

## 一种基于线路相关集的大电网继电保护隐藏故障算法

张 玮<sup>1</sup>, 潘贞存<sup>1</sup>, 李磊<sup>2</sup>

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东电力研究院, 山东 济南 250002)

**摘要:** 世界各国频繁发生的大停电事故表明, 当某条线路因故需要退出运行时, 后备保护中的隐藏故障造成保护发生不必要的动作是造成大停电事故发生的重要因素。提出了线路相关集的概念, 详细介绍了基于最短路径算法的线路相关集求解过程, 推导了多条支路同时开断时线路相关集及相关因子的求解方法。在此基础上对假想事故后的潮流转移进行快速计算, 准确地判断出后备保护的隐藏故障并快速进行消除, 有效防止连锁跳闸事故的发生。用 CEPRI 36 节点系统进行了仿真验证, 证明了所提方法的正确性和有效性。

**关键词:** 隐藏故障; 线路相关集; 最短路径搜索; 线路相关因子; 潮流转移

## Analysis of hidden failures of protection in bulk power system based on RCTL

ZHANG Wei<sup>1</sup>, PAN Zhen-cun<sup>1</sup>, LI Lei<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China)

**Abstract:** In recent years, many catastrophic blackouts occurred in some countries show that the hidden failure in backup protection is the key factor which worsen the process of cascading failures in power grid. So it is important to ensure our power grid against cascading failure by searching hidden failures in backup protection and eliminate them in advance to avoid blackout. This paper proposes a measure to calculate the probability of hidden failure according to power flow transferring distribution after one or more transmission lines stop working. And a new concept RCTL (relative cluster of the transmission line) and the corresponding searching algorithm based on shortest path algorithm are proposed, the method to calculate relative factor of RCTL is also introduced. Taking CEPRI 36-bus system as an example, the power flow transferring is simulated and the simulation results show that the algorithm is accurate and effective.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50477041).

**Key words:** hidden failure; relative cluster of the transmission line (RCTL); shortest path searching; relative factor of RCTL

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)22-0001-05

## 0 引言

从 2003 年美加“8.14”大停电事故到 2006 年欧洲“11.4”大停电事故, 近几年来, 世界各国发生的大停电事故接连不断, 具体损失难以估量<sup>[1~5]</sup>。这些电力灾难为我国的电力安全生产敲响了警钟, 构建坚强的电力安全防御体系是电力工作者和研究人员义不容辞的责任。

通过对这些大停电事故的分析可以发现, 在大型输电网络中, 当某条支路或设备因某种原因退出运行时, 线路有功潮流的转移和后备保护的不恰当

动作是连锁事故发生的主要因素。而后备保护之所以发生不恰当动作, 是因为保护系统中存在着隐藏故障。隐藏故障的定义为: 一种会导致继电保护不正确动作的永久缺陷, 其直接后果是因其他元件的切换而导致被保护元件的不恰当断开<sup>[6~9]</sup>。也就是说, 隐藏故障和一般的硬件故障不同, 必须由其他事件来揭露其隐含的缺陷。隐藏故障带来的危害是非常巨大的, 世界各国的大停电事故中隐藏故障都是引起或加剧大停电事故发展的关键因素, 如何在系统正常运行时就找出后备保护的隐藏故障, 防患于未然, 是目前电力系统后备保护亟需解决的一个难题。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50477041)

通过对世界各国发生的大停电事故研究发现,

在大型输电网络中, 后备的隐藏故障通常是在某条线路退出运行时暴露出来的。线路的切换引起全网潮流的重新分布, 当潮流转移至带有隐藏故障的线路时, 可能导致后备保护的不恰当动作, 进而引起连锁跳闸事故, 最终导致恶性停电事故的发生。

本文提出线路相关集的概念, 通过线路相关集来找出后备保护隐藏故障, 这种方法可以快速有效地找出当某条线路断开时可能因隐藏故障而发生不恰当动作的后备保护。线路相关集即受输电线路断开影响较大的线路, 也是发生连锁跳闸几率较高的线路。分析表明线路相关集中的线路是与断开线路的两端直接或间接相连的, 本文利用最短路径搜索办法来确定线路相关集, 然后在线路相关集的基础上再寻找带有隐藏故障的线路并进行消除, 有效避免事故的发生。

