorithm to determine minimum break point set for optimum cooperation of directional protection relays in multiloop networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1114-1119.
 [8] 周文越, 吕飞鹏, 廖小君. 基于人工蜂群算法的环网方向保护配合最小断点集计算[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 77-81.
 ZHOU Wenyue, LÜ Feipeng, LIAO Xiaojun. Artificial bee colony algorithm based determination of minimum break point set for coordination of directional protective

- relay in multi-loop networks[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 77-81.
- [9] 吕飞鹏, 刘丹. 基于蚁群算法计算环网保护配合最小断点集的新方法[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(4): 142-147.
LÜ Feipeng, LIU Dan. A novel method for the determination of the minimum break point set of directional protective relays in a Multi-loop networks based on ant colony optimization algorithm[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(4): 142-147.
- [10] 张向亮, 吕飞鹏, 李运坤, 等. 基于保护重要度的多组同基最小断点集选取方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 90-93.
ZHANG Xiangliang, LÜ Feipeng, LI Yunkun, et al. A method for selecting a minimum break point set (MBPS) from multi-MBPS with the same cardinal number based on evaluation of relay protection importance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 90-93.
- [11] 李运坤, 吕飞鹏, 陈新, 等. 基于节点重要度估计的多组同基最小断点集选取方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 58-60.
LI Yunkun, LÜ Feipeng, CHEN Xin, et al. A method for selecting a minimum break point set (MBPS) from multi-MBPS with the same cardinal number based on evaluation of node importance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 58-60.
- [12] 卢志刚, 谢晓伟, 李学平. 一种求解复杂环网保护配合最优断点集的新方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 86-91.
LU Zhigang, XIE Xiaowei, LI Xueping. A new method of solving optimal break point SETS for protection coordination in Multi-loop network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 86-91.
- [13] 戴志辉, 王增平, 焦彦军, 等. 阶段式保护原理性失效风险的概率评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 175-182.
DAI Zhihui, WANG Zengping, JIAO Yanjun, et al. Probabilistic assessment method for failure risk of stepped protection philosophy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 175-182.
- [14] 龚辉, 吕林, 刘友波, 等. 输电网脆弱线路识别的静态综合指标法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 25-31.
GONG Hui, LÜ Lin, LIU Youbo, et al. Static comprehensive index method of vulnerable lines identification of power transmission grids[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 25-31.
- [15] 张海翔, 吕飞鹏. 基于连锁故障序列分析的电网脆弱性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 32-38.
ZHANG Haixiang, LÜ Feipeng. Vulnerability evaluation of power grid based on the analysis of cascading failure sequence[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 32-38.
- [16] 魏震波, 刘俊勇, 朱国俊, 等. 基于可靠性加权拓扑模型下的电网脆弱性评估模型[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 131-137.
WEI Zhenbo, LIU Junyong, ZHU Guojun, et al. Vulnerability evaluation model to power grid based on Reliability-Parameter-Weighted topological model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 131-137.
- [17] MOHAMMADI R, ABYANEH H A, RUDSARI H M, et al. Overcurrent relays coordination considering the priority of constraints[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1927-1938.
- [18] 董新洲, 曹润彬, 崔柳, 等. 现代电力系统集成后备保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 21-25.
DONG Xinzhou, CAO Runbin, CUI Liu, et al. Integrated backup protection scheme in modern power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 21-25.
- [19] 刘家军, 闫泊, 姚李孝, 等. 平行双回线中串补电容对零序电抗型距离保护的影响[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 264-270.
LIU Jiajun, YAN Bo, YAO Lixiao, et al. Influence of series compensation capacitor on zero-sequence reactance-type distance protection in parallel double-circuit lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 264-270.
- [20] 郭强, 孙浩. 运筹学原理与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 121-126.

收稿日期: 2014-10-18; 修回日期: 2014-12-02

作者简介:

杨文辉(1967-), 男, 博士, 硕士生导师, 研究方向为基于 WAMS 的电力系统保护与控制技术; E-mail: whyang@ctgu.edu.cn

范生海(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制技术;

周晓霞(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与分析技术。

(编辑 张爱琴)