## 1 线路相关集

在电力系统输电网络中, 任何一条线路的断开都会引起全网潮流的重新分布, 为确定输电线路断开后影响的范围, 对潮流影响的区域进行有效界定, 本文提出了线路相关集的概念。假设电网由  $N$  个节点组成, 其中位于节点  $m$  和  $n$  之间的某条输电线路  $L_i$  发生故障被切除且没有导致电网分裂时, 在切除前瞬间该线路由始端  $m$  向终端  $n$  输送功率为  $P_i^{(0)} + jQ_i^{(0)}$ , 线路切除后其潮流将转移到其它线路。假设在线路  $L_i$  刚刚被切除后, 发电机出力和电网所带负荷没有发生变化且线路为无损线路, 即各个节点输出和吸收的功率都没有发生变化, 系统功率仍维持平衡。则可知: 此时由被切除线路始端  $m$  向终端  $n$  输送的功率总量并没有发生改变, 只是输电通道发生了变化。由此不难推断: 线路  $L_i$  断开后, 受影响的线路是直接或与  $L_i$  两端都相连的线路, 而且满足条件: 在这些线路上叠加的功率大小与  $L_i$  在被切除前瞬间所输送的功率大小成一定比例, 且方向一致。由于无功功率长距离传输具有很大难度, 一般采取就地平衡的原则, 故本文仅考虑在某条线路断开后原线路中有功潮流的传输规律。若某条受影响线路  $L_j$  叠加的有功功率为  $\Delta P_j$ , 则有如下等式成立:

$$\Delta P_j = \lambda_j * P_i^{(0)} \quad (0 \leq \lambda_j \leq 1)$$

其中:  $\lambda_j$  为线路  $L_j$  对线路  $L_i$  的相关因子,  $\lambda_j$  越大, 则线路  $L_j$  受线路  $L_i$  影响越大, 如  $\lambda_j = 0$ , 表示线路  $L_j$  不受线路  $L_i$  断开的影响,  $\lambda_j = 1$ , 则表示线路  $L_i$  的潮流全部转移到线路  $L_j$  上。而相关因子  $\lambda_j$  的

大小与线路的拓扑结构和线路参数有关。

在此, 我们定义线路相关集为: 电网中某条线路断开后, 与断开线路的两端直接或间接相连且受到有功潮流影响较大的线路的集合。如线路  $L_i$  的线路相关集即与线路  $L_i$  的两端  $m$ 、 $n$  直接或间接相连且在线路  $L_i$  断开后受其有功潮流影响较大的线路的集合。

## 2 线路相关集的确定

### 2.1 预备知识

给定一有向图,  $G = (V, E)$ , 它有  $n$  个点,  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ,  $m$  条边,  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 。对图  $G$  中每一条边  $e = (v_i, v_j)$  对应的有权  $W(e) = w_{ij}$ 。给定  $G$  只能给两个顶点  $v_0$  和  $v_n$ , 定义路  $R$  的权是  $R$  中所有边的权之和。记为  $W(R) = \sum_{e \in R} w(e)$ 。最短

路问题就是要在所有从  $v_0$  到  $v_n$  的路中, 求一条权最小的路。

根据电路的基本理论可知, 在电压与功率恒定的条件下, 电流的大小与所流经的线路阻抗成反比。如果路径电气距离过大, 则分布的电流就很小。结合本文, 在从断开线路的始端向末端的路径中, 总阻抗较小的路径——即电气距离较短的路径受潮流影响较大, 若总阻抗过大, 即电气距离过长, 则受潮流变化的影响就很小了, 可以忽略不计。故可以把对线路相关集的求解归结为一个对  $k$  最短路径的求解问题, 即由断开线路的一端到另一端的权值小于某定值的  $k$  最短路径的求解。其中  $G$  代表给定电网,  $V$  是电网中的所有节点的集合,  $E$  是电网中所有线路的集合,  $v_0$  和  $v_n$  分别对应断开线路的两端节点  $m$  和节点  $n$ , 每条边对应的权即各线路的阻抗值。

### 2.2 基于最短路径的求解过程

利用  $k$  最短路径算法对线路相关集的求解过程可分解为以下几个步骤:

- 1) 获取网络拓扑结构信息, 包括各个节点和线路的编号以及节点导纳矩阵;
- 2) 根据节点导纳矩阵计算从源点  $m$  到目的点  $n$  的最少节点路径  $R_{mn}$ , 具体方法将在下面详细介绍。假设  $R_{mn}$  为最短路径  $R_{min}$ , 则  $W(R_{min}) = W(R_{mn})$ ;
- 3) 根据节点导纳矩阵计算其它路径, 并与  $R_{min}$  进行对比, 若  $W(R) > \epsilon W(R_{min})$ , 则  $R$  为无效路径; 若  $W(R) \leq \epsilon W(R_{min})$ , 则  $R$  暂时定为有效路径; 若  $W(R) < W(R_{min})$ , 则用  $R$  的值替换原  $R_{min}$ , 则  $W(R_{min}) = W(R)$ ; 其中  $\epsilon$  为权值限制系数。由于在实际电路中, 若阻抗过大则受潮流影响的变化

率会很小, 可以忽略。所以权值过大的路径同样可以忽略不计。经过大量仿真, 现将  $\varepsilon$  取值为 4;

4) 在实际电网中, 当断开线路的两节点之间的路径包含的内节点超过一定数目时, 可以认为这条路径因对应的电气距离过长而无效。经过大量仿真发现, 当内节点数目  $N_{\text{node}} > 10$  时, 此路径上线路受潮流影响很小, 可以忽略;

5) 在最终确定的路径中找出权值最小的路径  $R_{\min}$ , 再次检查其它路径是否满足  $W(R) \leq \varepsilon W(R_{\min})$ , 剔除不满足条件的路径。

需要说明的是, 在计算过程中, 我们设置了一个数据表  $\text{str}$  来记录搜索过程中  $k$  条路径的信息,  $\text{str}$  包含 4 个字段, 分别是本节点序号、前驱节点序号、步长和阶数。其中步长即此节点和上一节点间线路的阻抗, 阶数即路径包含的节点数。由于本文中  $k$  的数值在起初并不确定, 可以先设置一个很大的数值, 在最后删去无用的数据, 仅保留有效路径的信息。

下面我们详细介绍根据系统导纳矩阵求解最少节点路径的方法。

已知电网由  $N$  个节点组成, 系统的网络方程式为:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1m} & \cdots & Y_{1n} & \cdots & Y_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{m1} & \cdots & Y_{mm} & \cdots & Y_{mn} & \cdots & Y_{mN} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nm} & \cdots & Y_{nn} & \cdots & Y_{nN} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N1} & \cdots & Y_{Nm} & \cdots & Y_{Nn} & \cdots & Y_{NN} \end{bmatrix}$$

假设其中位于节点  $m$  和  $n$  之间的某条输电线路  $L_i$  发生故障将被切除, 则以节点  $m$  为源点, 节点  $n$  为目的点。按以下步骤求解:

1) 初始化数据表  $\text{str}$ , 将节点  $m$  作为一条记录放入  $\text{str}$  中, 其字段信息为  $[m, \text{null}, 0, 0]$ ;

2) 计算节点  $m$  的所有相邻点, 组成集合  $[A]$ 。以导纳矩阵  $m$  行或列为搜索对象, 找出所有非零元素, 将其下标中与  $m$  相连的节点信息放入数据表  $\text{str}$  中, 如  $Y_{ma}$  非零, 则  $a \in [A]$ , 节点  $a$  将作为一条记录添加到  $\text{str}$  中, 字段信息为  $[a, m, 1/Y_{ma}, 1]$ , 其中节点  $m$  到  $a$  的阻抗值  $1/Y_{ma}$  即步长  $W(P_{m-a})$ ; 其它非零节点同样作为记录增加到  $\text{str}$  中, 阶数为 1, 若目的点  $n \in [A]$ , 则  $m-n$  即最短节点路径, 若  $n \notin [A]$ , 则继续下一步寻找;

3) 计算  $[A]$  中节点的相邻点 ( $m$  点除外), 组成集合  $[B]$ , 若集合  $[A]$  包含  $n_a$  个元素, 则集合  $[B]$  包含

$n_a$  个子集。以节点  $a$  为例, 以导纳矩阵  $a$  行或列为搜索对象, 找出所有非零元素, 即直接与  $a$  相连的节点, 组成集合  $[B_a]$ , 则  $[B_a] \subseteq [B]$ 。将其下标中与  $a$  相连的节点信息放入  $\text{str}$  中, 如  $Y_{ab}$  非零, 则节点  $b \in [B]$ , 节点  $b$  将作为一条记录添加到  $\text{str}$  中, 字段信息为  $[b, a, 1/Y_{ab}, 2]$ 。若目的点  $n \in [B_a]$ , 则  $m-a-n$  即最短节点路径。若  $n \notin [B]$ , 则继续下一步寻找;

4) 按照以上办法继续寻找, 结合内节点数  $N_{\text{node}} \leq 10$  的限制条件, 即阶数  $\leq 12$ , 直至找到目的集合  $[N] \supset n$ 。根据  $\text{str}$  中的记录, 可以方便的找到最少节点路径  $R_{mn}$ 。且路径的总权重等于经过的各

点权重之和, 即  $W(R_{mn}) = \sum_{i=m}^n W(R_i)$ 。

求得最少节点路径之后, 首先认为最短路径  $R_{\min} = R_{mn}$ , 然后根据 RCTL 求解过程的步骤 3) 和步骤 5), 可求得整个线路相关集。

### 2.3 线路相关因子的求解

假设在某线路断开后电源对各节点注入的功率不变, 则线路相关集中各线路潮流的变化量可以认为是断开线路潮流转移的结果。我们利用线路相关集重新构建一个简易网络, 其中, 断开线路的输电端和受电端分别看作是这个简易网络的电源和负荷, 线路相关集中的线路构成输电网络。假设断开线路在断开前输送的功率为 1, 则线路相关集中各线路输送的潮流大小即它们对应的线路相关因子的值。

结合上文, 若位于节点  $m$  和  $n$  之间的某条输电线路  $L_i$  发生故障被切除, 假设从节点  $m$  到  $n$  之间总的功率为 1, 则其线路相关集中各线路流经的功率值即为其相关因子  $\lambda_j^{(i)}$  的值。需要注意的是, 为简化求解过程, 且保证  $\lambda_j^{(i)}$  为实数, 在计算中忽略线路的电阻值, 仅取其电抗部分。可以用直流潮流算法来计算  $\lambda_j^{(i)}$  的值。

简化后的网络结构非常简单, 其潮流计算时间比起大规模网络的潮流计算所用时间大大减少, 可以满足事故预警控制的需要。

### 2.4 多支路线路相关集及相关因子的求解

以上讨论的是在单一支路断开时的情况, 若发生多条支路同时断开或在极短时间内相继断开的情况, 如何求解其线路相关集及相关因子呢?

先以两支路同时断开的情况进行讨论。两支路同时断开有如下几种可能:

1) 两支路线路相关集完全相关, 即两条支路具

有相同的线路相关集。

这种情况存在于两变电站间有多条并行传输线的情况。在此情况下，两支路的线路相关集求解与单支路相同。

2) 两支路线路相关集完全不相关，即两支路的线路相关集各自独立，没有交集。

这种情况下两支路的线路相关集仍各自单独求解。对各自线路相关集承受的潮流转移也单独计算。两个线路相关集的计算可同步进行，所以计算时间受支路增加的影响不大。

3) 两支路线路相关集部分相关。即两支路的线路相关集不完全相同，但存在交集。

先分析线路断开后的潮流依次进行转移的情况，设定第一条支路  $L_1$  断开前的潮流为  $P_1^0$ ，第二条支路  $L_2$  断开前的潮流为  $P_2^0$ ，若线路  $L_n$  位于支路  $L_1$  与  $L_2$  线路相关集的交集内，支路  $L_1$  断开后存在以下关系：

$$\Delta P_n^1 = \lambda_n^1 P_1^0 \quad (1)$$

$$\Delta P_n^1 = \lambda_2^1 P_1^0 \quad (2)$$

其中： $\lambda_n^1$  为支路  $L_n$  对支路  $L_1$  的线路相关因子， $\lambda_2^1$  为支路  $L_2$  对  $L_1$  的线路相关因子， $\Delta P_n^1$  和  $\Delta P_2^1$  分别为支路  $L_n$  和  $L_2$  因支路  $L_1$  断开而承受的潮流转移。

继而支路  $L_2$  断开后，支路  $L_n$  上分布的潮流转移为：

$$\Delta P_n^2 = \lambda_n^{2'} (P_2^0 + \Delta P_2^1) \quad (3)$$

其中： $\lambda_n^{2'}$  是在支路  $L_1$  断开后支路  $L_n$  对支路  $L_2$  的线路相关因子。

在两支路断开后支路  $L_n$  总的潮流变化量为：

$$\Delta P_n = \Delta P_n^1 + \Delta P_n^2 \quad (4)$$

将式 (1)、(2)、(3) 代入，式 (4) 最终为：

$$\Delta P_n = \lambda_n^{2'} P_2^0 + (\lambda_n^{2'} \lambda_2^1 + \lambda_n^1) P_1^0 \quad (5)$$

若各自独立计算各断开支路的线路相关集，且在计算线路相关集的过程中不考虑其他断开支路的存在，即在计算  $L_1$  的线路相关集时当作  $L_2$  不存在，而在计算  $L_2$  的相关集时也当作  $L_1$  不存在，则其线路相关集交集中支路  $L_n$  最后的潮流变化为：

$$\Delta P_n = \lambda_n^{1'} P_1^0 + \lambda_n^{2'} P_2^0 \quad (6)$$

其中： $\lambda_n^{1'}$  是在支路  $L_2$  断开的情况下支路  $L_n$  对支路

$L_1$  的相关因子。由线路相关因子的物理意义可知，由于支路  $L_2$  断开，原来在  $L_1$  断开后本该由  $L_2$  承担的潮流现在又要按比例分担一部分到支路  $L_n$  上，这个比例数即支路  $L_n$  对支路  $L_2$  的相关因子。所以满足：

$$\lambda_n^{1'} = \lambda_n^1 + \lambda_n^{2'} \lambda_2^1 \quad (7)$$

将式 (7) 代入式 (6) 可以得到式 (5)，同时式 (6) 也可满足两支路完全相关和完全不相关的情况。推而广之，可以得出多支路断开线路相关集的计算方法：在多条支路同时断开或在极短时间内相继断开的情况下，在计算支路的线路相关集及线路相关因子时各自独立计算，不考虑其余断开线路的存在。这样多条支路的线路相关集与线路相关因子的计算可并行进行，与计算单一线路断开所用的时间相同。

### 3 基于线路相关集的隐藏故障算法

根据以上介绍的内容，系统中每条线路的线路相关集可以提前计算出，当系统中某条线路需要断开时，可以快速方便地计算出其线路相关集中的任一线路在线路断开后的有功潮流，如若线路  $L_i$  断开其线路相关集中任一线路  $L_j$  的有功潮流为：

$$P_j^{(i)} = P_j^{(0)} + \lambda_j^{(i)} P_i^{(0)}$$

式中： $P_i^{(0)}$  为线路  $L_i$  断开前的有功潮流， $P_j^{(0)}$  为线路  $L_i$  断开前线路  $L_j$  的有功潮流， $P_j^{(i)}$  为线路  $L_i$  断开后线路  $L_j$  的有功潮流， $\lambda_j^{(i)}$  为线路  $L_j$  对线路  $L_i$  的相关因子。

由于每条线路都有其固定的最大容许有功负荷  $P_{\max}$ ，当计算出的  $P_j^{(i)} \geq P_{j\max}$  时且已经达到后备保护的动作范围时，可以判定线路  $L_j$  对应的后备保护发生隐藏故障的几率较大。

对于带有隐藏故障的后备保护，调度人员应及时采取切负荷或转移负荷等有效的控制措施来预防事故的发生。

### 4 仿真算例分析

为验证上述事故预想的有效性，本文采用 CEPRI36 节点系统进行仿真算例分析。仿真系统接线图如图 1 所示，仿真工具为北京电科院开发的 PSASP 仿真系统。

假设母线  $B_{16}$  到母线  $B_{19}$  之间的线路需要断开，最终确定的线路相关集如表 1 所示。

表 1 线路相关集  
Tab.1 Adjoining list

序号	k 最短路径
1	16-21-19
2	16-20-22-21-19
3	16-29-34-33-31-30-19
4	16-13-28-27-12-14-19(最短)

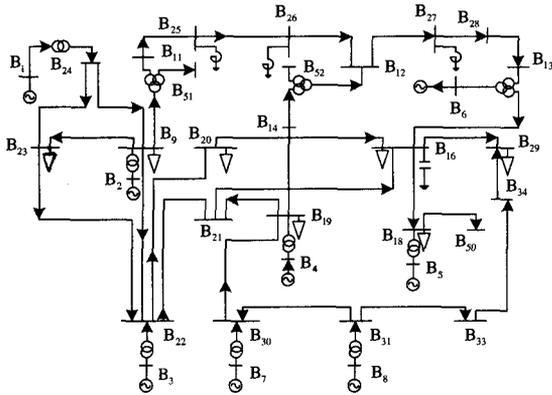


图 1 CEPRI 36 节点系统接线图

Fig.1 One-line diagram of EPRI 36-bus system

仿真得到的各线路潮流的变化量与线路相关因子计算值及根据线路相关因子计算的线路相关集的潮流的变化量对比表如表 2 所示。

表 2 仿真与计算潮流变化量对比表  
Tab.2 Comparison between calculation results and simulation results

线路	仿真 $\Delta P/MW$	$\lambda$	计算 $\Delta P/MW$	误差/(%)
14-19	52.246	0.53	50.63	1.616
28-27	51.355	0.53	50.63	0.725
27-12	51.355	0.53	50.63	0.725
13-28	49.88	0.53	50.63	-0.75
21-19	28.333	0.31	29.61	-1.277
34-33	15.78	0.16	15.29	0.49
33-31	15.78	0.16	15.29	0.49
31-30	15.78	0.16	15.29	0.49
30-19	14.427	0.16	15.29	-0.863
16-29	14.144	0.16	15.29	-1.146
29-34	14.144	0.16	15.29	-1.146
16-21	13.546	0.157	14.99	-1.444
20-22	12.981	0.153	14.61	-1.629
16-20	12.524	0.153	14.61	-2.086
22-21	12.509	0.153	14.61	-2.101
22-9	1.018			
23-24	0.961			
26-12	0.891			
22-23	0.878			
11-25	0.798			
25-26	0.798			
9-24	0.369			
23-9	0.148			
16-18	0.001			
18-50	0			

由表 2 可知, 所有受线路  $L_{16-19}$  断开影响较大的线路都包含所求得的线路相关集中, 且根据线路相关因子计算求得的潮流变化量与仿真结果非常近似。

### 5 结语

后备保护隐藏故障是导致大停电事故发生及扩大的重要原因, 但隐藏故障只有在其他设备发生故障时才能暴露出来, 加大了事故预防的难度。本文提出了一种基于线路相关集的寻找后备保护隐藏故障的方法, 可以方便快捷地计算出一条或多条输电线路需要开断后其他线路的后备保护发生隐藏故障的概率, 以便提前对可能发生的事故进行预防。该方法原理简单, 实现方便, 仿真表明该方法准确有效, 完全可以用于实际应用。

### 参考文献

- [1] U.S.-Canada Power systems Outage Task Force. Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada[EB/OL]. <http://www.ferc.gov/>, 2004.
- [2] 薛禹胜. 综合防御由偶然故障演化为电力灾难——北美“8.14 大停电的警示”[J]. 电力系统自动化, 2003,27(18): 1-5.  
XUE Yu-sheng. The Way from a Simple Contingency to System-Wide Disaster——Lessons from the Eastern Interconnection Blackout in 2003[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(18):1-5.
- [3] 赵自刚, 张洪, 赵春雷. 美加大停电后关于继电保护的一些思考[J]. 继电器, 2004,32(21):76-79.  
ZHAO Zi-gang, ZHANG Hong, ZHAO Chun-lei. Reflection on Protective Relay After the Great 8.14 Power Failure of America and Canada[J]. Relay, 2004, 32(21):76-79.
- [4] 李再华, 白晓民, 丁剑, 等. 西欧大停电事故分析[J]. 电力系统自动化, 2007,31(1):1-3.  
LI Zai-hua, BAI Xiao-min, DING Jian, et al. Analysis of the Western Europe Blackout[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007,31(1):1-3.
- [5] 鲁顺, 高立群, 王珂, 等. 莫斯科大停电分析及启示[J]. 继电器, 2006, 34(16):27-31.  
LU Shun, GAO Li-qun, WANG Ke, et al. Analysis and Inspiration on Blackout of Moscow[J]. Relay, 2006, 34(16):27-31.
- [6] 王明俊. 大电网继电自动装置的隐藏故障、脆弱性和适应性问题[J]. 电力自动化设备, 2005,25(3):1-4.  
WANG Ming-jun. Hidden Failure, Vulnerability and Adaptability of Relaying Automations in Large Interconnected Power Systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(3):1-4.

性短路情况下对永久性故障实施重合闸对系统造成的巨大冲击。

## 5 结论

实现自适应重合闸技术对电力系统的稳定安全有重要意义。其关键就是准确识别瞬时性故障与永久性故障,本文提出的比较母线故障相电压暂态分量的谱能量方法,能可靠地识别故障类型,以实现自适应重合闸。该方案只需提取 PT 二次传变电压信号,实现简单。经过大量的 EMTP 仿真,验证了该方案的有效性与可靠性。

## 参考文献

- [1] 葛耀中. 在单相自动重合闸过程中判别瞬时和永久故障的方法[J]. 西安交通大学学报, 1984, 18(2): 23-32.  
GE Yao-zhong. Method of Distinguishing Between Instant and Permanent Fault During Single-Phase Reclosing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1984, 18(2): 23-31.
- [2] 范越, 施围. 输电线路单相自动重合闸中电压判据的修正[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 44-47.  
FAN Yue, SHI Wei. Modification of Voltage Criterion in the Single-pole Automatic Reclosing of Transmission Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(6): 44-47.
- [3] 房鑫炎 阙波. 人工神经网络在自适应重合闸瞬时与永久故障判别中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(3): 80-86.  
FANG Yin-yan, QUE Bo. The Application of ANN in the Distinction of Transient and Permanent Faults during Adaptive Autoreclosure[J]. Proceedings of the EPSA, 1999, 11(3): 80-86.
- [4] 蔡超豪. 基于小波分析的自适应重合闸[J]. 继电器, 1999, 27(2): 21-23.  
CAI Chao-hao. Adaptive Single-phase Reclosing Based on Wavelet [J]. Relay, 1999, 27(2): 21-23.
- [5] 李斌, 李永丽, 曾治安, 等. 基于电压谐波信号分析的单相自适应重合闸[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 53-57.  
LI Bin, LI Yong-li, ZENG Zhi-an, et al. Study on Single-pole Adaptive Reclosure Based on Analysis of Voltage Harmonic Signal[J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 53-57.
- [6] Johns A T, Aggarwal R K, Song Y H. Improved Technique for Modeling Fault Arcs on Faulted EHV Transmission Systems[J]. IEE Pro-Gener, Transm and Distrib, 1994, 141(2): 148-154.
- [7] Golderg S, Horton W F. A Computer of the Secondary Arc in Single Phase Operation of Transmission Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 586-593.
- [8] 全玉生, 李学鹏, 杨俊伟, 等. 数学形态学算子在电力系统突变信号检测中应用[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(3): 1-5.  
QUAN Yu-sheng, LI Xue-peng, YANG Jun-wei, et al. Application of Several Mathematical Morphology Operators in Power System Saltation Signal Detection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(3): 1-5.
- [9] 马静, 王增平, 徐岩, 等. 利用多分辨形态梯度实现单端暂态量保护新方案[J]. 华北电力大学学报, 2005, 33(5): 7-11.  
MA Jing, WANG Zeng-ping, XU Yan, et al. New Scheme of Single-end Transient-based Protection Using Multi-resolution[J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, 33(5): 7-11.

收稿日期: 2007-05-10; 修回日期: 2007-08-01

作者简介:

程玲(1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为特高压电网单相自适应重合闸; E-mail: chengling\_1983xy@163.com

徐玉琴(1964-), 女, 教授, 主要从事电力系统继电保护新原理与新技术、电力系统分析与控制方面的研究;

宋祜霖(1981-), 男, 电气工程师, 于国家电网公司宜昌超高压管理处江陵换流站工作。

Wide-area Disturbances[J]. 2001 IEEE: 710-714.

收稿日期: 2007-05-16; 修回日期: 2007-08-13

作者简介:

张玮(1973-), 女, 博士生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: zhangwei\_jn@mail.sdu.edu.cn

潘贞存(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为电力系统继电保护和安全自动控制;

李磊(1974-), 男, 高工, 研究领域为电力系统继电保护。

(上接第 5 页 continued from page 5)

- [7] Surachet Tamronglak. Analysis of Power System Disturbances due to Relay Hidden Failures Doctoral Dissertation[D]. Virginia: Virginia Polytechnic and State University, 1994.
- [8] 易俊, 周孝信. 考虑系统频率特性以及保护隐藏故障的电网连锁故障模型[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(14): 1-5.
- [9] Elizondo D C, de la Ree J, Phadke A J, et al. Hidden Failures in Protection Systems and Their Impact on